

AVALIAÇÃO DOS REVESTIMENTOS AlCrN e AlCrTiSiN NO FRESAMENTO DE FERRO FUNDIDO VERMICULAR

Viana, Rhander, rhander@inpi.gov.br¹
Machado, Álisson Rocha, alissonm@mecanica.ufu.br¹
de Lima, Milton Sérgio Fernandes, msflima@gmail.com²
Pereira, Adriana Ana, adrianap@inpi.gov.br³

¹Universidade Federal de Uberlândia, Laboratório de Ensino e Pesquisa em Usinagem (LEPU-UFU), Av. João Naves de Ávila, 2160, CEP 38408-902, Uberlândia-MG, Brasil.

²Instituto de Estudos Avançados (IEAv-CTA), C.P. 6044, São José dos Campos-SP, Brasil.

³Universidade Federal de Santa Catarina, Departamento de Engenharia Mecânica, Campus Universitário, Trindade, EMC 88010-970, Florianópolis-SC, Brasil.

Resumo: *Este trabalho tem como objetivo investigar o desempenho dos revestimentos AlCrN e AlCrTiSiN depositados pelo processo PVD em insertos de metal duro da classe ISO K. A avaliação dos revestimentos AlCrN e AlCrTiSiN foi realizada por meio de ensaios de vida no fresamento frontal de ferro fundido vermicular classe 450 e ensaios de indentação Rockwell com carga de 100 kgf com o objetivo de avaliar a adesividade dos revestimentos sobre o substrato de metal duro e ensaios de microabrasão por esfera livre cujo objetivo é determinar os coeficientes de desgaste destes revestimentos. Os resultados dos ensaios de vida mostraram um desempenho médio superior do revestimento AlCrTiSiN em relação ao AlCrN. Já os resultados do ensaio de indentação Rockwell mostraram uma menor delaminação do AlCrTiSiN, e no ensaio de microabrasão um maior coeficiente de desgaste do revestimento AlCrN.*

Palavras-chave: *Revestimentos, Fresamento, Ferro fundido vermicular, Indentação, Microabrasão.*

1. INTRODUÇÃO

Com o aumento da produtividade no atual mercado da indústria metal-mecânica é constante a exigência de novas pesquisas e o desenvolvimento de novas máquinas e, em especial, do ferramental associado a estas máquinas.

Mais do que nunca se tem investigado cautelosamente o desempenho de ferramentas de corte com o intuito de estender potencialmente sua vida e melhorar a qualidade da peça usinada.

Na busca de novas ferramentas tem-se focado bastante na utilização de revestimentos finos aplicados ao substrato. A deposição de revestimentos tem como objetivo alterar as propriedades da superfície. Entre as características modificadas por meio de revestimentos pode-se destacar as propriedades ópticas, magnéticas, eletrônicas, químicas, resistência mecânica e de resistência ao desgaste (Hogmark et al., 2000).

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 da tenacidade da ferramenta. 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).

Neste trabalho dois novos revestimentos aplicados ao substrato de ferramentas de corte foram testados, AlCrN e AlCrTiSiN. Estes revestimentos são considerados uma evolução do TiAlN, pois apresentam maiores resistências a oxidação, a diminuição de suas microdurezas é menor do que a do TiAlN com o aumento da temperatura de corte e em processos de corte intermitente estes revestimentos apresentam maior capacidade de dissipar a energia durante o impacto da ferramenta, diminuindo a possibilidade de fratura do filme (Fox-Rabinovich et al., 2005 e Endrino et al., 2007).

Neste trabalho três ensaios foram propostos para testar estes revestimentos: ensaios de vida de ferramentas, ensaios de indentação Rockwell com carga de 100 kgf e ensaios de microabrasão por esfera livre. Os ensaios de vida foram realizados no fresamento frontal de ferro fundido vermicular classe 450, material considerado de difícil usinabilidade. Os ensaios de indentação Rockwell tiveram como objetivo verificar a adesividade destes revestimentos depositados sobre substratos de metal duro da classe ISO K, uma vez que a falha do revestimento associada com a baixa adesividade do filme sobre o substrato pode levar a ferramenta de corte a um desgaste prematuro e, conseqüentemente, ao seu fim

de vida. Já os ensaios de microabrasão tiveram como intuito determinar os coeficientes de desgaste destes revestimentos. Estes ensaios são uma alternativa na obtenção de informações sobre a resistência ao desgaste dos revestimentos, que podem auxiliar no melhor entendimento de seus desempenhos nos ensaios de vida.

2. MATERIAIS E METODOLOGIA

2.1. Materiais

Para a execução deste trabalho foram utilizados os seguintes materiais e equipamentos:

- Dois insertos de metal duro da classe ISO K, com quatro arestas de corte, e geometria SEMN 12 04 AZ 235 fornecidas pela Sandvik e revestidas de AlCrN e AlCrTiSiN pela Oerlikon Balzers;
- Fresa Sandvik Coromant R260.22-080-15063022 com diâmetro de 80 mm e com capacidade para 6 insertos;
- Centro de usinagem Romi Bridgeport 760, pertencente ao Laboratório de Ensino e Pesquisa em Usinagem (LEPU-UFU);
- Microscópio óptico, Olympus SZ61, com câmera CCD, Evolution LC Color, e um software analisador de imagens, equipamento também pertencente ao Laboratório de Ensino e Pesquisa em Usinagem (LEPU-UFU) para medição de desgaste de flanco e produção de imagens;
- Corpos de prova de ferro fundido vermicular classe 450 na forma de “coxinho” com 85mm de altura, 67mm de largura e 350mm de comprimento, fornecidos pela Tupy S.A.;
- Durômetro universal Wolpert para realização dos ensaios de indentação Rockwell, equipamento pertencente ao Laboratório de Ensaios Mecânicos (LEM-ITUC) da PUC-Rio;
- *Calowear* da CSEM-Instruments utilizado no ensaio de microabrasão do tipo esfera livre, equipamento pertence ao Laboratório Van der Graff da Faculdade de Física da PUC-Rio;
- Utilização do programa *Image J* para medição das áreas de delaminação dos revestimentos AlCrN e AlCrTiSiN.

2.2. Ensaios de Vida

Os ensaios de vida foram realizados num centro de usinagem ROMI Bridgeport Discovery 760 no fresamento frontal de ferro fundido vermicular, como mostra a Fig. (1). Nestes ensaios somente um inserto de metal duro foi utilizado para facilitar o acompanhamento do desgaste de flanco. As condições de corte para estes ensaios são dadas na Tab. (1), com variação apenas para a velocidade de corte. Para a análise do desempenho das ferramentas foi estabelecido o volume de material removido para quatro repetições (4 arestas de corte), o critério de fim de vida adotado foi o desgaste de flanco máximo da ferramenta, $VB_{Bmáx} = 0,6$ mm.



Figura 1. Montagem experimental para os ensaios de vida de ferramentas mostrando o corpo de prova, a fresa e a máquina-ferramenta utilizados nos ensaios de vida.

Tabela 1. Condições de corte para os ensaios de vida.

Ensaio	v_c [m/min]	f [mm/volta]	a_p [mm]
1	300	0,3	1,0
2	150	0,3	1,0

2.3. Ensaio de indentação Rockwell

O objetivo deste ensaio foi avaliar qualitativamente a adesividade dos revestimentos AlCrN e AlCrTiSiN depositados sobre insertos de metal duro da classe ISO K.

O ensaio consistiu em indentar os conjugados revestimentos/substratos por meio de um ensaio de dureza Rockwell, utilizando um penetrador cônico de diamante com ângulo de $120^\circ \pm 0,35^\circ$ no vértice, ponta na forma de calota esférica com raio de $200 \pm 10 \mu\text{m}$ e desvio de perfil de $\pm 2 \mu\text{m}$, e aplicação de carga de indentação de 100 kgf. As indentações foram realizadas na superfície de saída dos insertos, conforme Fig. (2). Após a realização das indentações as impressões deixadas foram visualizadas por meio de microscopia eletrônica de varredura. Além da avaliação qualitativa da adesividade, a visualização das indentações permitiu também medir a área de delaminação dos revestimentos.



Figura 2. Região de indentação na superfície de saída dos insertos.

2.4. Ensaio de microabrasão

O objetivo deste ensaio foi determinar os coeficientes de desgaste dos revestimentos AlCrN e AlCrTiSiN depositados sobre insertos de metal duro da classe ISO K.

O ensaio foi realizado em um equipamento de microabrasão do tipo esfera livre, *calowear*. Neste equipamento uma esfera de aço gira livremente sobre a superfície de saída da ferramenta impulsionada por um eixo motor. A ferramenta foi fixada em um porta-amostra acoplado a uma célula de carga que mede continuamente a força normal durante o ensaio. Durante o ensaio uma lama abrasiva foi gotejada sobre a esfera de aço, de modo a promover o desgaste na superfície de saída da ferramenta, na mesma região de indentação mostrada na Fig. (2).

No equipamento de microabrasão do tipo esfera livre foi utilizado uma esfera de aço AISI 52100 com diâmetro de 25,4 mm, lama abrasiva contendo 40 ml de água destilada e 30 g de SiC (classe F1200 com tamanho médio das partículas em torno de $4 \mu\text{m}$) resultando numa concentração de $0,75 \text{ g/cm}^3$, rotação do eixo motor de 150 rpm (velocidade de deslizamento de aproximadamente $0,1 \text{ m/s}$) e carga normal em torno de 0,35 N. A lama abrasiva foi agitada continuamente por um agitador magnético para evitar a decantação do abrasivo e bombeada por uma bomba peristáltica sobre a esfera numa vazão de 1 gota a cada 3 segundos. A Figura (3) mostra em detalhe a montagem do experimento.

A interação entre a esfera e a superfície de saída da ferramenta dá origem a uma calota de desgaste, que foi medida em intervalos interrompidos do ensaio de 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9 e 10 minutos, com descarte dos primeiros 60 segundos para estabilização da rotação do eixo motor.

A cada parada do ensaio foram medidos os diâmetros externo e interno da calota de desgaste por meio de uma luneta óptica calibrada. Foram realizados três ensaios para cada conjugado revestimento/substrato.

Os diâmetros externo e interno das calotas de desgaste, o número de voltas dado pelo eixo motor e a carga normal foram utilizados no cálculo dos coeficientes de desgaste dos revestimentos. Esse cálculo foi realizado por meio de um programa desenvolvido em Excel pelo fabricante do equipamento *CSEM-Instruments*.

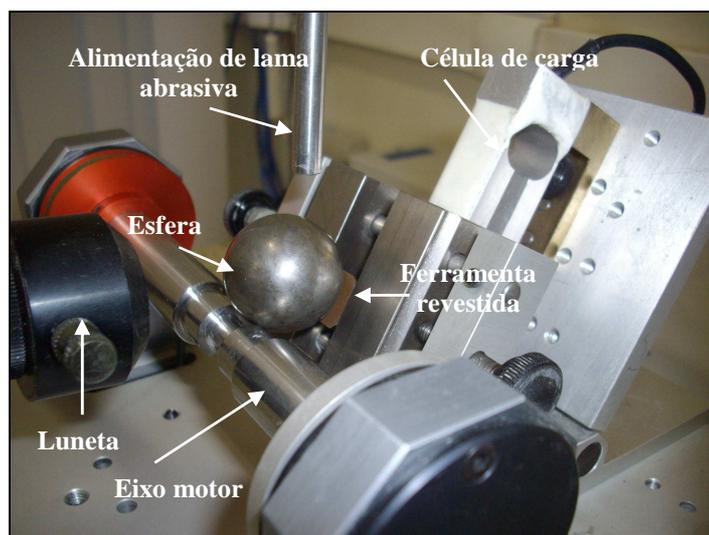


Figura 3. Detalhe do experimento de microabrasão por esfera livre.

3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

3.1. Ensaios de Vida

As Figuras (4) e (5) mostram os resultados dos ensaios de vida das ferramentas revestidas de AlCrN e AlCrTiSiN no fresamento frontal de ferro fundido vermicular.

Os resultados quantitativos dos ensaios de vida foram submetidos a um condicionamento estatístico. O condicionamento estatístico proposto foi um método *Out-Lier* para pequenas amostras, que exclui pontos da amostra que estejam fora de um determinado intervalo de confiança (90 % de confiabilidade), com o objetivo de se tentar diminuir a dispersão dos resultados obtidos, dando maior confiança ao ensaio.

Entretanto, as Figs. (4) e (5) mostram que mesmo após a aplicação do método *Out-Lier*, a dispersão dos dados experimentais nos ensaios de vida das ferramentas continua elevada. A dispersão elevada nos ensaios de vida ocorre, principalmente, em função do processo intermitente de corte, que é ainda mais severo devido à geometria da peça usinada, a qual provoca um corte duplo interrompido, e da heterogeneidade do material da peça.

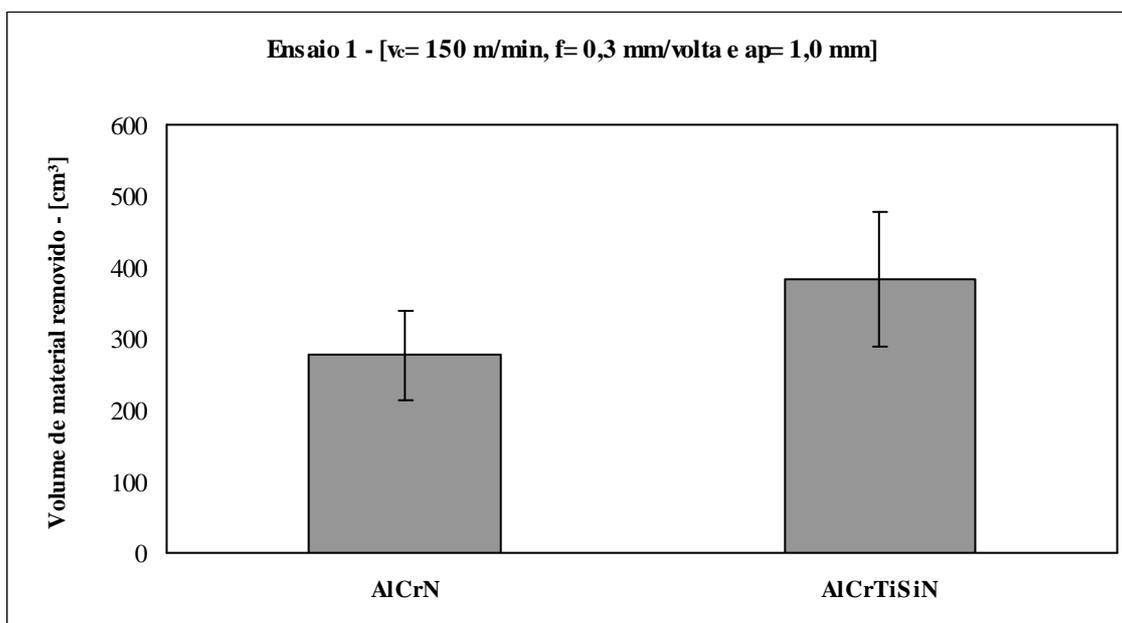


Figura 4. Resultados dos ensaios de vida no fresamento frontal de ferro fundido vermicular nas condições de corte do ensaio 1.

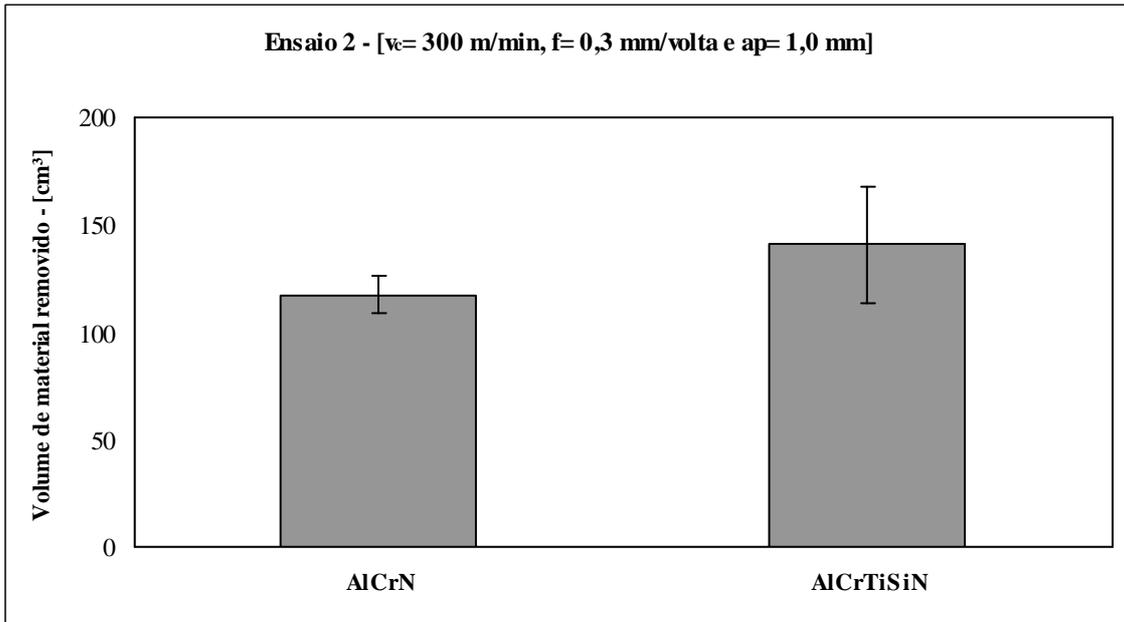


Figura 5. Resultados dos ensaios de vida no fresamento frontal de ferro fundido vermicular nas condições de corte do ensaio 2.

Os resultados das Figs. (4) e (5) mostram ainda o maior desempenho médio do revestimento AlCrTiSiN em relação ao AlCrN. Contudo, estatisticamente não há diferença no desempenho dos revestimentos testados para o material usinado nas condições de corte utilizadas.

A diferença no desempenho médio dos revestimentos AlCrN e AlCrTiSiN possivelmente está ligada a composição química do filme, uma vez que o silício presente no AlCrTiSiN aumenta a dureza, melhora a resistência ao desgaste e a oxidação (Derflinger, 2008).

A composição química influencia diretamente nas propriedades intrínsecas do revestimento, juntamente com outros fatores como, a nucleação e a forma de crescimento do filme, as tensões residuais deixadas pelo processo de deposição e sua adesividade, que podem ser determinantes no comportamento da ferramenta de corte.

Ainda nas ferramentas ensaiadas foi observado o mesmo aspecto de desgaste para as condições de corte utilizadas, ocorrendo de maneira constante.

Por meio das fotos obtidas com microscópio óptico, mostradas na Fig. (6), foi possível constatar, de maneira geral, a ocorrência de um desgaste uniforme e localizado nas ferramentas, típico de um desgaste de flanco.

O aspecto do desgaste de flanco observado nas fotos da Fig. (6) não permitiu identificar com clareza o mecanismo de desgaste que atua nas ferramentas durante a usinagem. Entretanto, o padrão de desgaste com microsulcos relativamente uniforme e fácil de mensurar no flanco da ferramenta, caracterizam a abrasão como o principal mecanismo de desgaste (Childs et al., 2000). Também é provável a ação do mecanismo de desgaste por *attrition* nas ferramentas ensaiadas. Estes mecanismos de desgaste são típicos da presença de fluxo irregular de material, como é o caso do processo de fresamento.

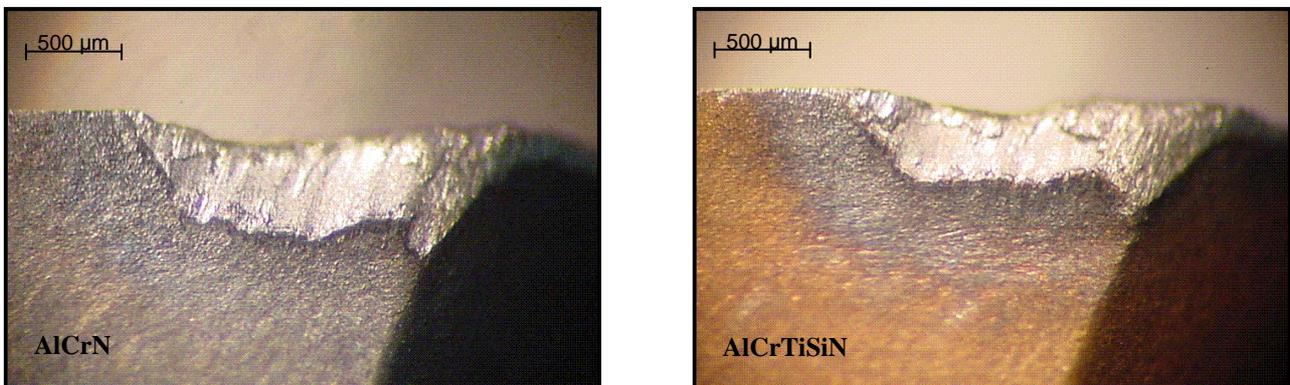


Figura 6. Desgaste de flanco das ferramentas de metal duro revestidas de AlCrN e AlCrTiSiN após o fim de vida, na condição de corte do ensaio 2.

3.2. Ensaio de Indentação Rockwell

A Figura (7) mostra o resultado das indentações para as ferramentas de metal duro revestidas de AlCrN e AlCrTiSiN. Nas imagens de MEV com aumento de 100 vezes mostradas na Fig. (7) observa-se claramente o destacamento dos revestimentos, expondo o substrato de metal duro.

Com as imagens da Fig. (7) e utilização do *software* livre *Image J* foi possível obter as áreas de delaminação dos revestimentos, com uma maior área de delaminação para o revestimento AlCrN, em torno de 0,85 mm², e para o AlCrTiSiN em torno de 0,65 mm².

A menor área de delaminação do revestimento AlCrTiSiN mostra sua maior adesividade sobre o substrato de metal duro, justificando, provavelmente, seu melhor desempenho nos ensaios de vida.

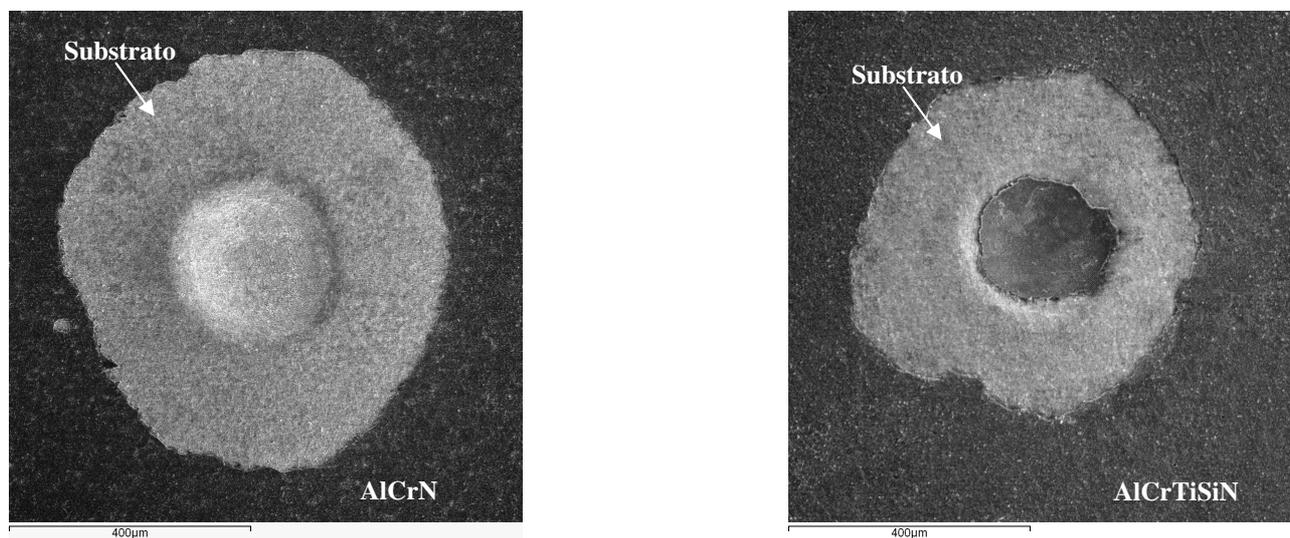


Figura 7. Indentações com carga de 100 kgf para as ferramentas de metal duro revestidas de AlCrN e AlCrTiSiN, (aumento de 100x).

3.3. Ensaios de Microabrasão

A Figura (8) mostra o resultado dos ensaios de microabrasão do tipo esfera livre para as ferramentas de metal duro revestidas de AlCrN e AlCrTiSiN. Os resultados indicam uma maior resistência ao desgaste abrasivo do revestimento AlCrTiSiN. Este resultado, somado aos ensaios de indentação, provavelmente, é mais um indicativo do bom desempenho do AlCrTiSiN nos ensaios de vida.

O comportamento tribológico dos revestimentos PVD ao desgaste ainda é pouco estudado. A taxa de desgaste dos revestimentos finos depositados por PVD é influenciada por muitos parâmetros, como: os mecanismos que influenciam na evolução do processo de desgaste (adesão, erosão, abrasão a dois e três corpos, tribo-oxidação e fadiga superficial), propriedades do material do substrato (microestrutura cristalina e defeitos, microdureza, módulo de elasticidade e rugosidade da superfície) e propriedades do revestimento (microestrutura cristalina e defeitos gerados pelo processo de deposição, resistência da interface substrato/revestimento, espessura, microdureza, módulo de elasticidade, composição química e rugosidade da superfície) (Sivitski et al., 2008).

Provavelmente, dois fatores foram determinantes para o melhor desempenho do AlCrTiSiN, sua composição química, influenciada principalmente pela presença do silício, que altera a resistência ao desgaste do filme, e a sua melhor adesividade sobre o substrato de metal duro, como mostrou os ensaios de indentação Rockwell.

A pouca resistência da interface substrato/revestimento do AlCrN ou a sua baixa adesividade, poderia ser uma justificativa para o seu pior desempenho no ensaio de microabrasão, pois os resíduos da fragmentação precoce do revestimento aceleram a formação da cratera de desgaste.

Nas ferramentas ensaiadas a evolução do processo de desgaste para os dois revestimentos testados foi influenciada pelo mecanismo de desgaste abrasivo por rolamento. Neste tipo de mecanismo não fica evidenciada a direção do desgaste, como no mecanismo de desgaste abrasivo por deslizamento em que normalmente observa-se a presença de vários riscos paralelos. Geralmente, no mecanismo de desgaste por rolamento a partícula abrasiva de SiC rola sobre a superfície da amostra, podendo produzir uma grande quantidade de indentações (Franco Jr., 2003). Neste tipo de desgaste não é possível distinguir a direção do movimento da esfera sobre a superfície da ferramenta, caracterizando o mecanismo de desgaste por rolamento com aspecto aleatório.

Ensaos tribológicos, como o ensaio de microabrasão, são importantes no estudo do comportamento da interação entre o substrato e o revestimento, pois podem auxiliar no entendimento dos resultados de usinagem. Entretanto, a dinâmica do processo de corte com as mudanças constantes nas solicitações mecânicas e térmicas que a ferramenta sofre não podem ser simuladas por estes ensaios.

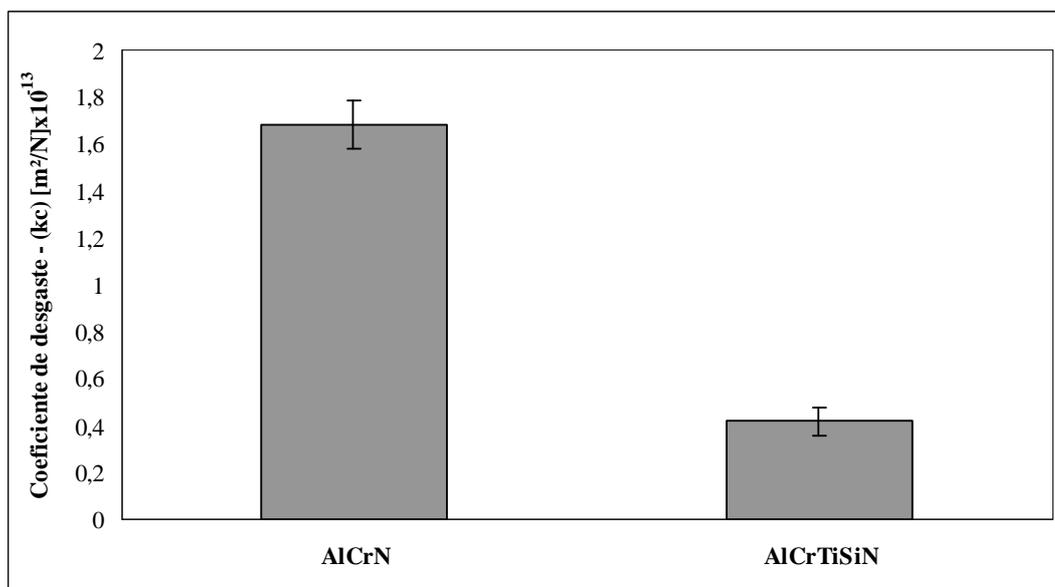


Figura 8. Coeficientes de desgaste dos revestimentos AlCrN e AlCrTiSiN para o ensaio de microabrasão.

4. CONCLUSÕES

- Os resultados dos ensaios de vida mostraram um maior desempenho médio do revestimento AlCrTiSiN em relação do AlCrN no fresamento frontal de ferro fundido vermicular classe 450 para as condições de corte utilizadas;
- Provavelmente, os mecanismos de desgaste atuantes nos ensaios de vida para as duas ferramentas testadas nas condições de corte utilizadas foram abrasão e *attrition*;
- Nos ensaios de indentação Rockwell com carga de 100 kgf o revestimento AlCrTiSiN apresentou uma maior adesividade sobre o substrato de metal duro classe ISO K, com uma menor área de delaminação;
- Nos ensaios de microabrasão o revestimento AlCrTiSiN apresentou um menor coeficiente de desgaste em relação do AlCrN.

5. REFERÊNCIAS

- Childs, T. and et al., 2000, "Metal Machining, Theory and Applications", First Edition, London: Elsevier Butterworth-Heinemann, vol. 1, 416 p.
- Derflinger, V., Reiter, A. and Gey, C., 2008, "Workpiece with a Hard Film of AlCr-Containing Material, and Process for its Production", US Patent 0131727 A1.
- Endrino, J. L., Fox-Rabinovich, G. S., Reiter, A. and Veldhuis, S. V., Escobar Galindo, R., Albella, J. M., Marco, J. F., 2007, "Oxidation Tuning in AlCrN Coatings", Surface and Coatings Technology, vol. 201, pp. 4505-4511.
- Fox-Rabinovich, G. S., Yamamoto, K., Veldhuis, S. C., Kovalev, A. I. and Dosbaeva, G. K., 2005, "Tribological Adaptability of TiAlCrN PVD Coatings Under High Performance Dry Machining Conditions", Surface & Coatings Technology, vol. 200, pp. 1804-1813
- Franco Jr, A. R., 2003, "Obtenção de Revestimentos Dúplex por Nitretação a Plasma e PVD-TiN em Aços-Ferramenta AISI D2 e AISI H13", Tese de Doutorado, Universidade de São Paulo, 196 pp, São Paulo-SP.
- Hogmark, S., Jacobson, S. and Larsson, M., 2000, "Design and Evaluation in Tribological Coatings", Wear, vol. 246, pp. 20-33.
- Sivitski, A., Ajaots, M., Põdra, P., 2008, "Wear of PVD Hard Coatings in Sliding Contacts", 6th International DAAAM Baltic Conference Industrial Engineering 24-26 April 2008, Tallinn, Estonia, pp. 1-6.

6. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao CNPq, CAPES, FAPEMIG, PUC-Rio, Sandvik, Oerlikon Balzers e Tupy S.A. pelo suporte financeiro e técnico na realização deste trabalho.

7. DIREITOS AUTORAIS

Os autores são os únicos responsáveis pelo conteúdo do material impresso incluído no seu trabalho.



COMPROMETIDA COM A PROMOÇÃO DO DESENVOLVIMENTO DA ENGENHARIA E DAS CIÊNCIAS MECÂNICAS

VI CONGRESSO NACIONAL DE ENGENHARIA MECÂNICA
VI NATIONAL CONGRESS OF MECHANICAL ENGINEERING
18 a 21 de agosto de 2010 – Campina Grande – Paraíba - Brasil
August 18 – 21, 2010 – Campina Grande – Paraíba – Brazil

EVALUATION OF THE COATINGS AlCrN e AlCrTiSiN IN FACE MILLING OF THE COMPACTED GRAPHITE CAST IRON

Viana, Rhander, rhander@inpi.gov.br¹

Machado, Álisson Rocha, alissonm@mecanica.ufu.br¹

de Lima, Milton Sérgio Fernandes, msflima@gmail.com²

Pereira, Adriana Ana, adrianap@inpi.gov.br³

¹Universidade Federal de Uberlândia, Laboratório de Ensino e Pesquisa em Usinagem (LEPU-UFU), Av. João Naves de Ávila, 2160, CEP 38408-902, Uberlândia-MG, Brazil.

²Instituto de Estudos Avançados (IEAv-CTA), C.P. 6044, São José dos Campos-SP, Brazil.

³Universidade Federal de Santa Catarina, Departamento de Engenharia Mecânica, Campus Universitário, Trindade, EMC 88010-970, Florianópolis-SC, Brazil.

Abstract. *This work has as objective investigates the performance of the coatings AlCrN and AlCrTiSiN deposited by the process PVD in inserts of cemented carbide of the grade ISO K. The evaluation of the coatings AlCrN and AlCrTiSiN carried by tool life tests in the face milling of compacted graphite cast iron grade 450 and Rockwell indentation tests with load of 100 kgf with the aim of evaluating the adhesivity of the coatings on the substrate of cemented carbide and micro-scale abrasive tests aimed is to determine the wear coefficients of these coatings. The results of the tool life tests showed a better performance of the coating AlCrTiSiN in relation to AlCrN. The results of the Rockwell indentation tests showed a smaller delamination of AlCrTiSiN, and in the micro-scale abrasive tests a larger wear coefficient of the coating AlCrN.*

Keywords: *Coatings, Milling, Compacted Graphite Cast Iron, Indentation, Micro-scale abrasive.*