

MECANISMOS DE DESGASTE EM FERRAMENTAS DE AÇO-RÁPIDO NO ROSQUEAMENTO INTERNO EM ALTAS VELOCIDADES DE CORTE

Paulo Rosa da Mota

Centro Federal de Educação Tecnológica de Goiás, Rua 75, nº 46, Centro, 74055110, Goiânia/GO
prm@cefetgo.br

Alexandre Martins Reis

Universidade Federal de Viçosa, Campus Universitário UFV, 36570000, Viçosa/MG
alexandremartinsreis@gmail.com

Rafael Ariza Gonçalves

Universidade Federal de Uberlândia, Bloco 1M, Campus Santa Mônica, 38400089, Uberlândia/MG
ltm-ariza@mecanica.ufu.br

Márcio Bacci da Silva

Universidade Federal de Uberlândia, Bloco 1M, Campus Santa Mônica, 38400089, Uberlândia/MG
mbacci@mecanica.ufu.br

Resumo. *Este trabalho investiga as formas e mecanismos de desgaste desenvolvidos em ferramentas de aço-rápido na operação de rosqueamento interno a altíssimas velocidades de usinagem (HSM - High Speed Machining). É analisado o comportamento de ferramentas de aço-rápido obtidas pela metalurgia do pó e pelo processo de fundição convencional. Ambos os substratos são utilizados com dois tipos de revestimentos: a) nitreto de titânio (TiN); b) multicamadas de nitreto de titânio e nitreto de titânio e alumínio (TiN/TiAlN). As diferentes ferramentas são utilizadas na usinagem de roscas M6x1 em blocos de ferro fundido cinzento. Os critérios de fim de vida utilizados são: a) reprovação das roscas fabricadas após a verificação das tolerâncias geométricas das mesmas, por meio de um calibre passa-não-passa; b) falha catastrófica da ferramenta devido à ocorrência de avarias na ferramenta; c) fabricação de 1000 roscas pela mesma ferramenta. As ferramentas são avaliadas através de microscópio óptico e eletrônico de varredura utilizando técnica tradicional, elétrons retro-espalhados e análise EDS. Os resultados mostram que os principais mecanismos de desgaste são abrasão, adesão e deformação plástica. Índícios dos mecanismos de abrasão e adesão foram constatados em todas as ferramentas utilizadas neste trabalho. As ferramentas em fim de vida apresentaram deformações plásticas severas tanto na aresta de corte, como no contra-fio. As ferramentas revestidas com multicamadas de TiN/TiAlN apresentaram uma maior vida em número de furos rosqueados do que as ferramentas revestidas somente com TiN, independente do substrato da ferramenta, exceto quando utilizou-se fluido de corte (MQL).*

Palavras-chave: *rosqueamento interno, desgaste, aço-rápido, ferro fundido cinzento, HSM.*

1. INTRODUÇÃO

Desde o final do século XIX, os processos de fabricação têm passado por evoluções constantes que resultam no aumento da produtividade, proporcionando significativos impactos na economia dos países industrializados. A usinagem não poderia ser diferente. Entretanto, existem diversas operações que necessitam de investigações mais profundas, como o rosqueamento com machos de corte, em altas velocidades.

A usinagem de roscas internas com machos de corte é uma operação complexa, principalmente em alta velocidade de usinagem (HSM - *High Speed Machining*) devido aos problemas ocasionados pelas dificuldades de remoção do cavaco e de lubrificação adequadas das arestas de corte do macho,

além da falta de sincronismo entre os avanços de corte e as velocidades de corte, principalmente em máquinas convencionais e máquinas de produção, do tipo “*transfer*”.

Os desgastes e avarias dos machos de corte provocados durante a operação de rosqueamento surgem com maior frequência nas arestas da região cônica do macho, pois é esta a primeira porção do macho a realizar as ações de corte⁽¹⁾.

Dessa forma, as indústrias de ferramentas de corte investem em pesquisas, buscando melhores substratos, bem como melhores revestimentos para fabricação de ferramentas a serem empregadas em máquinas que possuam um bom sincronismo entre as velocidades de avanço e de corte. Atualmente algumas máquinas com CNC permitem a usinagem de roscas em altas velocidades de corte, utilizando cabeçotes fixos, permitindo o sincronismo de velocidades e avanços, gerando perfis de roscas variados.

Na usinagem, o atrito da ferramenta com a peça e os cavacos, e a energia gasta para deformar o material, geram grandes quantidades de calor, que é dissipado para a peça, cavacos e ferramenta de corte. Uma solução para proteger a ferramenta de corte das altas temperaturas geradas na usinagem, é revestir a mesma com materiais mais duros e que possuam baixos coeficientes de atrito e baixa condutividade térmica, evitando o contato direto entre o substrato e o material da peça durante a usinagem, reduzindo o atrito na interface cavaco-ferramenta e até oferecendo a possibilidade de eliminar ou reduzir o emprego de fluido de corte⁽²⁾.

Além disso, os revestimentos aumentam a dureza na superfície das ferramentas, reduzindo o desgaste por abrasão, e proporcionando pequena adesão aos cavacos que se soltam do material que está sendo usinado. Isto, por sua vez, leva à redução da abrasão por adesão (“*attrition*”⁽³⁾), coeficiente de atrito minimizado e menores forças de corte.

O TiN (nitreto de titânio) foi o precursor dos revestimentos duros, mas vem sendo substituído por outros revestimentos, como o TiAlN (nitreto de titânio alumínio). A principal vantagem desse revestimento é a sua característica de formar um filme protetor de Al_2O_3 , extremamente denso e com alta adesão em sua superfície, durante a usinagem, o que garante uma maior resistência à difusão do material do revestimento para a peça^(4,5,6). Esta proteção é ainda mais efetiva quando a usinagem é feita em altas velocidades de corte, às quais geram altas temperaturas na interface cavaco/ferramenta. Também pode-se destacar a baixa condutividade térmica desse revestimento nos processos de usinagem, assegurando que a maior parte do calor seja dissipado pelo cavaco, permitindo velocidades de corte maiores, já que a carga térmica no substrato é menor.

Com o objetivo de aumentar o conhecimento sobre as formas e mecanismos de desgaste desenvolvidos em machos de usinagem durante o rosqueamento interno em altíssimas velocidades de corte (HSM – High Speed Machining), analisou-se neste trabalho o comportamento de ferramentas de aço-rápido com diferentes revestimentos.

2. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

Todos os testes foram realizados, em um Centro de Usinagem Vertical CNC ROMI da linha Discovery modelo 760 com comando numérico Siemens 810 (Figura 1), cujas características estão descritas na Tabela 1. O programa utilizado para o ciclo de rosqueamento foi o Ciclo 84, próprio para rosqueamento com macho rígido (utilizando cabeçote fixo).



Figura 1. Centro de Usinagem vertical, modelo Discovery 760 (ROMI)

Tabela 1. Características do Centro de Usinagem Discovery 760

Especificações técnicas	Valores	Especificações técnicas	Valores
Faixa de velocidades	10 a 10.000 rpm	Potência total instalada	15 kVA
Avanço rápido (eixos x / y)	25.000mm/min	Curso long. da mesa (x)	762 mm
Avanço rápido (eixos z)	20.000 mm/min	Curso trans. da mesa (y)	406 mm
Avanço de corte	1 a 5.000 mm/min	Curso vert. do cabeçote	508 mm
Pot. do motor principal CA	9 kW/12,5 CV	Comando	Siemens 810

Todas as ferramentas testadas neste trabalho são machos de corte para rosca métrica M6, cujas principais características geométricas são apresentadas na Tabela 2. Os materiais dos substratos das ferramentas ensaiadas foram: 1) HSS-E: aço-rápido AISI-M3 com 3% de Vanádio, conhecido como aço super-rápido, com dureza de aproximadamente 879 Hv (66,4 HRC), fabricado pelo método de fundição convencional; 2) HSS: aço-rápido AISI-M7, fabricado pelo método convencional, que possui uma dureza de 871 Hv (aproximadamente 66,2 HRC); 3) HSS PM: aço-rápido AISI-M7, fabricado pelo processo de metalurgia do pó, cuja dureza medida é 920 Hv (aproximadamente 67,5 HRC); Nos ensaios foram empregadas duas condições de revestimento, TiN e multicamadas (TiN/TiAlN). A velocidade de corte empregada nos testes foi de 75 m/min.

Tabela 2. Características geométricas dos machos utilizados nos ensaios

Machos máquina ISO 529 M6x1 6H (Canal reto)			
Características	Dimensões	Características	Dimensões
Nº de canais	3 canais	Nº de filetes no chanfro	2 filetes
Ângulo de entrada	20°	Ângulo de saída ou de corte	De 12° a 14°
D(Diâmetro externo)	6mm (M6)	Passo	1 mm
D2 (Diâmetro efetivo)	5,350 mm	D1 (Diâmetro interno)	4,917mm
H1(altura do filete)	0,541 mm	Ângulo da rosca	60°

A Figura 2 mostra dois machos de corte M6X1, revestidos com multicamadas (TiN/TiAlN) (a) e TiN (b), coberturas muito utilizadas na indústria, e que foram testadas neste trabalho. Os machos utilizados possuem uma geometria específica (fora de catálogo).

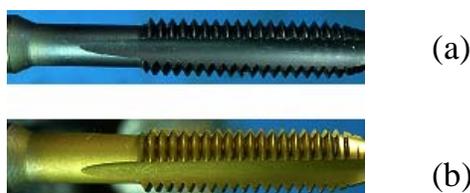


Figura 2. Revestimentos testados: a) TiN/TiAlN e b) TiN

A Tabela 3 apresenta um resumo dos testes realizados. Em todas as situações foi utilizado o cabeçote fixo como forma de fixação dos machos de corte.

Tabela 3. Condições de corte

Ensaio	Velocidade de corte	Substrato	Revestimento
01	75 m/min	PM	TiN/TiAlN
02	75 m/min	HSS-E	TiN/TiAlN
03	75 m/min	PM	TiN
04	75 m/min	HSS-E	TiN
05	75 m/min	HSS-E*	TiN
06	75 m/min	HSS	TiN

* Utilizou-se nesta condição MQL (Mínima Quantidade de Lubrificante)

Os ensaios foram realizados no ferro fundido cinzento GH 190 (equivalente ao FC 200/250 da norma AISI), utilizado na fabricação de blocos de motores automotivos. Esse material possui dureza de aproximadamente 207 HB e sua matriz é perlítica lamelar, conforme pode ser observado na Figura 3.

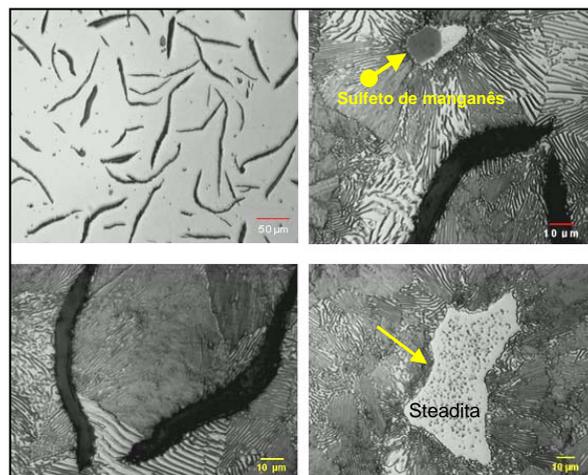


Figura 3. Micrografias do ferro fundido cinzento GH-190; inclusões de sulfeto de manganês e ferrita rica em fósforo, com precipitados de Fe_3P (steadita)

A Figura 4 apresenta as placas rosqueadas. Cada placa foi fresada (fresamento frontal) na superfície superior e inferior, com o objetivo de aplainar a região a ser rosqueada, garantindo a planicidade e o paralelismo, bem como retirar impurezas superficiais, comuns nas ligas fundidas em areia. Determinou-se que as roscas seriam feitas em furos cegos, pois a maioria das roscas do bloco de motor é fabricada neste tipo de furo. É também durante a fabricação de roscas em furos cegos que são geradas as condições mais severas de rosqueamento, em termos de calor e torque produzidos, bem como dificuldade de saída do cavaco.

A espessura das barras final foi de aproximadamente 50 mm, o que proporcionou a usinagem de roscas nos dois lados da peça. Os pré-furos tinham 16,5 mm de profundidade, dos quais as roscas feitas atingiam 11,5 mm de comprimento.

Os critérios de fim de vida utilizados foram: a) reprovação das roscas fabricadas após a verificação das tolerâncias geométricas das mesmas, por meio de um calibre passa-não-passa a cada 20 roscas feitas; b) falha catastrófica da ferramenta devido à ocorrência de avarias na ferramenta; c) fabricação de 1000 roscas pela mesma ferramenta. A Figura 4 (a), (b) e (c) mostra o corpo de prova sendo furado, rosqueado e “calibrado” (conferência das medidas finais da rosca com um calibre), respectivamente.

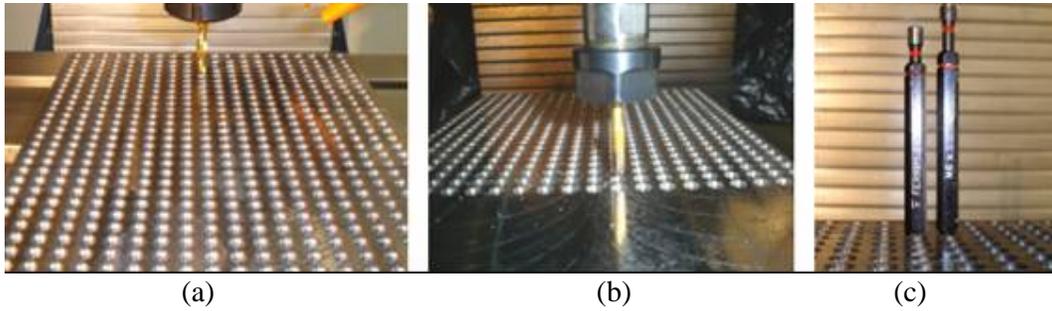


Figura 4. Corpo de prova utilizado nos testes; (a) Furação; (b) Rosqueamento; (c) Calibre passa-não passa para furação e rosqueamento

O critério de medição de desgaste adotado foi o mesmo desenvolvido e aplicado por Reis⁽⁷⁾. Estudos das formas e mecanismos de desgastes presentes nas ferramentas ensaiadas foram feitos por meio de análises em MEV (Microscópio Eletrônico de Varredura) e em microscópio óptico. Para auxiliar a medição direta do desgaste em microscópio ferramenteiro foi utilizado um dispositivo desenvolvido no laboratório para fixar o macho na mesma posição e poder girá-lo até 360°, garantindo assim a visualização da principais superfícies da ferramenta.

3. RESULTADOS

3.1. Número de Roscas Fabricadas

O gráfico da Figura 5 apresenta os resultados obtidos em número de roscas feitas para cada condição de teste empregada neste trabalho. Neste gráfico observa-se que a única condição de corte em que se conseguiu atingir o limite de 1000 roscas fabricadas, foi quando se utilizou uma ferramenta de HSS-E revestida com TiN, utilizando Mínima Quantidade de Lubrificante (MQL). Nas demais condições os testes foram encerrados antes de se chegar a 1000 roscas, pois a qualidade geométrica das mesmas foi reprovada pela análise com o calibre passa-não-passa, exceto para a ferramenta HSS-E TiN/TiAlN que sofreu falha catastrófica. Esses resultados comprovam a eficácia da técnica de MQL em relação a usinagem a seco, também para o processo de rosqueamento interno com macho de corte em HSM.

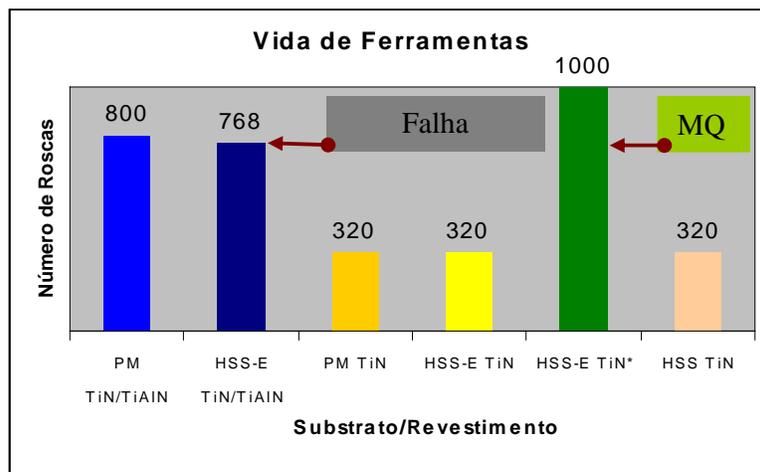


Figura 5. Vida das ferramentas em número de roscas fabricadas para as diferentes condições de teste deste trabalho

É importante ressaltar que, devido às dificuldades inerentes à realização de cada teste, não houve repetições para todas as ferramentas de corte, o que seria recomendado para dar maior confiabilidade aos resultados. Não foi feito nenhum teste utilizando MQL para as ferramentas revestidas com multicamadas de TiN/TiAlN, pois essas ferramentas tiveram um desempenho muito superior às ferramentas revestidas somente com TiN, na condição a seco, quando testadas preliminarmente.

Observa-se que a vida das ferramentas variou de acordo com o tipo de revestimento, de forma que as ferramentas revestidas com multicamadas de TiN/TiAlN atingiram um número superior de roscas fabricadas, quando comparadas com os machos revestidos somente com TiN. Já o tipo de substrato não teve tanta influência na vida das ferramentas, uma vez que desgastes severos ocorreram logo após o destacamento dos revestimentos para todas as ferramentas testadas.

A Figura 6 apresenta o gráfico do comprimento do desgaste medido na superfície de folga de uma determinada região do terceiro filete de cada ferramenta testada, em função do número de roscas fabricadas, exceto para a ferramenta que usinou com MQL. Verifica-se que após usinar 320 roscas as ferramentas revestidas somente com TiN, na condição a seco, sofreram desgastes semelhantes, atingindo toda a extensão da superfície de folga da região analisada do terceiro filete (2,5 mm). Já nas ferramentas revestidas com multicamadas de TiN/TiAlN, o desgaste não ultrapassou 1,5 mm na superfície de folga da região analisada, após usinar 700 roscas.

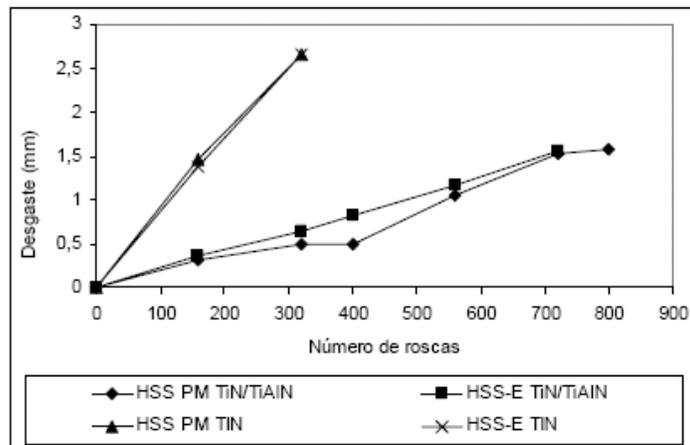


Figura 6. Desgaste de flanco no terceiro filete versus o número de roscas para condições testadas

Esses resultados podem estar relacionados com o efeito da temperatura na interface cavaco-ferramenta. O alumínio presente na cobertura multicamada TiN/TiAlN, reage com a atmosfera na região de corte, formando uma camada externa de óxido (Al_2O_3) que é altamente dura, protegendo as outras camadas de revestimentos e conseqüentemente blindando o substrato dos machos de corte^(5, 6, 8, 9). Essa reação química acontece em altas temperaturas, comprovando a melhor atuação das ferramentas revestidas com o revestimento TiN/TiAlN em alta velocidade de corte.

Essas camadas de óxidos também podem exercer a função de lubrificante sólido e isolante térmico na interface e agir como um obstáculo à condução do calor para o interior da ferramenta durante o corte^(6, 8), mantendo a integridade desta, o que pode favorecer o aumento em sua vida útil e conseqüentemente aumentar o número de peças fabricadas.

Na Figura 7 são apresentadas fotomicrografias feitas no MEV, onde se observa a presença de partículas, aderidas sobre as superfícies da ferramenta, sugerindo que o mecanismo de desgaste por adesão (*attrition*) pode ter contribuído para a deterioração da ferramenta (macho HSS – PM).

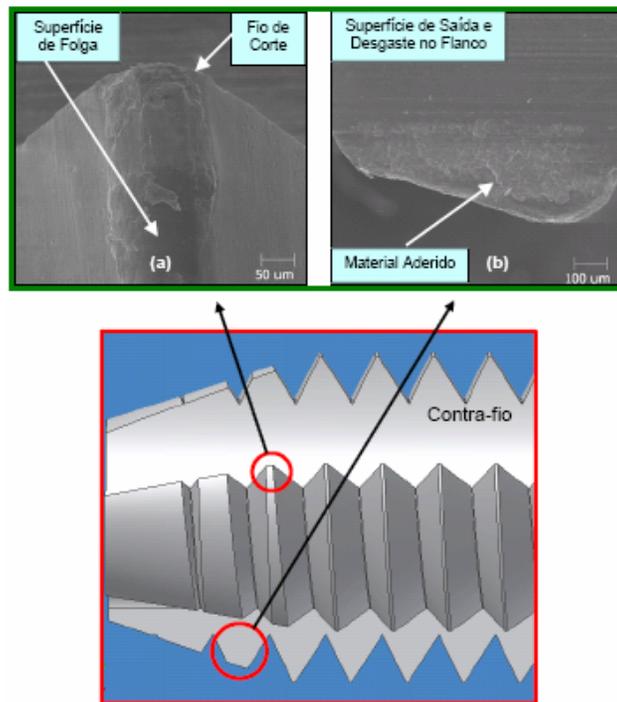


Figura 7. Fotomicrografias (MEV) de um macho PM revestido com TiN, apresentando detalhes do desgaste: a) na superfície de folga; b) na superfície de saída.

As análises no MEV das superfícies das ferramentas ensaiadas mostraram também riscos característicos dos processos abrasivos. O fluxo de cavacos sobre as superfícies de saída dos machos pode transportar elementos duros (fragmentos de desgaste) do material da peça, e também pequenos grãos ou partículas arrancadas da própria ferramenta, por adesão, como, por exemplo, partes do revestimento (nitreto de titânio – dureza de 2500 Hv), os quais, arrastados juntos com os cavacos, promovem o mecanismo de desgaste, por abrasão^(3, 10).

As ferramentas em fim de vida apresentaram deformações plásticas severas tanto na aresta de corte, como no contra-fio das ferramentas, como mostra a figura 8. Esta deformação plástica é na verdade uma consequência da evolução dos processos de abrasão e adesão, e das altas temperaturas desenvolvidas na usinagem em HSM.

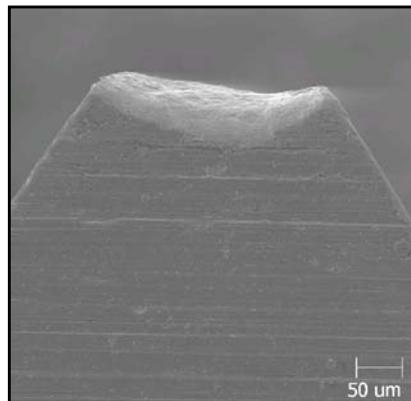


Figura 8. Deformação no contra-fio de uma ferramenta HSS-E revestida com TiN após usinar 320 roscas com velocidade de corte de 75 m/min

3.2. Microanálise por Energia Dispersiva (EDS) nas Ferramentas Revestidas com TiN

O objetivo das análises de EDS foi investigar a presença de elementos químicos sobre as superfícies das ferramentas, com a finalidade de identificar os principais mecanismos de desgaste desenvolvidos durante o rosqueamento interno em HSM do ferro fundido cinzento GH 190. Foram escolhidas algumas regiões críticas na superfície de saída de um macho HSS-E revestido com TiN, após usinar 320 roscas.

Para compreender melhor os mecanismos de desgaste que atuaram na superfície desta ferramenta, foi feito um espectro da análise química por meio de uma micro-sonda EDS (Espectroscopia por Energia Dispersiva), onde foram feitas três análises (sobre a linha horizontal e os pontos 1 e 2), de acordo com a Figura 9.

Na região com desgaste traçou-se uma linha horizontal e fez-se EDS em toda sua extensão. Os resultados apresentaram uma grande quantidade de ferro (Fe), possivelmente do substrato após o destacamento do revestimento e também do ferro fundido (fofo), caracterizando adesão. Também é possível notar a presença dos elementos químicos: silício (Si), fósforo (P) e titânio (Ti), em menores quantidades. O titânio aparece com maior ênfase nas extremidades da linha, comprovando a presença do revestimento (TiN) nas bordas da ferramenta. A presença de fósforo e silício, provavelmente se deve a adesão de ferro fundido ao substrato do macho de corte.

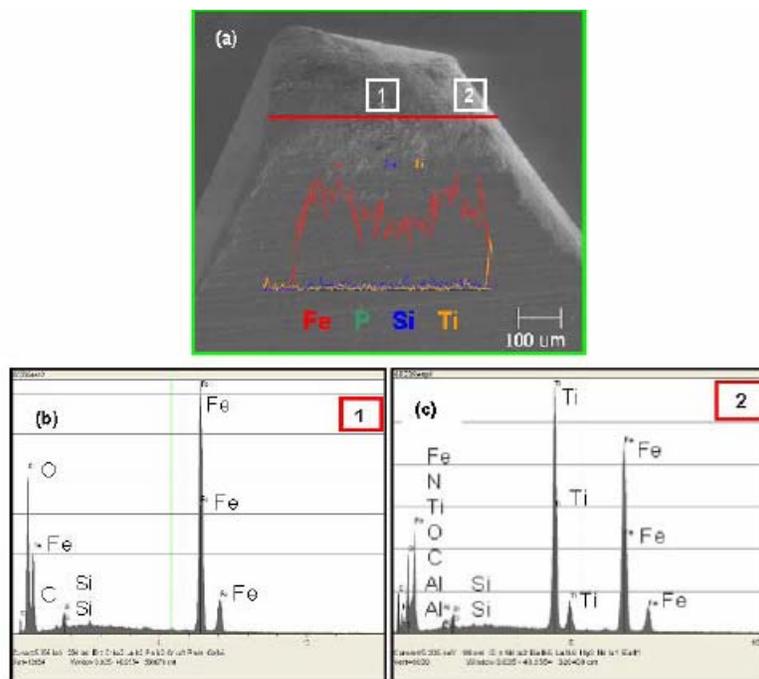


Figura 9. Análise de EDS: (a) fotomicrografia (MEV) apresentando as regiões analisadas e os principais elementos presentes na região analisada; (b) espectro da região 1; (c) espectro da região 2

Para esclarecer melhor a presença desses elementos químicos na região estudada, foram feitos alguns espectros em regiões distintas, denotadas na Figura 9 como pontos 1 e 2. Na região 1, conforme era esperado, constatou-se a presença de ferro, carbono e silício. Já na região 2, percebe-se a presença dos mesmos elementos químicos da região 1, acrescidos de titânio (Ti), nitrogênio (N), oxigênio (O) e pequenas quantidades de alumínio (Al). Como esta região compreende o substrato desgastado e uma parcela da superfície de folga do macho, a qual ainda está revestida com TiN, acredita-se que o titânio e o nitrogênio são oriundos da camada de revestimento. A presença do oxigênio pode estar relacionada à formação de algum tipo de óxido, uma vez que as temperaturas de usinagem foram altas, devido às condições de corte utilizadas neste trabalho.

4. CONCLUSÕES

Os resultados obtidos nesta pesquisa comprovam que é possível usinar com HSM, utilizando máquina CNC que possui ciclo fixo de rosqueamento, e que os revestimentos têm uma importância fundamental no desempenho das ferramentas (machos de corte), principalmente na condição a seco e com altas velocidades de corte, onde o desgaste prematuro normalmente acontece. Além disso, pode-se destacar neste trabalho que:

- As ferramentas revestidas com multicamadas de TiN/TiAlN apresentaram uma maior vida em número de furos rosqueados do que as ferramentas revestidas somente com TiN, independente do substrato, exceto quando utilizou-se MQL;
- Indícios dos mecanismos de abrasão e adesão foram constatados em todas as ferramentas utilizadas neste trabalho. A deformação plástica foi o principal processo responsável pela destruição (fim de vida) das ferramentas de corte.
- O uso de mandril fixo para o rosqueamento é perfeitamente aplicável no rosqueamento, desde que a máquina-ferramenta possua sincronismo de velocidade de corte e avanço.

5. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem o apoio financeiro do CNPq, CAPES e FAPEMIG, sem os quais não seria possível a realização deste trabalho, ao IFM – Instituto Fábrica do Milênio e as empresas Fiat Automóveis S/A e OSG Ferramentas de Precisão Ltda pelo constante apoio às pesquisas realizadas no LEPU.

6. REFERÊNCIAS

1. BEZERRA, A. A.; COELHO, R.T.; DA SILVA, L.R.; BRAGHINI JR, A.; SOTO, M. Investigação do Processo de Rosqueamento com Alta Velocidade de Corte em Ferro Fundido. In: XVI CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA MECÂNICA, 2001, Uberlândia. Proceedings of COBEM. Manufacturing Process. v. 14., 2001. p. 66-75.
2. NOUARI, M., GINTING, A. Wear characteristics and performance of multi-layer CVD-coated alloyed carbide tool in dry and milling of titanium alloy. **Surface & Coatings Technology**. v. 200, n. 18-19, p. 5663-5676, mai. 2006.
3. TRENT, E.M.; WRIGHT, P.K. **Metal Cutting**. 4th Edition, Butterworths – Heinemann. 2000, 446 p.
4. YUHARA, D. A. Aplicação de revestimento PVD em ferramentas de corte. Disponível em: <<http://www.brasimet.com.br/>>. Acesso em: 20 mai. 2005.
5. HARRIS, S. G.; DOYLE, E. D.; VLASVELD, A. C.; AUDY, J.; QUICK, D. A study of the wear mechanisms of Ti_{1-x}Al_xN and Ti_{1-x-y}Al_xCryN coated high-speed steel twist drills under dry machining conditions. **Wear**. v. 254, n. 7-8, p. 723-734, abr. 2003.
6. PALDEY, S.; DEEVI, S.C. Single layer and multilayer wear resistant coatings of (Ti,Al)N: a review. **Materials Science and Engineering**. v. 342, n. 1-2, p. 58-79, fev. 2003.
7. REIS, A. M. **Avaliação de Desempenho de Diferentes Materiais de Ferramenta no Processo de Rosqueamento Interno de Ferro Fundido Cinzento, através do Monitoramento do Desgaste**. 2004. 192 f. Tese de Doutorado – Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2004.
8. VIANA, R. **Desempenho de brocas de HSS revestidas na furação de ligas da Al-Si**. 2004. 141 f. Dissertação de Mestrado - Universidade Federal de Uberlândia, 2004.
9. REITER, A. E., BRUNNER, B., ANTE, M., RECHBERGER, J. Investigation of several PVD coatings for blind hole tapping in austenitic stainless steel. **Surface & Coatings Technology**. v. 200, n. 18-19, p. 5532-5541, mai. 2006.

10. MACHADO, A. R.; DA SILVA, M. B. **Apostila de Usinagem dos Metais**. 8. ed. Universidade Federal de Uberlândia. 2004. 257p.

Wear Mechanism of HSS Tools in Tapping Operation at High Cutting Speed

Abstract. *The main goal of this work is the evaluation of the wear mechanism of high-speed steel taps when machining grey cast iron at high cutting speeds. It is investigated three types of high speed steel: ordinary (HSS), with addition of vanadium (HSS-E) and obtained by the powder metallurgy (HSS-PM). This three tool materials are used in two coated situation: with TiN and the multilayer TiN-TiAlN. The tests were carried out in a machining centre at cutting speed of 75 m/min. Analysis in the scanning electron microscope and optical microscope were done to determine the type and wear mechanisms. Three basic types of wear were found: land wear, tearing and plastic deformation of the back land. The type of wear is highly affect by the system of fixation of the tap in the machine tool.*

Keywords: *Tapping, wear, grey cast iron.*