

# FORÇAS EM SISTEMAS TRIBOLÓGICOS MONITORADOS EM CONDIÇÕES REAIS DE PROCESSO

Renato Françaço de Ávila<sup>(1)</sup>  
Odilon Carneiro Mendes<sup>(1)</sup>  
Alexandre Mendes Abrão<sup>(1)</sup>  
Miguel Ângelo Lanna<sup>(2)</sup>

## Resumo

O conhecimento acerca do desempenho de materiais conjugados para aplicação em processos de fabricação através de técnicas de monitoramentos como desgaste, vibração e forças de usinagem são muito importantes para o melhoramento de tais materiais, quer seja visado o controle de variáveis de processamento de revestimentos ou o desempenho dos mesmos quando submetidos a solicitações mecânicas e térmicas típicas de determinados processos. A utilização de revestimentos em monocamadas e multicamadas processados por PAPVD (*Plasma-assisted physical vapour deposition*) vem tornando as classes de substratos WC-Co cada vez mais versáteis e competitivos. Neste trabalho são apresentados resultados de monitoramento de forças de usinagem em dois sistemas constituídos pelos seguintes pares tribológicos: (WC-Co/Ti-C-N)/aço ABNT 8620 e (WC-Co/Ti-C-N)/alumínio 6262-T6. As forças foram monitoradas no torneamento contínuo de ambos os materiais peça (aço ABNT 8620 e Alumínio 6262-T6) em condições reais de usinagem (diferentes combinações de parâmetros de processo). Para tanto foram utilizados um torno CNC Romi (3500rpm e 5,5kW), um dinamômetro piezoelétrico Kistler (modelo 9257BA) e programa computacional específico para aquisição de dados. Os resultados de força de usinagem monitorados foram agrupados de forma comparativa e quantitativa. Dois sistemas tribológicos constituídos pelos pares WC-Co/aço ABNT 8620 e WC-Co/alumínio 6262-T6 foram considerados como referência para análise dos resultados. De um modo geral os menores valores de força foram verificados para o conjugado (WC-Co/Ti-C-N) em ambos os pares tribológicos e condições de teste.

**Palavras-chave:** Monitoramento de forças; Conjugados; Sistemas tribológicos.

## INTRODUÇÃO

Um dos mais antigos quesitos da indústria de um modo geral consiste em uma crescente necessidade de reduzir e controlar o atrito (forças de processo) e conseqüentemente o desgaste de diferentes sistemas componentes mecânicos (Holmenberg & Matthews, 1994). Tal necessidade vem sendo motivada por várias razões, tais como: i) aumentar a vida útil de ferramentas (ii) fazer com que ferramentas e equipamentos funcionem de forma mais eficiente, (iii) conservar diversas fontes de materiais que já estão se tornando escassas, (iv) economizar energia e (v) melhorar a segurança. Historicamente, tais objetivos vêm sendo alcançados através da criação de novos materiais e seleção adequada dos mesmos. Recentemente, uma nova abordagem tem sido amplamente adotada por tribologistas no controle da fricção e desgaste de materiais – o uso de tratamento superficial e deposição de recobrimentos. Esta abordagem originou uma área interdisciplinar denominada *Engenharia de Superfície*. O crescimento da área de Engenharia de Superfície, por sua vez, tem sido impulsionado por dois fatores: (i) desenvolvimento de novos recobrimentos e métodos de deposição, o que possibilita a produção de recobrimentos com características e propriedades que eram anteriormente inatingíveis e (ii) o reconhecimento, por parte de engenheiros de materiais, que a superfície é a parte mais importante do projeto de qualquer componente/ferramenta. A maior parte das falhas observadas em componentes mecânicos geralmente se originam na superfície, provocadas tanto por atrito, desgaste, fadiga ou corrosão.

Recobrimentos cerâmicos e finos de nitretos ou carbonetos de metais de transição tem sido alvo de exaustivas investigações para aplicações em ferramentas de aço (HSS) e mais recentemente ferramentas de metal duro (Avila, 2003, Prengel et al, 1997; Jindal et al 1999). Todavia, no que tange à avaliação quantitativa da propriedade autolubrificante de tais revestimentos submetidas a condições reais de processos limitadas informações são encontradas em literatura. Até então o coeficiente de atrito, forte indicador da capacidade autolubrificante de um revestimento, é avaliada através de testes específicos de laboratório (teste de risco), onde simultaneamente às forças coesivas e adesivas são monitoradas por emissão acústica as forças de atrito. Embora seja um ponto de partida para a quantificação desta propriedade, a aquisição de tais equipamentos envolve altos custos, além de ficarem limitados a pares tribológicos específicos. Ressalta-se ainda, o fato de que as condições de atrito (solicitações mecânicas e térmicas) ficarem bem longe das reais de um processo como, por exemplo, na região de trabalho de uma ferramenta no processo de torneamento, onde camadas autolubrificantes (grafite e óxidos) podem se formar por mecanismos termicamente ativados.

Desta forma há de se pensar na possibilidade de que revestimentos específicos possam ser utilizados como forma alternativa para os atuais quesitos de produtividade, competitividade e qualidade além de mínima intrusão ao meio ambiente. As constatações quantitativas, obtidas através de condições reais e específicas, de revestimentos com propriedades autolubrificantes (baixo atrito) podem ser relacionados de forma direta com as investigações atuais em processos de usinagem onde é abordada a possibilidade de redução do coeficiente de atrito na interface revestimento/peça resultando em fácil remoção do cavaco da região de corte. Este fato é considerado um dos grandes problemas em usinagem de alta velocidade (HSM) e também a eliminação total e/ou parcial de fluidos de corte, ainda que durante o tempo de existência do revestimento. Deve ser salientados que a

utilização de fluidos de corte, de forma geral, além de ser ecologicamente inviável (nocivos à saúde do operador e ao meio ambiente) apresentam altos custos com reciclagem, dentre outras desvantagens. Esta possibilidade abrange também o ideal de uma modificação na rota tradicional para alguns processos de usinagem, ou seja: possibilidade de obtenção de faixas de tolerâncias e acabamento superficial sem a necessidade da realização do acabamento final pelo processo de retificação, considerado de alto custo (Silva et al, 1998).

É neste contexto que se insere o objetivo deste trabalho. Ou seja, investigar a capacidade “autolubrificante” deste revestimento quando submetido em condições reais de processo, ou seja: parâmetros de corte, através do monitoramento de forças de usinagem em diferentes sistemas tribológicos. A constatação experimental quantitativa da autolubricidade de revestimentos, de um modo geral, sob condições reais de processo (solicitações mecânicas e térmicas) representa também um ponto de partida para investigações de sua aplicabilidade em sistemas mecânicos amplamente encontrados na indústria nos mais variados seguimentos de processamento podendo trazer a médio e longo prazo significativos benefícios econômicos.

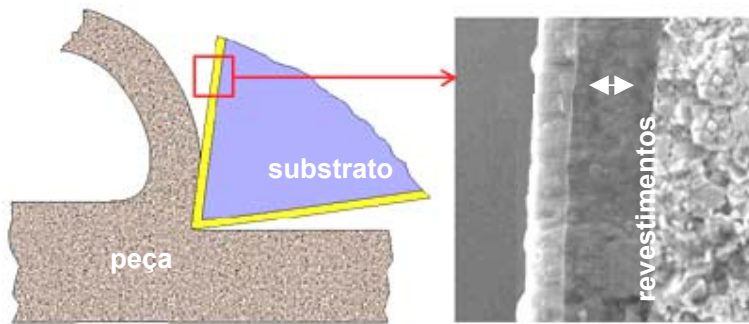
## **PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL**

### **Materiais e Equipamentos**

Ferramentas de metal duro (WC-Co 6%) de especificação ISO SNMA120408-H1P foram utilizadas como substrato. Optou-se por esta geometria levando-se em consideração a não interferência de geometrias específicas na superfície de saída (quebra-cavacos) e também a realização de replicas. O suporte para esta ferramenta é codificado pela ISO PSDNN2525-M12. e os principais ângulos do conjunto (ferramenta/suporte) são: ângulo de posição ( $\chi_r = 45^\circ$ ), ângulo de saída ( $\gamma_o = -6^\circ$ ) e ângulo de inclinação ( $\lambda_o = -5^\circ$ ).

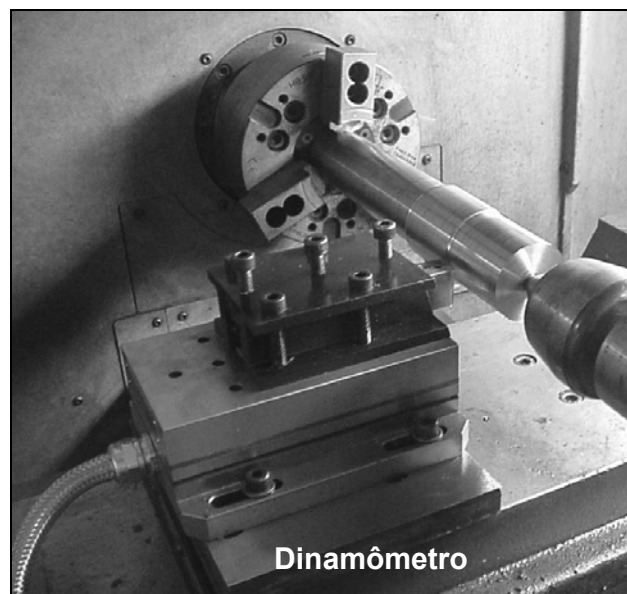
O revestimento de Ti-C-N foi produzido pela TECVAC (Inglaterra) que utilizou o processo PAPVD (*Plasma-assisted physical vapour deposition*) com a técnica de deposição por “*ion plating*” como fonte evaporativa do Ti. O revestimento foi produzido em um plasma de Ar + N<sub>2</sub> + C<sub>2</sub>H<sub>2</sub> na espessura de aproximadamente 3,0 µm. Este valor foi escolhido mediante literatura (Zimmerman, 1998, Batista, 2001) e encontra-se dentro de uma faixa de segurança (espessura < 5 µm), ou seja com menor possibilidade de ocorrência de falha adesiva provocado por altos valores de tensões residuais.

O aço ABNT 8620 e o alumínio 6262-T6 (solubilizado e envelhecido artificialmente) foram escolhidos como os materiais peças para constituírem os pares tribológicos em estudo, ou seja: (WC-Co/Ti-C-N)/aço ABNT 8620 e (WC-Co/Ti-C-N)/alumínio 6262-T6, conforme esquema ilustrativo apresentado na Figura 1, para análise comparativa dos resultados foi considerado para ambos os pares a usinagem com ferramenta sem revestimento (WC-Co) tomada como controle. Anteriormente à execução dos testes os corpos de provas foram produzidos nas dimensões de:  $\phi 76 \times 300$ mm através de operações de usinagem (desbaste, faceamento e furos de centro). Os materiais peças escolhidos atendem uma ampla faixa de aplicação na indústria automobilística e aeronáutica dentre outras.

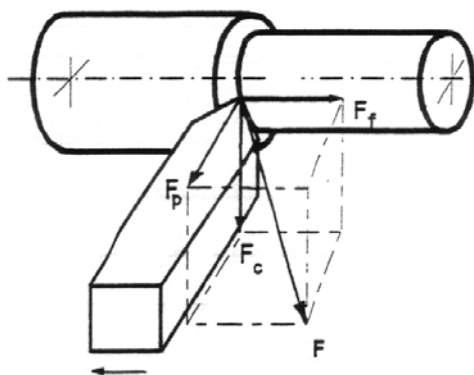


**Figura 1.** Esquema ilustrativo de pares tribológicos (peça – revestimento(s) e substrato) ([www.sandvik.com](http://www.sandvik.com))

Os testes de usinagem foram realizados em um torno ROMI modelo Centur 30S equipado com uma unidade CNC (Comando Numérico Computadorizado), com potência e rotação máxima de 6,5kW e 3500rpm respectivamente. As forças de usinagem foram medidas com um dinamômetro KISTLER modelo 9257BA utilizando um amplificador de carga modelo 5233A. O dinamômetro é utilizado como base para o porta-ferramentas, conforme apresentado na Figura 2, e permite a medição das forças em suas três componentes, ou seja: força de corte ( $F_c$ ), força de avanço ( $F_f$ ) e força passiva ( $F_p$ ), conforme esquema ilustrado na Figura 3. Para coleta e armazenamento dos dados foram utilizados uma placa de aquisição de dados modelo 2855A3 e o programa computacional Dynaware”.



**Figura 2.** Montagem do dinamômetro como base do porta-ferramentas.



- $F_c$  - força de corte;
- $F_f$  - força de avanço;
- $F_p$  - força passiva;
- $F_u$  - força de usinagem;

**Figura 3.** Componentes da força de usinagem no torneamento (Machado e Silva, 1999).

No processo de torneamento contínuo, conforme ilustrado na figura 3, a força de usinagem pode ser calculada pela equação (1) (Machado e Silva, 1999, Choundhurg et al, 2000);

$$\overline{F_u} = \overline{F_c} + \overline{F_f} + \overline{F_p} \quad (1)$$

Para cada medição e condição de teste utilizou-se uma nova aresta de corte. Evitou-se, assim a interferência do desgaste das ferramentas sobre as forças de usinagem. Os dados coletados foram analisados desconsiderando-se o regime transiente (início) da operação, durante o qual os valores das forças de usinagem oscilam muito. Cada teste durou cerca de dez segundos e foram coletadas informações com uma frequência de 700Hz, resultando assim em 7000 pontos de aquisição por ensaio. Através do programa obtiveram-se os valores médios das componentes de forças de usinagem.

As condições de usinagem foram estabelecidas mediante testes preliminares e são característicos de condições reais de processo para uma ampla faixa de aplicação. Desta forma a matriz de teste e réplicas executadas estão apresentadas na Tabela I. Todas as condições foram executadas para os pares tribológicos em estudo.

**Tabela 1.** Matriz de testes para os testes.

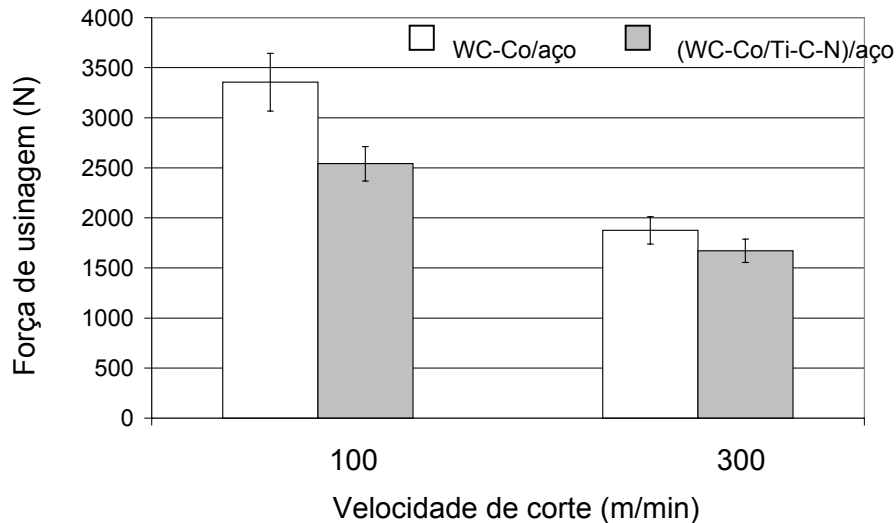
Velocidade de corte (m/min)	Avanço (mm/rev)	Profundidade de corte(mm)
100 - 300	0,24	1,00
200	0,12-0,36	

Deve ser salientado que para a coleta de dados foram executados três aquisições e considerados os valores médios das componentes de força ( $F_c$ ,  $F_f$  e  $F_p$ ) para o cálculo da força de usinagem ( $F_u$ ). A temperatura na superfície da peça também foi monitorada para cada aquisição e/ou condição testada através de termopares, ou seja: os testes subseqüentes foram executados após o resfriamento da peça a temperatura ambiente eliminando-se assim qualquer influência da temperatura nos valores de força monitorados. Não foi utilizado fluido de corte durante os testes.

## RESULTADOS E DISCUSSÃO

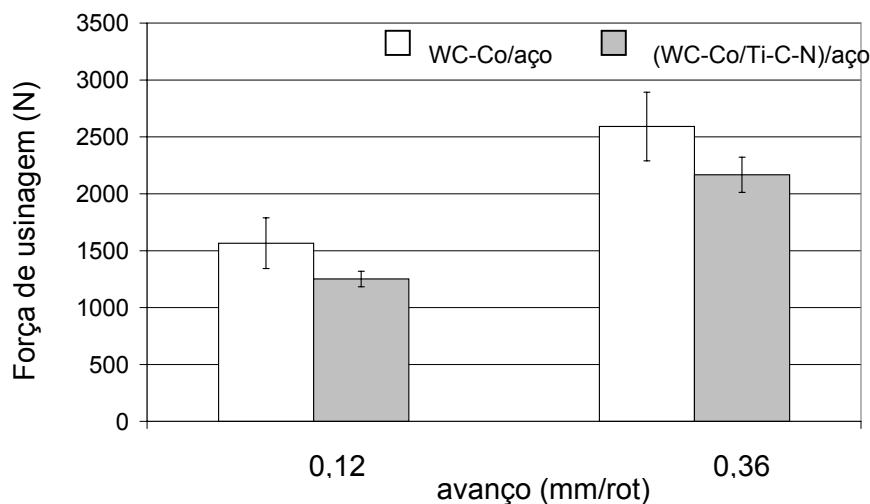
As Figuras 4 e 5 apresentam os valores médios de forças de usinagem para os

pares tribológicos: WC-Co/aço ABNT 8620 e (WC-Co/Ti-C-N)/aço ABNT 8620 agrupadas por velocidade de corte e avanço da ferramenta, respectivamente. De forma geral, observou-se menores valores de força de usinagem quando utilizados o revestimento de Ti-C-N sobre o substrato WC-Co, fato este observado na menor velocidade de corte. Para a maior velocidade de corte observou-se um empate técnico, considerando-se os respectivos desvios.



**Figura 4.** Forças de usinagem média em função da velocidade de corte ( $f = 0,24\text{mm/rot}$  e  $a_p = 1,0\text{mm}$ ).

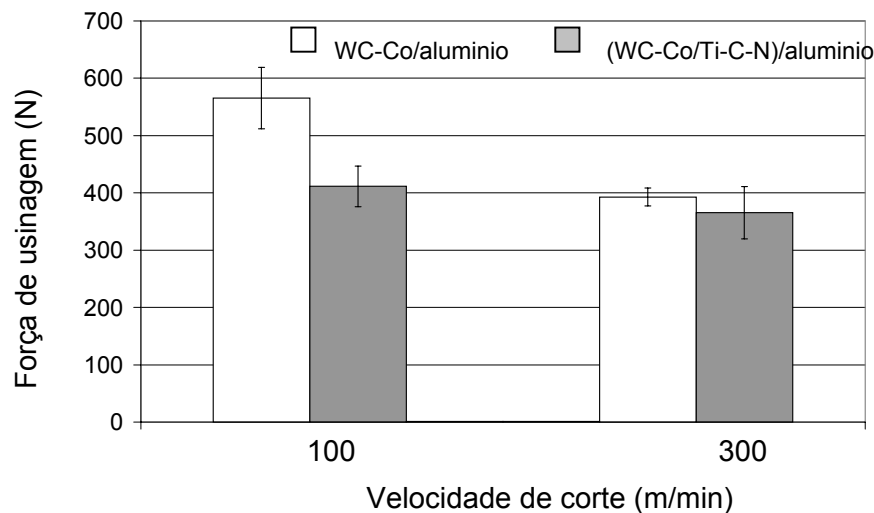
Van Stappen et al (1995) afirmam a possibilidade de migração de carbono da rede cristalina CFC, característica destes revestimentos ternários quando submetidos a altas temperaturas. Deve ser salientado que, embora não tenham sido monitoradas, as temperaturas típicas deste processo na interface peça/revestimento são da ordem de  $600^\circ\text{C}$  a  $1000^\circ\text{C}$  (Ezugwu, 1993, Hong et al, 1994). Valores de temperatura nesta faixa podem favorecer o processo de formação de camadas de carbono sobre o revestimento de Ti-C-N, e atuar como potenciais autolubrificantes na interface revestimento/peça.



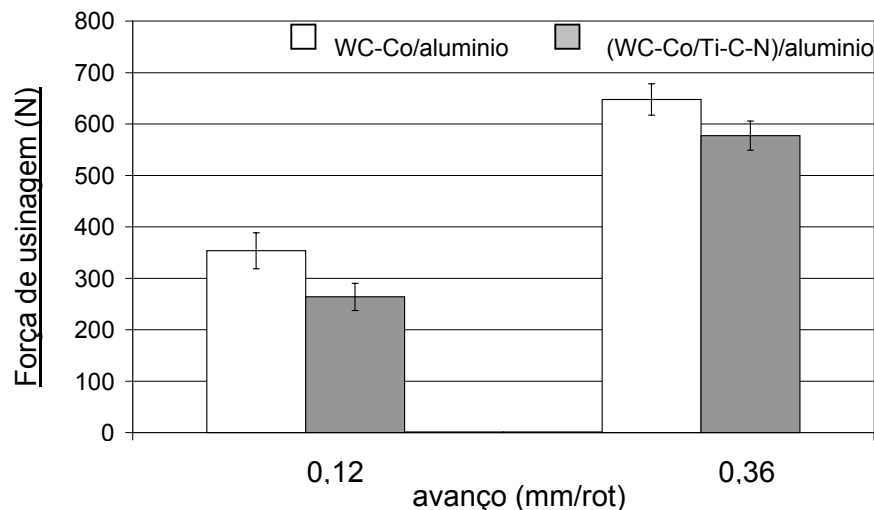
**Figura 5.** Forças de usinagem média em função do avanço. ( $v_c = 200\text{m/min}$  e  $a_p = 1,0\text{mm}$ ).

Considerando-se os avanços observa-se um acréscimo para as forças de usinagem monitoradas em ambos os pares tribológicos. Deve ser salientado que os parâmetros avanço e profundidade de corte dizem respeito a área real de contato, de forma que aumentando-se um destes, esta ocorrência era esperada. Observou-se, novamente, a contribuição do revestimento de Ti-C-N em ambos os avanços, mais acentuadamente para o menor avanço implicando em maior tempo de contato entre os materiais constituintes dos pares tribológicos na interface.

Quando realizado os testes com o alumínio 6262 T6 com os pares tribológicos em estudo, identificaram-se os mesmos efeitos até então observados anteriormente, conforme apresentados nas figuras 6 e 7. Particularmente para a maior velocidade de corte, considerando-se os respectivos desvios apresentou-se também a ocorrência de um empate técnico conforme observado no par tribológico anterior (figura 4) o que a princípio não era esperado, haja vista que para altas velocidades de corte estejam correlacionadas altas temperaturas (O'Sullivan et al, 2001, Gekonde, O. et al, 2002) o que favorece os mecanismos termicamente ativados para a migração de carbono para o topo do revestimento e a formação de uma camada "autolubrificante", responsável por menores esforços durante o corte.

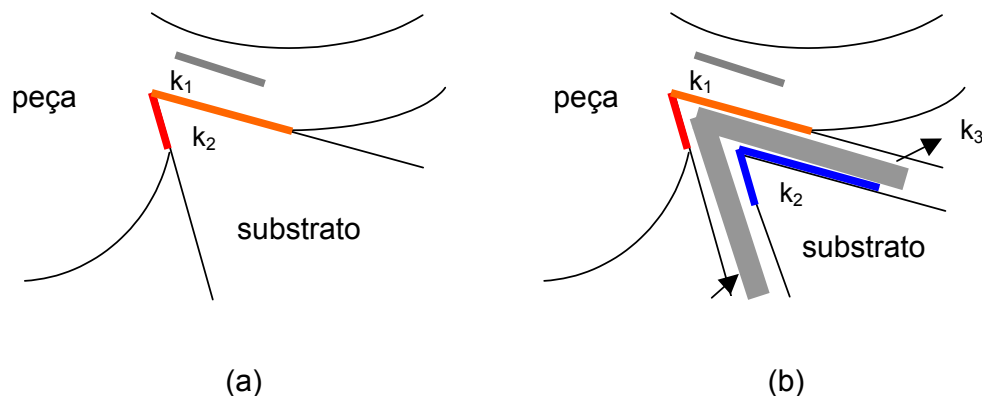


**Figura 6.** Forças de usinagem média em função da velocidade de corte ( $f = 0,24\text{mm/rot}$  e  $a_p = 1,0\text{mm}$ ).



**Figura 7.** Forças de usinagem média em função do avanço ( $v_c = 200\text{m/min}$  e  $a_p = 1,0\text{mm}$ ).

Particularmente, considerando-se a menor velocidade de corte, ou seja: 100m/min e o calor gerado durante o processo de corte por cisalhamento nas interfaces peça/substrato e peça/revestimento em ambos os materiais constituintes dos pares tribológicos em estudo, conforme ilustrado na figura 8, e ainda os valores de condutividade térmica dos materiais, ou seja: 5 W/mK, 22 W/mK, 43 W/mK e 85 W/mK (Van Vlack, 1988, Van Stappen, 1995, Sandvik, 2000) do aço, alumínio, revestimento (Ti-C-N) e substrato (WC-Co), respectivamente tem-se as seguintes ocorrências:



**Figura 8.** Esquema ilustrativo das interfaces (a) peça/substrato (b) peça/revestimento/substrato.

Primeira interface, aço ABNT 8620/WC-Co: condutividade térmica do aço muito menor do que o substrato (WC-Co) (aproximadamente 17 vezes). O mesmo ocorre para a interface de alumínio e substrato, porém com diferenças não tão acentuadas, ou seja, aproximadamente quatro vezes menor se comparado ao substrato. Este fato sugere que o calor retido na primeira interface é bem menor se comparada à segunda. Logo, a força de usinagem é maior na usinagem do aço se comparado a do alumínio, conforme pode ser observado nas Figuras 4 e 6.

Foi observado a mesma ocorrência quando considerado para as interfaces aço /Ti-C-N e alumínio /Ti-C-N. Contudo com diferenças de condutividade térmica menores e, conseqüentemente, diferenças na retenção de calor na interface não tão acentuadas.

## CONCLUSÕES

De forma geral observou-se menores valores médios de força de usinagem quando utilizados o revestimento de Ti-C-N sobre o substrato WC-Co em condições específicas de usinagem (parâmetros de corte) e pares tribológicos investigados: WC-Co/aço ABNT 8620 e (WC-Co/Ti-C-N)/aço ABNT 8620.

Os maiores valores de força de usinagem foram observados para as menores velocidades de corte, devido à geração de temperaturas diferentes nas interfaces peça/revestimento durante o corte por cisalhamento. Quanto à variação do avanço da ferramenta observou-se um aumento das forças de usinagem para os menores valores, provavelmente relacionado a um maior tempo de contato da ferramenta. Neste caso, foi constatado também menor valor quando utilizados o revestimento ternário Ti-C-N sugerindo a ocorrência de autolubrificação na zona de corte.



Considerando-se todos os pares tribológicos e condições de corte investigadas (Figura 8 e Tabela 1), e também o valor de condutividade térmica dos materiais envolvidos (fluxo e retenção de calor) é justificado os maiores valores médios de força de usinagem obtidos na usinagem do aço se comparado ao alumínio, fato este atribuído a menor possibilidade de retenção de calor gerado na zona de corte. Sendo a mesma observação válida quando considerado a interface dos materiais peça e o revestimento Ti-C-N. Deve ser considerado, entretanto, a necessidade de investigações mais criteriosas acerca da distribuição de calor nestas regiões, monitorados durante o processo por radiação infravermelha, termopar implantado, dentre outras técnicas, para a obtenção de resultados mais conclusivos acerca do referido assunto. Estes argumentos constituem objeto de investigação em andamento.

### **Agradecimentos**

Os autores agradecem ao CNPq (Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico) pelo suporte financeiro para o desenvolvimento do projeto.

### **REFERÊNCIAS**

- 1 Avila, R. F., 2003, "O desempenho de ferramentas de metal duro revestidas com Ti-N, Ti-C-N e Ti-Al-N (PAPVD) no torneamento do aço ABNT 4340 temperado e revenido", tese de doutorado apresentado ao Curso de Pós-Graduação em Engenharia Metalúrgica e de Minas da UFMG, em 29/04/03, 190 páginas.
- 2 Batista, J. C. A., 2001, "Promising duplex coatings for tribological applications at elevated temperatures", Doctorate thesis, UFMG, Brazil.
- 3 Choundhurg, S. K., Kishore, K. K., 2000, "Tool wear measurement in turning using forces ratio", International Journal of Machining Tool Manufacturing, v 40, pp. 899 – 909.
- 4 Ezugwu, E. O., 1993, "Evaluation of Cermet cutting tool materials when machining G-17 cast iron", Lubrication Engineering, pp. 49 – 55.
- 5 Gekonde H. , O. , Subramanian, S. V., 2002, "Tribology of tool-chip interface and tool wear mechanisms", Surface and Coatings Technology, v.149, pp.151 – 160.
- 6 Hong, H.T., Chou, T. L., 1994, "Modelling of tool/chip interface temperature distribution in metal cutting", International Journal Mechanical Science, v.36, pp. 931 – 943
- 7 Jindal, P. C., Santhanam, A.T., Scheleinkofer, U. & Shuster, A. F., 1999, "Performance of PVD TiN, TiCN and TiAlN coated cemented carbide tools in turning", International Journal of Refractory Metals & Hard Materials, v17, pp. 163 - 170.
- 8 Machado, A R. e Silva, M. B., 1999, "Usinagem dos Metais" UFU – Universidade Federal de Uberlândia, 172 páginas.
- 9 O'Sullivan, D. and Cotterell, M., 2001, "Temperature in single point turning", Journal of Materials Processing Technology, v. 118, pp. 301 – 308.
- 10 Prengel, H. G., Jindal, P. C., Wendt, K. H., Santhanam, A. T., Hegde, P. L. and Penich, R. M., 2001, "A new class of high performance PVD coatings for carbide cutting tools", Surface and Coatings Technology, v.139, pp. 25 - 34.
- 11 Sandvik Coromant, 2000, "Catalogo de ferramentas de torneamento", ([www.sandvik.com](http://www.sandvik.com))

- 12 Stappen V. M., Stals, L. M., Kerkhofs, M. and Quaeyhaegens, C., 1995, "State of the art for the industrial use of ceramic PVD coatings", *Surface and coatings Technology* v. 74 –75, pp. 629 - 633.
- 13 Silva, L. R., Ávila, R. F. e Abrão, A. M., 1998, "Torneamento e retificação do aço ABNT 4340 temperado", V Congresso de Engenharia Mecânica Norte-Nordeste, p. 423 – 428.
- 14 Van Vlack, L. H., 1988, *Princípios de Ciências e Tecnologia dos Materiais*, 2ª edição, Editora Campus, 566 paginas.
- 15 Zimmermann, H, 1998, "PVD coated cutting tools for modern machining applications", Doctorate thesis, Verlag Main Aachen, Germany.

# CUTTING FORCES ON TRIBOLOGICAL SYSTEMS MONITORED WHEN MACHINING METALS

Renato Françoso de vila<sup>(1)</sup>  
Odilon Carneiro Mendes<sup>(1)</sup>  
Alexandre Mendes Abro<sup>(1)</sup>  
Miguel ngelo Lanna<sup>(2)</sup>

## Abstract

The knowledge over the performance of conjugate materials applied in machining processes obtained from monitoring parameters such as tool wear, vibrations and machining forces are critical for the further development of the materials involved. The use of single and multi-layer coatings produced by PAPVD (*Plasma-assisted physical vapour deposition*) has allowed tungsten carbide tooling to become more versatile and competitive. This work is focused on the monitoring of two tribological systems: (WC-Co/Ti-C-N) against AISI 8620 steel and (WC-Co/Ti-C-N) against AA 6262-T6 aluminium under distinct machining conditions. Continuous turning tests were performed on a CNC lathe (3500rpm e 5,5kW) and machining forces were collected using a piezoelectric dynamometer. The results indicated that, in general, lower machining forces were observed when cutting both materials using the WC-Co/Ti-C-N conjugate. Moreover, lower machining forces were obtained using higher cutting speed and lower feed rate.

**Key-words:** Machining force; Monitoring; Coatings.