



Study on the performance of coated tools in turning cast iron

Etienne Beirão Friedrich, Lilian Martins da Motta Dias, Anna Carla Araujo

► To cite this version:

Etienne Beirão Friedrich, Lilian Martins da Motta Dias, Anna Carla Araujo. Study on the performance of coated tools in turning cast iron. *Revista Gestão & Tecnologia*, 2007, pp.66-74. hal-03226791

HAL Id: hal-03226791

<https://hal.science/hal-03226791>

Submitted on 18 May 2021

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.



Open licence - etalab

Estudo sobre o Desempenho de Ferramentas Revestidas no Torneamento de Ferro Fundido

Etienne Beirão Friedrich
Lílian Martins da Motta Dias
Anna Carla Araújo

RESUMO: Os revestimentos de TiN e TiCN processados por PVD – "Physical Vapour Deposition" – são conhecidos pela capacidade de aumentar o desempenho das ferramentas de corte, permitindo sua utilização em condições mais severas durante o processamento de distintos materiais. Nesta investigação procurou-se avaliar, de forma comparativa, o desempenho desses recobrimentos, aplicados em monocamadas, sobre insertos de metal duro, no torneamento de ferro fundido sob condições de desbaste e semi-desbaste e sem fluido de corte. O critério adotado para limitar a vida da ferramenta foi o desgaste de flanco máximo igual a 0,6mm, conforme preconiza a norma ISO 3685/93. Os resultados mostraram a intensidade das alterações que ocorrem nos mecanismos de desgaste predominantes, adesão e abrasão, quando se utilizam esses recobrimentos cerâmicos e se compara a vida útil das ferramentas sem revestimento com a sobrevida das ferramentas revestidas. Da mesma forma, uma análise comparativa entre os revestimentos aplicados indicou uma melhor performance para o TiCN, visto que suas propriedades demonstraram estar mais apropriadas para minimizar o desgaste de flanco nas condições de contorno empregadas. Entendemos que o presente estudo poderá servir à formação de bancos de dados utilizados em sistemas integrados de manufatura e, dessa forma, contribuir para o desempenho produtivo.

Palavras-chave: Usinagem; Ferro fundido; Desgaste de Flanco; Recobrimentos Cerâmicos.

ABSTRACT: Cutting tools coated with TiN and TiCN, manufactured by PVD – "Physical Vapour Deposition" – processing, are known due to the enhancement of the performance. Those tools can be used in more severe applications and with special or different materials. In this article it was analysed and compared the performance of different coated inserts on the turning operation of cast iron. It was used in roughing and finishing stages without cutting fluid. The criterium used for tool life was limited to 0,6mm of flank wear, as described in ISO 3685/93. The results shown different wear stages: adhesion and abrasive wear. Tools coated with TiCN presented a higher performance as their proprieties shown to be more adapted to reduce flank wear in the used cutting conditions. The results can be used to add information to data-bases on integrated manufacturing systems.

Keywords: Machining; Cast Iron; Flank Wear; Ceramic Coatings.

INTRODUÇÃO

O desenvolvimento de novos materiais e a aplicação de modernos recursos tecnológicos nos processos de manufatura têm, entre outros objetivos, melhorar a usinabilidade e potencializar a produtividade. Sua utilização vem alterando significativamente as condições de usinagem, redefinindo parâmetros de corte e viabilizando novas técnicas produtivas, as quais promovem a economia de tempos e custos.

A vida da ferramenta, a grandeza das forças de corte e da potência consumida, e o acabamento são os critérios fundamentais para avaliar o grau de usinabilidade e, ao mesmo tempo, os principais fatores que definem o custo de usinagem (Stemmer, 2005). Assim, quando buscamos qualidade e redução de custos, a otimização do processo se

inicia na seleção da ferramenta, sua geometria e material, e na correta adequação dos parâmetros de corte, fatores estes que se alteram em função do material a ser usinado, da qualidade de acabamento desejável e da máquina ferramenta utilizada.

Uma tendência observada por Diniz et al. (2006) nos modernos sistemas de produção são os lotes de fabricação cada vez menores, exigindo maior flexibilidade da manufatura e estabelecendo tempos de preparação de máquinas e de troca de ferramentas cada vez menores, tendendo a zero.

Portanto, atualmente, busca-se incrementar a produtividade pela redução dos tempos principais de corte, que, segundo Xavier e

Schramm (2007), podem ser obtidos pela otimização do projeto da peça, em que o sobremetal dos fundidos tem sido freqüentemente reduzido mediante as novas tecnologias e aumento considerável das velocidades de avanço e corte.

Caminhando na mesma direção e com objetivos semelhantes, o desenvolvimento de revestimentos cerâmicos aplicados às ferramentas de corte vem evoluindo sobremaneira, com alterações consideráveis nos processos de usinagem, seja pela viabilização de novas técnicas produtivas ou pela otimização das condições de corte, permitindo-as mais severas quando necessárias.

Assim percebe-se a importância de melhor caracterizar e analisar esses processos, potencializando-os qualitativamente e no seu desempenho, de forma a ampliar a produtividade e competitividade do setor industrial.

No presente estudo, buscamos avaliar, de forma comparativa, o desempenho dos recobrimentos cerâmicos aplicados em ferramentas de metal duro em um processo de torneamento. Nele, procuramos explorar a correlação existente entre os parâmetros de usinagem, velocidade de corte e avanço, os quais alteram significativamente os mecanismos de atrito entre peça e ferramenta, bem como constatar a influência das características dos recobrimentos no tempo de vida útil das ferramentas.

MATERIAIS, MÉTODO E EQUIPAMENTOS

Escolha do Material e do Processo de Usinagem

A busca constante por tecnologias e conhecimentos científicos que garantam uma maior qualidade e produtividade durante o processamento das matérias-primas é uma realidade. Novos processos e materiais são desenvolvidos a partir desse objetivo, determinando o aprofundamento de estudos e um maior conhecimento em áreas específicas.

Em meio a essas estratégias, embora se perceba uma crescente demanda pelo alumínio, o ferro fundido, ainda hoje, lidera o mercado de fundidos. Suas características únicas, as contínuas melhorias em seu processamento, a utilização de elementos de liga alternativos e o desenvolvimento de novas classes de ferros fundidos para aplicações específicas são as principais justificativas para sua preferência e atendimento a necessidades tecnológicas, sobretudo na indústria automobilística.

A usinabilidade desses fundidos está relacionada com a sua qualidade metalúrgica, o processo de fabricação escolhido, o maquinário e ferramentas utilizadas, as condições de corte adotadas e a utilização ou não de fluidos de corte. Assim, cada empresa deve promover melhorias contínuas, organizando suas ações produtivas de tal forma que possa garantir em seu processo de manufatura a confiabilidade e a qualidade necessárias para atender as exigências comerciais e tecnológicas de mercado.

Dentro desse contexto, e por ser hoje uma das formas de processamento mais utilizadas, elegemos o torneamento do ferro fundido cinzento como parte do processo de avaliação.

O torneamento é um processo metalúrgico no qual a remoção do cavaco para a confecção de uma peça tem como princípio básico um sistema tribológico específico. Neste sistema, um dos fatores de grande influência é o material a ser usinado, cujas características são importantes na determinação da ferramenta utilizada, dos parâmetros de corte e dos lubrificantes que serão adotados, os quais, todos eles, juntos ou individualmente, fazem alterar as temperaturas e forças aplicadas. (Van Stappen et al., 1995).

Em função disso e do resultado de pré-testes de usinagem utilizados para determinar as condições do experimento, foi realizada uma análise química no ferro fundido disponibilizado para o estudo. A composição e os percentuais dos elementos presentes nas amostras utilizadas encontram-se na Tabela 1, para melhor avaliação.

Elemento	Concentração (%)
Carbono (C)	3,40259
Enxofre (S)	0,00592
Silício (Si)	2,375
Manganês (Mn)	0,1609
Magnésio (Mg)	0,0318
Fósforo (P)	0,0497
Titânio (Ti)	0,0229
Cobre (Cu)	0,1499
Níquel (Ni)	0,0007

Tabela 1
Composição química do ferro fundido usinado

A caracterização do ferro fundido foi complementada pela análise de sua estrutura metalográfica, conforme pode ser observado na Figura 1, e por meio de um ensaio de dureza Brinell, que apresentou como resultado uma dureza média de 144 HB.

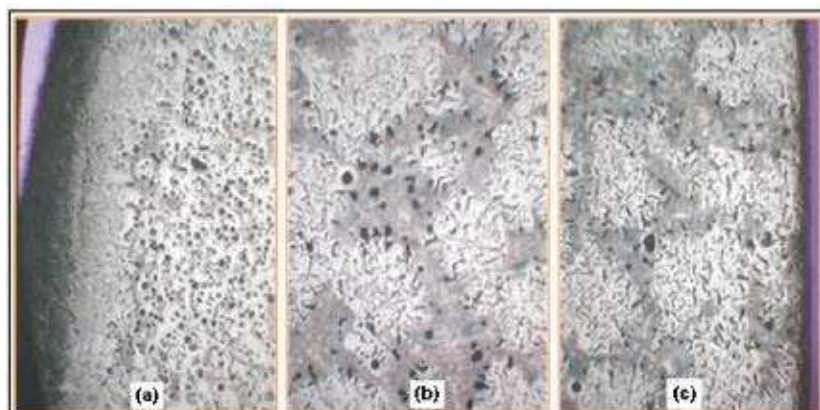


Figura 1

Ferro fundido utilizado, cuja estrutura se altera da periferia (a) para o núcleo (c), onde:

- a) Grafia vermicular e nodular, com perlita na matriz ferrítica;
- b) Grafia vermicular com pouca grafita nodular e perlita matriz ferrítica;
- c) Grafia vermicular com alguns nódulos de grafita e perlita na matriz ferrítica.

Ferramentas e Revestimentos

Da mesma forma que os materiais fundidos, as ferramentas vêm evoluindo de forma surpreendente nas últimas décadas. A grande variedade de suas geometrias, associadas aos diferentes materiais com que são fabricadas, ampliam em muito as opções de processamento dos materiais. Conseqüentemente, a seleção das ferramentas pode ser realizada de forma mais adequada, principalmente se observada a relação existente entre o seu desgaste, o tempo de processamento e a qualidade do acabamento, condições estas que alteram de forma significativa o desempenho produtivo.

Somado a esses diferentes fatores, podemos destacar, ainda, o trabalho que vem sendo desenvolvido com os revestimentos aplicados às ferramentas de corte, a fim de permitir o processamento dos materiais em condições mais severas, proporcionando ganhos na relação qualidade e produtividade. Neste particular, apresentam-se os revestimentos binários como os do tipo TiN, que têm demonstrado aumento na vida útil das ferramentas de corte e que, hoje, estão evoluindo para os recobrimentos cerâmicos ternários, como o TiCN. Assim, torna-se necessário caracterizar, de forma apropriada, o revestimento e o material da ferramenta que será recoberta.

Segundo Ávila (2003), os desgastes que ocorrem nas ferramentas são muito particulares. As solicitações mecânicas e térmicas excedem os parâmetros de corte adotados, sendo, pois, necessário qualificar a resistência mecânica do material utilizado no seu substrato e no revestimento. Ao mesmo tempo, os diferentes processos de deposição podem produzir uma gama de composições químicas, estruturas

cristalinas e microestruturas diferenciadas, que modificam as propriedades dos revestimentos. Ou seja, aspectos como condutividade térmica, coeficiente de dilatação, propriedades elásticas, dureza, limite de escoamento e resistência mecânica, capacidade de deformação plástica, tenacidade e outras peculiaridades, como tensões residuais, rugosidade e adesão ao substrato, são, entre outras, características importantes que interferem no desempenho. A escolha da ferramenta e do revestimento é, portanto, bastante complexa e particular, visto que os mecanismos de desgaste que ocorrem são específicos para cada tipo de aplicação e necessidade produtiva existente.

O presente estudo busca avaliar comparativamente o desempenho dos revestimentos de TiN e TiCN aplicados sobre ferramentas de metal duro, tendo como referência o inserto sem revestimento. No caso específico, esses revestimentos, dispostos em monocamadas, foram desenvolvidos por meio do processo PVD – "Physical Vapour Deposition" –, no qual, segundo a Balzers (2006), as propriedades como dureza, estrutura, resistência química, resistência à temperatura e aderência podem ser mais bem gerenciadas e combinadas.

O ferro fundido é conhecido por ser um material frágil e também, normalmente, heterogêneo. Esta última característica pode ser constatada pela contínua presença de poros, além de uma microdureza irregular. Via de regra, sua usinagem é caracterizada pela produção de cavacos de ruptura, tornando, assim, o monitoramento do desgaste de flanco mais relevante que o de desgaste de cratera, principalmente quando buscamos avaliar o desempenho das ferramentas no processo (Ferraresi, 1985; Diniz, 2006).

Esse tipo de desgaste acontece na superfície de folga da ferramenta e, geralmente, ocorre devido ao

atrito existente na interface da ferramenta com a peça trabalhada, promovendo os mecanismos do tipo abrasão e adesão, além de produzir elevação da temperatura, a qual altera as propriedades dos materiais da ferramenta e da peça (Kumar et al. 2006).

Percebe-se, portanto, a importância de desenvolverem-se estudos de análise e caracterização desses recobrimentos no torneamento do ferro fundido, de tal forma que permitam não só avaliar qualitativamente o seu desempenho, provendo-os de maior confiabilidade, mas também integrá-los, adequando os parâmetros intrínsecos de processo, de forma a otimizar os quesitos de qualidade, produtividade e competitividade.

Segundo Kwon e Fischer (2003), quando se determina a sobrevida de uma ferramenta em utilização, impede-se a sua troca prematura, minimizando os custos e os tempos improdutivos inerentes a este procedimento.

Prever o fim de vida de uma ferramenta é fundamental, pois qualquer avaria ou desgaste excessivo pode prejudicar significativamente o planejamento produtivo, a integridade e rugosidade superficial da peça em processamento e as suas tolerâncias dimensionais (Childs et al., 2000).

Assim sendo, escolher corretamente a ferramenta e o recobrimento mais adequado para se utilizar em um processo produtivo é muito importante para minimizar os custos de produção. No caso específico deste estudo, o recobrimento que minimizar com maior intensidade o desgaste de flanco irá ampliar a vida útil da ferramenta.

Metodologia

Os corpos de prova foram trabalhados no Laboratório de Usinagem e Manufatura do Colégio Técnico Universitário da Universidade Federal de Juiz de Fora, os quais foram submetidos a uma pré-usinagem com aproximadamente 6mm de desbaste para eliminação de carepas e de possíveis falhas e defeitos do processo de fundição, resultando em tarugos cilíndricos de $\varnothing 79 \times 250$ mm.

Em cada uma das peças foi confeccionado um chanfro de 45°, com dimensões de 6 x 6mm, para suavizar a entrada da ferramenta, e um canal de 15 mm, para garantir que, ao término de cada passe, a ferramenta saísse livre sem a possibilidade de

ocorrência de choques com a parte da matéria-prima não usinada, conforme pode ser visto na Figura 2.



Figura 2
Corpo de prova de ferro fundido, com chanfro de 45° para suavizar a entrada da ferramenta e canal para saída livre da ferramenta

Para cada um dos ensaios foram utilizados o porta-ferramentas ISO PSDNN 2525M12 e insertos de metal duro (WC-Co) do tipo ISO SNMA 120408 H1P. Parte das ferramentas foram utilizadas sem revestimento e as demais foram recobertas pela Oerlikon Balzers, através do processo PVD – "Physical Vapour Deposition", com nitreto de titânio (TiN) e carbonitreto de titânio (TiCN).

O experimento foi desenvolvido em um Torno CNC Romi modelo 30D, com torre elétrica, eixo horizontal, 8 posições de 10CV e rotação máxima de 4.000rpm.

Na avaliação da vida útil desses insertos, o critério de fim de vida estabelecido foi o de desgaste de flanco máximo ($VB_{f,máx}$) igual a 0,6 mm, conforme possibilita a norma ISO 3685 (1993). Para tanto, as condições para o experimento de torneamento cilíndrico externo foram adequadas para o corte de desbaste e semi-desbaste, sem fluido de corte. Os parâmetros utilizados foram determinados a partir de revisão bibliográfica e pré-testes executados, resultando em uma matriz de testes em que foram conjugadas as velocidades de corte (V_c) de 150, 200 e 250m/min, os valores de avanço (f) de 0,10, 0,15 e 0,20mm/volta, e uma profundidade de corte (a_p) de 2mm mantida constante. Para todos os parâmetros utilizados foram observados os limites recomendados pelo fabricante da ferramenta.

Para cada um dos vinte e sete experimentos, previstos na matriz de usinagem, foram utilizados corpos de prova e arestas de corte distintas, as quais tiveram seu desgaste de flanco monitorado e

fotografado periodicamente em função do número de passes aplicados. Ou seja, acrescentou-se o número de passes consecutivamente até se atingir o critério de fim de vida adotado. Dessa forma, buscou-se adquirir os valores de tempos para cada uma das arestas de corte da ferramenta que permaneceu em efetivo corte, dentro de cada uma das condições de contorno estipuladas, até se atingir o $VB_{\text{máx}}$ considerado.

O desgaste das ferramentas foi mensurado e monitorado por meio de um projetor de perfil Mitutoyo modelo PI-A 3005 D50, com aumento de 20x, e pelo microscópio Topcon, com captura de imagem feita pela câmera VCC-280 color digital e software Power VCR II – Cyberlink Digital vídeo, com aumento de 100 e 250x.

Todos os ensaios desenvolvidos tiveram os tempos de vida da ferramenta calculados pela Eq. (1), em que o valor da rotação foi adquirido diretamente do torno CNC para cada um dos ensaios efetuados:

$$T = \frac{L_a}{f \cdot n} \quad (1)$$

onde T é a vida da ferramenta em minutos, L_a é o percurso de avanço da ferramenta em efetivo corte em mm, f é o avanço em mm/volta, e n é a rotação em rpm.

RESULTADOS

A matriz de testes dos ensaios realizados foi estabelecida para avaliar, de forma comparativa, o desempenho dos revestimentos de TiN e TiCN, respectivamente, quando aplicados sobre um inserto de metal duro WC-Co 6%.

Dois ensaios, um com o inserto revestido de TiN, para as condições de $V_c = 250\text{m/min}$, $f = 0,15\text{mm/volta}$ e $a_p = 2\text{mm}$, e outro, com o inserto revestido de TiCN, para as condições de $V_c = 200\text{m/min}$, $f = 0,20\text{mm/volta}$ e $a_p = 2\text{mm}$, não foram realizados devido a um imprevisto operacional que causou a quebra do porta-ferramenta antes de os mesmos serem realizados.

Pelos resultados alcançados, percebe-se claramente a severidade das condições de corte escolhidas, pois, para o inserto sem recobrimento (WC-Co), somente dois experimentos apresentaram alguma sobrevida após o primeiro percurso de avanço (L_a) com valor de 188mm. Neles, como mostra a Figura 3, acentuados mecanismos de adesão e de abrasão ficam caracterizados pela presença de material da peça aderido à ferramenta e por entalhes e sulcos, características típicas desses desgastes (Melo, 2006; Kumar, 2006).

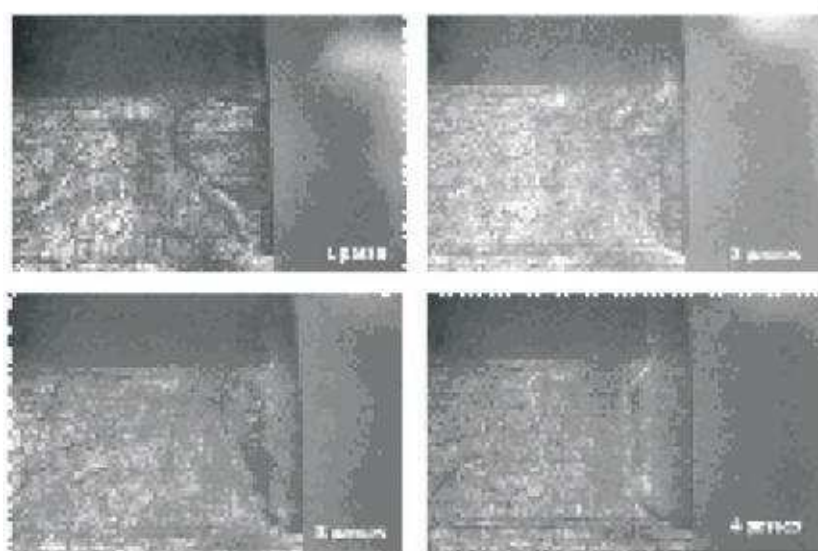


Figura 3
Evolução parcial do desgaste de flanco de um inserto de WC-Co usinando ferro fundido nas condições de corte de $V_c = 200\text{m/min}$, $f = 0,10\text{mm/rot}$ e $a_p = 2\text{mm}$. Aumento 100x.

O comportamento do desgaste foi analisado para cada um dos tipos de ferramenta, utilizando-se o critério de desgaste de flanco máximo. Para cada condição de corte utilizada, foi construída uma curva

que compara o tempo de efetivo corte calculado pelo valor do desgaste monitorado, conforme detalhado nas Figuras 4, 5 e 6.

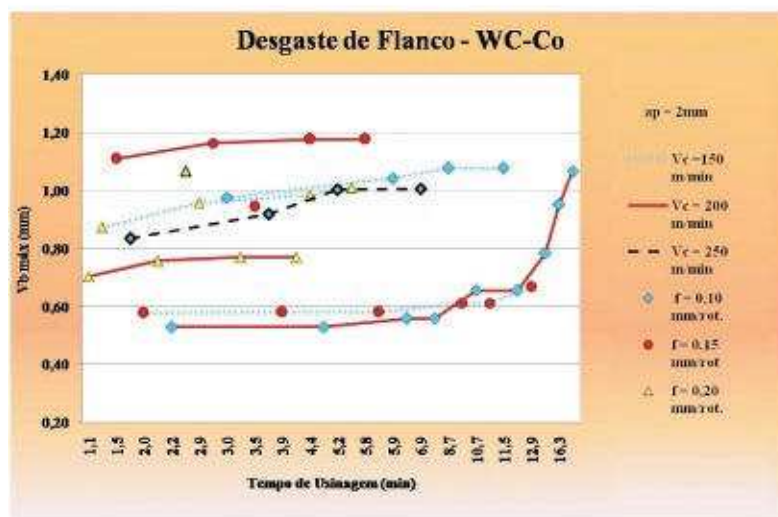


Figura 4
Relação do desgaste do flanco com o tempo de usinagem para as ferramentas de WC-Co sem recobrimento



Figura 5
Relação do desgaste de flanco com o tempo de usinagem para as ferramentas de WC-Co recobertas com TiN



Figura 6
Relação do desgaste de flanco com o tempo de usinagem para as ferramentas de WC-Co recobertas com TiCN

Os piores resultados encontrados para os revestimentos aconteceram quando da aplicação dos fatores, velocidade de corte e avanço, em seus níveis mais altos.

Observando-se os gráficos das ferramentas revestidas com TiN e TiCN, Figuras 5 e 6, percebe-se que as funções de desgaste apresentaram um mesmo padrão de comportamento para as diferentes velocidades de corte utilizadas. Contudo, nessas condições, é possível perceber que, para o revestimento de TiCN, os parâmetros de avanço adotados tiveram, de forma geral, relativa influência no

desgaste, menor do que nas ferramentas de TiN, indicando que o mesmo também é uma grandeza a ser considerada na determinação da vida da ferramenta.

Para melhor avaliação foram transpostos para o gráfico da Figura 7, os tempos que cada uma das ferramentas trabalharam até atingirem o valor limite de desgaste $VB_{\text{máx}} = 0,6\text{mm}$. Os resultados encontrados demonstram, claramente, que a utilização dos revestimentos aumentou consideravelmente o desempenho das ferramentas recobertas, quando comparadas com as de WC-Co sem revestimento.

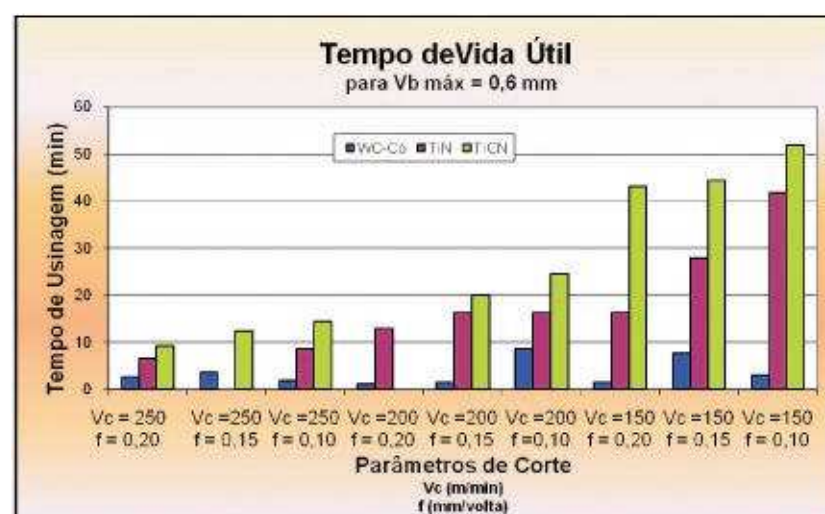


Figura 7
Sobrevida proporcionada pelos revestimentos de TiN e TiCN em relação a uma ferramenta de WC-Co sem revestimento, em diferentes condições de corte

Os inserts revestidos com TiN e TiCN apresentaram maior vida útil nas condições mais brandas de corte, $V_c = 150\text{m/min}$ e $f = 0,10$ e $0,15\text{mm/rot}$, com um tempo de usinagem calculado de 41,8 e 27,9 minutos para o TiN e de 52,0 e 44,5 minutos para o TiCN, respectivamente.

Entretanto, para as condições intermediárias, com $V_c = 200\text{m/min}$ e $f = 0,15$ e $0,20\text{mm/rot}$, os ganhos no tempo de vida apresentaram diferenças da ordem de 10 a 12 vezes de sobrevida em relação aos inserts sem revestimento, conforme a Tabela 2, e, apesar de uma possível variação do tempo de vida da ferramenta sem recobrimento, são resultados que quantificam o retorno do valor agregado da utilização do recobrimento.

Parâmetros adotados			Aumento do tempo de vida		
Vc	f	ap	TiN / WC-Co	TiCN / WC-Co	TiCN / TiN
m/min	mm/volta	mm	%	%	%
150	0,10	2	1304	1646	24
150	0,15	2	263	479	60
150	0,20	2	1001	2799	163
200	0,10	2	89	184	51
200	0,15	2	1000	1248	23
200	0,20	2	1065	*	*
250	0,10	2	378	710	69
250	0,15	2	NR	252	*
250	0,20	2	147	252	42

* não efetivado

Tabela 2
Sobrevida relativa em função do reconhecimento

Os recobrimentos permitiram um maior tempo de vida para todos os experimentos realizados, com ganhos que podem ampliar a vida da ferramenta em uma ou em 30 vezes, dependendo das condições de corte e do tipo de revestimento utilizado.

Os resultados mostram também que o revestimento de TiCN apresentou tempo de vida 63% superior ao de TiN para a condição de $V_c = 150\text{m/min}$ e $f = 0,20\text{mm/volta}$.

CONCLUSÕES

Na presente investigação, o desempenho de insertos de metal duro, com e sem revestimentos de TiN ou TiCN, foram avaliados durante o torneamento de um ferro fundido com dureza média de 144HB na condição de corte a seco.

Os parâmetros de corte adotados para o experimento mostraram-se bastante severos para os insertos de WC-Co sem revestimento. Desta forma, foi possível confirmar a eficiência anunciada pelos revestimentos de TiN e TiCN com a significativa sobrevida apresentada pelas ferramentas recobertas.

De acordo com os resultados encontrados, os dois recobrimentos analisados apresentaram ganhos no tempo de vida onde os maiores valores verificados foram para as velocidades de corte mais baixo, isto em decorrência de que, quanto menores são as velocidades de corte, mais baixas são as temperaturas geradas e, portanto, menores são os seus efeitos no desgaste das ferramentas. Da mesma forma, os ensaios exercitados

nas condições intermediárias, com $V_c = 200\text{m/min}$, apresentaram sobrevidas bastante significativas, embora menores.

O revestimento de TiN aumentou consideravelmente o tempo de vida em relação à ferramenta não revestida, apresentando melhor resultado na condição mais branda de corte. O recobrimento de TiCN também obteve melhor resultado, em sobrevida, para a mesma condição de corte, embora, proporcionalmente, tenha apresentado um ganho maior em relação às ferramentas não recobertas, na condição de $V_c = 150\text{m/min}$ e $f = 0,20\text{mm/volta}$.

Alguns resultados, porém, como, por exemplo, o experimento utilizando $V_c = 150\text{m/min}$ com $f = 0,15\text{mm/volta}$ e ainda o de $V_c = 200\text{m/min}$ com $f = 0,10\text{mm/volta}$, aparentemente estão em desacordo, apresentando ganhos de sobrevida muito mais baixos que o de seus pares. Acredita-se que a variabilidade encontrada deve-se ao comportamento de referência nas condições de corte de ferramentas sem revestimento, em que intensos mecanismos de abrasão e principalmente o de adesão estão presentes. Assim, não se permite garantir homogeneidade nos resultados encontrados, visto que, muitas vezes, a adesão dissimula o desgaste existente, recobrindo-o com fragmentos da peça trabalhada.

Espera-se, como continuação desta pesquisa, avaliar a relação custo-benefício dos recobrimentos, quando no processamento de diferentes volumes de produção, e, assim, determinar as condições economicamente mais viáveis para um sistema produtivo.

Agradecimentos

Os autores agradecem ao CNPq, à FAPERJ, à FAPEMIG, ao CTU/UFJF, à Tecksid do Brasil Ltda e à Oerlikon Balzers, pelo suporte de pesquisa; aos colegas Jalon de Moraes Vieira e Renato Françoso Ávila, e aos bolsistas envolvidos, pelo apoio no desenvolvimento do estudo.

Referências bibliográficas

- ÁVILA, R. F. **O desempenho de ferramentas de metal duro revestidas com Ti-N, Ti-C-N e Ti-Al-N no torneamento do aço ABNT 4340 temperado e revenido**. Tese de Doutorado em Engenharia Metalúrgica e de Minas. Escola de Engenharia da UFMG, Belo Horizonte, 2003. 190p.
- BALZERS, Disponível em: <www.balzers.com.br>. Acesso em: 02 nov. 2006.
- CHILDS, T., MAEKAWA, K., OBIKAWA, T., YAMANE, Y. **Metal machining** Theory and applications. Arnould Publishers: London, 2000. 408 p.