

ANÁLISE DOS TIPOS DE FERRAMENTAS DE METAL DURO COM E SEM REVESTIMENTO NO TORNEAMENTO DE TITÂNIO COMERCIALMENTE PURO GRAU 4

Carlos Vinicius Lemes

Anselmo Eduardo Diniz

Universidade Estadual de Campinas, FEM, R. Mendeleyev, 200 - Cidade Universitária, Campinas - SP, 13083-860, Brasil
carloslemes2@hotmail.com ; anselmo@fem.unicamp.br

Resumo. O uso crescente do titânio e suas ligas na fabricação de implantes decorre da presença simultânea da excelente biocompatibilidade, relativa baixa densidade, alta resistência mecânica e à corrosão. Ao contrário das excelentes características de aplicação, a usinagem de titânio é considerada ruim, ou seja, classificado como material de difícil usinabilidade. O desafio constante dos fabricantes de implantes é aplicar no processo de usinagem as ferramentas de torneamento com a aplicação correta e o melhor custo-benefício. Este trabalho visa comparar a vida do inserto sem revestimento com outros 3 tipos de revestimentos em ferramentas de metal duro, revestimentos estes utilizados e recomendados por alguns fornecedores de ferramentas. Experimentos de torneamento foram realizados utilizando como peça o titânio comercialmente puro grau 4 (tipicamente utilizado em implantes dentários), testando 2 velocidades de corte para cada ferramenta utilizada. Os testes foram realizados em um torno CNC de cabeçote móvel, empregando fluido de corte integral em abundância. Os resultados demonstraram que o revestimento de camada dupla TiN+TiCN obteve a maior vida e consequentemente o melhor custo-benefício entre os 4 inserts testados. Isso se deve ao fato de ser um inserto com revestimento de estrutura multicamadas, e este resiste melhor ao mecanismo de desgaste que ocorre predominantemente nesta aplicação que é o Attrition. Mesmo com o aumento da velocidade de corte, este revestimento também obteve o melhor resultado.

Palavras chave: usinabilidade, titânio, torneamento, metal duro, revestimento

1. INTRODUÇÃO

As ligas de titânio estão entre os melhores materiais para aplicações nas indústrias aeronáutica, aeroespacial, marítima, petroquímica, médica, nuclear e de geração de energia devido às suas propriedades inerentes como elevada relação resistência/densidade, elevada resistência à fadiga e ao escoamento, resistência em altas temperaturas, biocompatibilidade e excelente resistência à corrosão. Porém, as mesmas propriedades físicas e químicas que tornam esse material desejável para uma série de aplicações, também comprometem sua usinabilidade. Devido às altas dureza e resistência, temperaturas elevadas são geradas na usinagem. Como essas ligas têm baixa condutividade térmica, o calor gerado não é dissipado principalmente pelo cavaco e pela peça como na usinagem de outros materiais, sendo retido pela ferramenta, o que provoca sua falha prematura. O baixo módulo de elasticidade desse material causa grandes deflexões na peça, que podem resultar em vibrações na ferramenta e baixa qualidade da superfície usinada (Khan e Maity, 2017).

Devido ao crescimento da utilização deste moderno material nas indústrias de diversos segmentos, a usinabilidade do titânio passou a ser um assunto de grande interesse para as fábricas que o manufaturam. Ao mesmo tempo, a aplicação de implantes dentários também vem crescendo gradativamente e, consequentemente, seu volume de fabricação no mercado nacional e mundial.

O titânio é um dos poucos materiais que são inertes à corrosão por todos os líquidos e tecidos do corpo, uma das grandes exigências para a implantação no corpo humano. Na área ortopédica, o titânio é comumente aplicado em próteses maxilo-faciais, de joelho, de quadril e de crânio e na ortodontia em implantes dentais (Fig. 1), na qual parafusos de titânio são introduzidos no osso da maxila para a osseointegração, constituindo “raízes artificiais” para fixação de próteses dentárias (Leyens e Peters, 2003).

Atualmente, o titânio comercialmente puro (Ti. c.p.) grau 4 e a liga Ti-6Al-4V vem sendo os materiais mais usados na produção de próteses e dispositivos médicos e odontológicos, por apresentarem uma boa combinação de propriedades (baixo módulo elástico, resistência à corrosão e biocompatibilidade).

Diante deste cenário, torna-se interessante estudar meios de se melhorar a usinabilidade do titânio.

Na usinagem do titânio a área de corte concentra elevadas temperaturas, de aproximadamente 1000 °C mesmo em velocidades de corte moderadas (Khan e Maity, 2017). Estas temperaturas elevadas desenvolvidas na região de corte do titânio, junto com a baixa condutividade térmica do material, resultam em uma maior e mais variável força de corte devido ao cisalhamento adiabático, elevada imprecisão dimensional da peça e menor vida da ferramenta (Jahedi et al.,

2009). Isso faz com que a usinagem do titânio seja feita com velocidades de corte muito mais baixas que as comumente utilizadas para a usinagem do aço, por exemplo.

O tipo do cavaco formado também tem influência na usinabilidade, bem como no acabamento da superfície usinada. Atribui-se a formação de cavacos segmentados na usinagem do Ti, os quais apresentam-se na forma macroscopicamente contínua e que consistem em estreitas bandas de material altamente deformadas entre segmentos com pouca ou quase nenhuma deformação. Esse tipo de cavaco é formado quando as altas temperaturas geradas em função da deformação proveniente da usinagem, aliadas à baixa condutividade térmica do titânio, provocam amolecimento térmico localizado que diminui a resistência mecânica do material. Com isso, são formadas bandas de cisalhamento adiabáticas (ASB) com resistência menor que o material ao seu redor, o que leva a deformações localizadas e à morfologia característica desse tipo de cavaco. A ocorrência de ASB pode causar grandes variações nas forças de corte e induzir *chatter*, o que provoca problemas de usinagem e prejuízo à qualidade da superfície usinada. (Stephenson, 2016). Nesse escopo, é importante realizar-se pesquisas em ferramentas de metal duro e em seus revestimentos para a sua usinagem, a fim de que seja possível vidas da ferramenta mais longas e/ou se possa usinar o titânio com velocidades mais altas.

A usinagem de titânio, seja ele puro ou contendo elementos de liga, requer uma seleção adequada do material da ferramenta de corte, pois a escolha correta irá afetar significativamente nos principais aspectos da usinagem do titânio, como a resistência ao desgaste da ferramenta, temperatura na zona de corte, qualidade da superfície usinada, variação dimensional e força de corte.

Atualmente é comum encontrar nas empresas que usinam o titânio uma incerteza da escolha certa do tipo de ferramenta para realizar o processo de usinagem. As principais dúvidas são relativas ao utilizar ou não o revestimento na ferramenta e se o revestimento for utilizado pode ou não conter titânio na sua composição. Isto se deve ao fato de que o titânio possui afinidade química com os materiais utilizados na maioria dos revestimentos (Wang e Zhang, 1988). Então a dúvida é: deve-se utilizar como ferramenta na usinagem do titânio metal duro sem cobertura, que possui menor dureza a quente e maior coeficiente de atrito, mas que não possui nenhum elemento que reage quimicamente com o material da peça, ou ferramenta com revestimento, que possui maior dureza a quente, menor coeficiente de atrito, maior temperatura de trabalho, mas com elementos em sua composição que possuem afinidade química com o titânio?

Este trabalho visa contribuir com as pesquisas sobre a usinabilidade do titânio comercialmente puro (Ti c.p Gr4.) utilizado em prótese dentária através de um estudo sobre o comportamento de diferentes tipos de ferramentas aplicadas no torneamento deste material. Para isso foi avaliada a vida de insertos de metal duro com diferentes camadas de revestimento, analisando-se a rugosidade e o desgaste da ferramenta aplicada no torneamento externo de amostras de titânio comercialmente puro grau 4. A partir dos resultados obtidos, objetiva-se avaliar o desempenho de todas as ferramentas, os mecanismos de desgaste gerados, o custo/benefício de cada ferramenta e com isso indicar a melhor solução para esta determinada operação.

2. MATERIAIS E METODOS

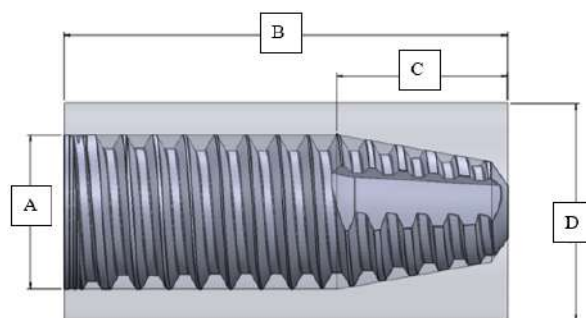


Figura 1 – Implante dentário com dimensões básicas a serem usinadas (Autor)

Os experimentos deste trabalho foram realizados em uma empresa do ramo médico odontológico, especializada no estudo, desenvolvimento e fabricação de implantes dentários e seus respectivos componentes protéticos.

O material utilizado nos experimentos é o mais utilizado atualmente para fabricação de implantes dentários: titânio comercialmente puro conforme ASTM F67 Grau 4.

Os insertos utilizados neste trabalho, bem como as camadas de cobertura aplicadas aos mesmos foram fornecidos por empresas parceiras e de expressiva relevância em suas áreas de atuação.

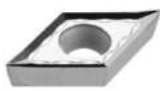
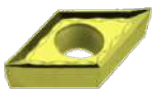
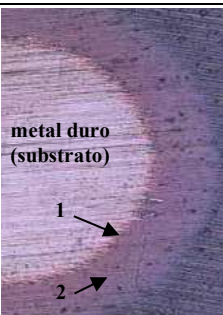
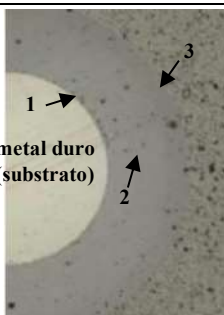
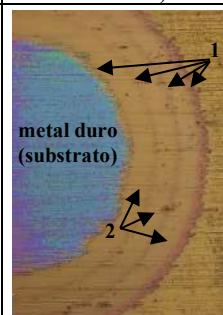
A máquina-ferramenta utilizada para realização dos testes foi um Torno Automático CNC cabeçote móvel (tipo Suíço), tipicamente utilizada para o torneamento de peças pequenas. Esta máquina possui alimentador de barras automático e sistema de fixação da peça por pinça e bucha de guia, método convencional para este tipo de máquinas. Como esse processo é realizado continuamente, sempre com a mesma força de fixação, o sistema é considerado rígido para o processo de torneamento.

A operação de torneamento realizada nos ensaios é considerada usinagem média no diâmetro externo da peça.

Inicialmente, os parâmetros de corte utilizados foram aqueles recomendados pelo fabricante da ferramenta, ou seja: $v_c = 55\text{m/min}$ e $f = 0,06\text{ mm/rot.}$ Em seguida, foram realizados experimentos com $v_c = 66\text{m/min}$ (20% maior que a inicial) e mesmo avanço $f = 0,06\text{ mm/rot.}$ O corte da peça foi realizado com um passe apenas da ferramenta, ou seja, a profundidade de usinagem (a_p) foi na média 1,2 mm. O ângulo χ_r da ferramenta foi de 90° e o tempo médio de contato desta ferramenta com a peça foi de 3,1 segundos na v_c de 55m/min e 2,6 segundos para a v_c de 66m/min. O comprimento usinado por ferramenta e o volume de cavaco removido por ferramenta variaram devido a esta aplicação possuir uma variada gama de implantes produzidos com diferentes dimensões e diâmetros (dimensões A, B, C e D na Fig. 1). A operação analisada neste estudo foi o desbaste de todo o material do implante antes da operação de rosqueamento.

A fim de comparar a ferramenta sem revestimento com outras revestidas, foi aplicado na mesma ferramenta os seguintes revestimentos: TiAlN; AlCrN; TiCN+TiN. Todos os inserts possuem a mesma base, ou seja, o metal duro utilizado de substrato possui as mesmas características, sendo a micro dureza de 1650 (HV 0.05) e um tamanho médio de grão de $1,8\mu\text{m}$. A Tab. 1 mostra um resumo com todas as informações coletadas a respeito das ferramentas e revestimentos utilizados neste trabalho:

Tabela 1 - Informações dos inserts utilizados nos testes (Autor adaptado de Platit 2017 e Balzers 2019)

Ferramenta utilizada	S/ Revestimento	TiAlN	AlCrN	TiCN+TiN
Imagem do inserto				
Cor externa do inserto	Cinza	Cinza violeta	Cinza	Amarelo 500
Tipo de estrutura micrométrica	-	Monocamada (1-Camada de aderência: TiN ; 2- Camada monobloco de TiAlN – 50% Ti e 50% Al)	Dupla camada (1-Camada de aderência: CrN ; 2- Camada monobloco de AlCrN ; 3- Camada superficial AlCrBN)	Multi-camadas (1-Camada mais escura é TiN ; 2- a mais clara é TiCN. As camadas de aderência e a superficial são de TiN=1)
Imagem da camada micrométrica gerada através do Calotest	-			
Microdureza superficial (HV 0.05)	1670	3300	3800	2950
Coefficiente de atrito contra o aço a seco	0,3	0,15	0,30	0,17
Espessura total da camada (μm)	-	2-4	2-4	2-4
Temperatura máxima de trabalho ($^\circ\text{C}$)	500	900	1100	800
Temperatura do processo PVD ($^\circ\text{C}$)	-	450	450	400

A usinagem foi feita com refrigeração externa em abundância a todo o momento. O fluido de corte usado no equipamento é um fluido de corte à base de ésteres vegetais, não miscível em água.

Cada ensaio realizado foi replicado uma vez, ou seja, foram realizados 16 testes ao total. O critério de fim de vida da ferramenta utilizada neste trabalho não foi medido na ferramenta e sim na peça usinada, ou seja, o critério para fim de vida da ferramenta foi a rugosidade superficial da peça alcançar valores iguais ou superiores a $Ra = 0,8\mu\text{m}$. Este critério foi utilizado porque é normalmente utilizado pela empresa em que se realizou os testes.

Já a referência de comparação de vida entre as ferramentas utilizadas neste trabalho foi o comprimento usinado total de cada ferramenta até alcançar a rugosidade igual ou superior a $R_a = 0,8 \mu\text{m}$.

Foram parametrizados os programas de usinagem de implantes no CNC, a fim de que, a cada 100 peças, um blank extra fosse usinado apenas com o torneamento externo realizado (sem as operações posteriores). Em cada blank usinado foi medido a rugosidade superficial. Nesta medição foi utilizado um cut off de $0,8 \text{ mm}$ e 3 medições em cada blank, para obter uma confirmação do valor encontrado.

Antes de iniciar os testes, foram medidos os raios de aresta de cada inserto, além da rugosidade na aresta. O código ISO do inserto para a aplicação foi o DCGT 07 02 02. Trata-se de um inserto sem cobertura de geometria positiva, com 2 arestas e quebra-cavaco recomendado para usinagem de porte médio.

3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Após a realização dos 16 testes (8 testes e 8 réplicas), os valores de rugosidade externa medida a cada 100 peças foram anotados, e com isso foram gerados gráficos relacionando a rugosidade com o comprimento usinado. A vida da ferramenta era obtida no momento que a peça usinada atingia a rugosidade $R_a = 0,8 \mu\text{m}$. Com esta base de dados, foi possível gerar um resumo em apenas um gráfico que mostra a vida da ferramenta em comprimento usinado para cada tipo de inserto testado neste trabalho (Fig. 2).

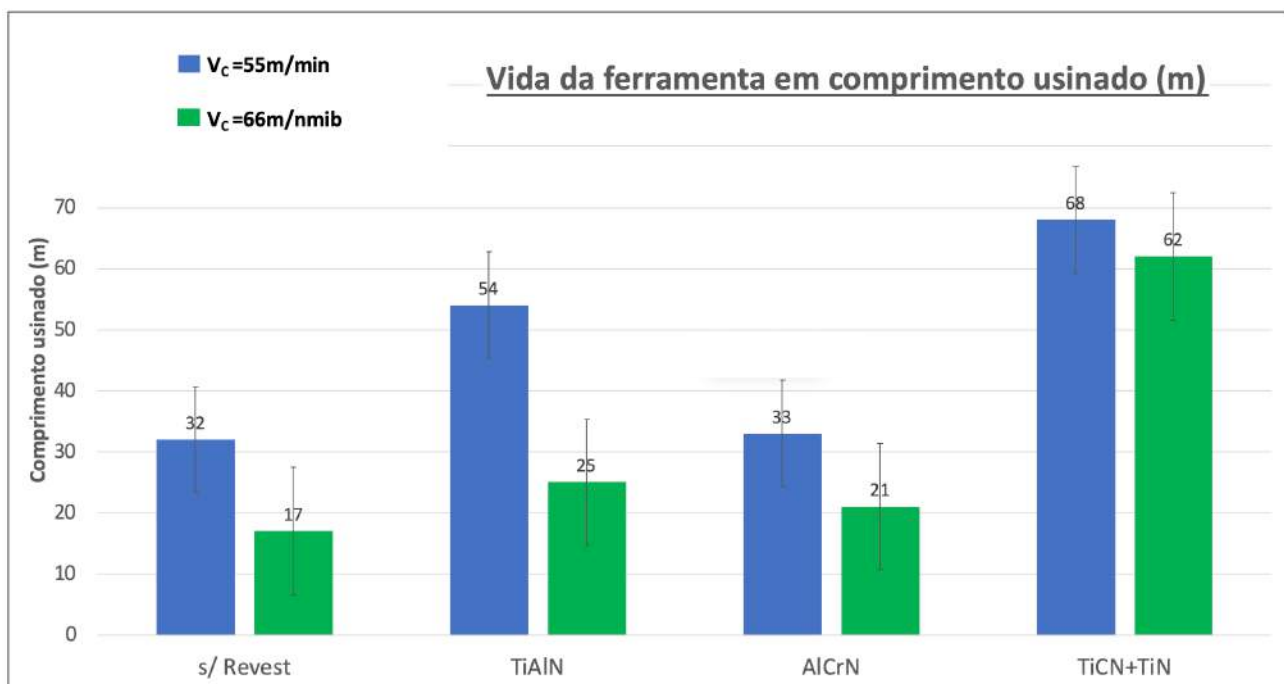


Figura 2 – Vida da ferramenta em comprimento usinado (Autor)

Observa-se na Fig. 2 que o inserto revestido com TiCN+TiN obteve um maior rendimento, ou seja, usinou uma maior quantidade de peças, expressado em metros usinados, tanto para a v_c de 55 m/min , quanto para a v_c de 66 m/min .

Observa-se também que quanto maior a v_c , menor será a vida da ferramenta, concordando com a literatura da área. Com este olhar, vale a pena ressaltar que a ferramenta revestida com TiAlN foi o que obteve maior diferença em vida entre $v_c = 55 \text{ m/min}$ e $v_c = 66 \text{ m/min}$, quando comparada com as demais ferramentas testadas, isto é, foi a ferramenta que maiores danos sofreu com o aumento da temperatura causado pelo aumento da velocidade de corte.

Vê-se que para o inserto revestido com TiCN+TiN, a diferença de vida entre as $v_c = 55 \text{ m/min}$ e $v_c = 66 \text{ m/min}$ é a menor quando comparado com os demais testados, ou seja, este material de cobertura foi aquele que mais resistência teve ao aumento da temperatura de corte causado pelo aumento da velocidade de corte.

Tem-se também que para a $v_c = 55 \text{ m/min}$, os insertos revestidos com TiAlN e TiCN+TiN obtiveram resultados próximos, com uma pequena vantagem para o TiCN+TiN. Já para a $v_c = 66 \text{ m/min}$, o TiCN+TiN obteve um resultado bem superior, comparado com os demais.

A ferramenta com pior desempenho em termos de vida foi a sem revestimento. Isto foi devido ao fato de que ela possui a menor micro-dureza, o maior coeficiente de atrito e a menor temperatura de trabalho dentre todos os materiais testados (Tab. 1). Portanto, a suposta maior estabilidade química dos elementos do metal duro sem cobertura em relação ao titânio e ao alumínio presentes nas camadas de cobertura não foi suficiente para fazer com que este material tivesse um desempenho superior em termos de vida de ferramenta.

O inserto revestido com AlCrN também não obteve um bom desempenho ao mecanismo de desgaste predominante nesta aplicação, ficando com o segundo de pior desempenho em ambos os testes realizados, ou seja, nas 2 Vc testadas. Observamos também que este revestimento suporta uma maior temperatura de trabalho máxima (1100°C), neste quesito, este revestimento é o melhor entre os demais testados, porém, acredita-se que esta característica positiva não teve um efeito satisfatório devido a aplicação, ou seja, usinagem de implantes dentários, onde o tempo de contato entre ferramenta e peça é muito curto (menos de 4 segundos). Ou seja, a vantagem que este tipo de revestimento tem em relação aos outros não prevaleceu para esta aplicação. Talvez na usinagem de titânio com maior tempo de contato com a peça, esta vantagem prevaleça. Outro ponto importante a se considerar também é o coeficiente de atrito, que também é um pouco maior em relação aos outros, o que dificulta a formação de cavaco, contribui para o desgaste prematuro de flanco.

A ferramenta que obteve a maior vida (metal duro com cobertura de TiCN+TiN) não tinha as melhores propriedades, pelo menos dentre aquelas citadas na Tab 1. Vê-se nesta tabela que este material possui a menor dureza dentre os revestimentos testados, o segundo menor coeficiente de atrito e a menor temperatura de trabalho entre os revestimentos testados. Então, não se pode usar estas propriedades para explicar o maior rendimento deste material.

Resta então responder à pergunta: por que uma ferramenta com dureza menor e menos resistente ao calor foi a que apresentou maior vida da ferramenta? Esta resposta pode ser dada pelo mecanismo de desgaste. Verificou-se durante a análise dos mecanismos de desgaste que o principal mecanismo de desgaste presente para todas as ferramentas e nas duas velocidades testadas foi a adesão (*Attrition*), ou seja, há indícios de que ocorreram movimentos cíclicos de material aderido sequenciado por arrancamento deste material aderido levando consigo grãos da ferramenta. A aparência superficial da ferramenta que sofre este mecanismo de desgaste é de uma superfície áspera e deformada devido à subtração de grãos.

Na Fig. 3 observamos uma análise em microscópio+EDS de um inserto sem revestimento utilizada neste trabalho com $v_c=55\text{m/min}$. Sabemos que não há Ti na ferramenta/recobrimento, e ainda encontramos pontos na ferramenta usada que possuem muito Ti aderido, comprovando assim que o mecanismo de desgaste *attrition* prevaleceu nesta aplicação. (as análises das demais ferramentas usadas no teste não serão mostradas neste trabalho por falta de espaço)

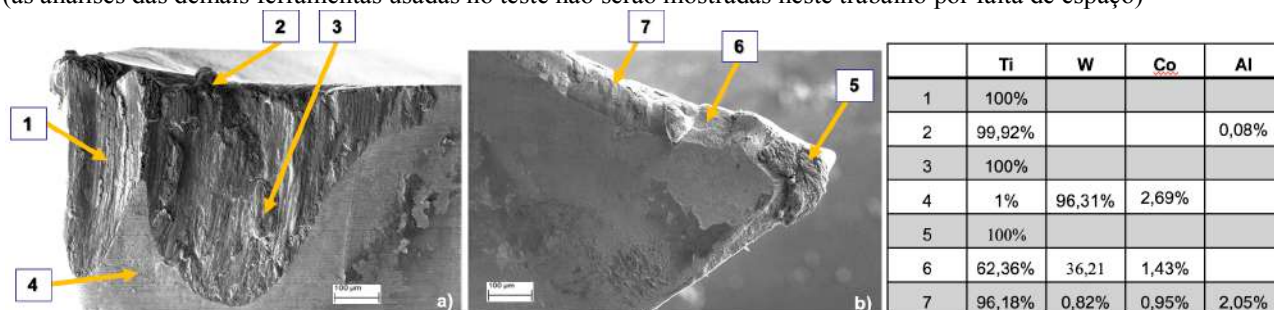


Figura 3 – Análise em microscópio do inserto usado sem revestimento e $v_c=55\text{m/min}$ - a) Superfície de folga da ferramenta b) Superfície de saída da ferramenta - sem escala (Autor)

Para resistir a este mecanismo, a ferramenta deve ter baixo coeficiente de atrito, para minimizar a aderência. A ferramenta que obteve a mais longa vida de todas (aquela com cobertura de TiN/TiCN) tinha baixo coeficiente de atrito, mas somente esta característica não explica tudo, já que a ferramenta com cobertura de TiAlN tinha coeficiente de atrito até menor. Outra característica importante para que a ferramenta resista ao *attrition* é a resistência das camadas ao fenômeno de remoção de partículas do revestimento e do substrato durante a ocorrência do *attrition*. Dentre as propriedades das ferramentas/revestimentos mostrados na Tab. 1 não existe nenhum que meça esta característica. Porém, pode-se apontar que uma ferramenta multi-camada como aquela com cobertura de TiN+TiCN, em que cada camada de cobertura tem espessura nanométrica, resiste mais a este arrancamento, devido à pequena espessura de suas camadas.

Também os valores de raio da aresta da ferramenta e de rugosidade da superfície do inserto não tiveram influência nos resultados de vida da ferramenta, já que a variação destes valores entre as diversas ferramentas não foi muito grande e a ferramenta que obteve maior vida não foi aquela que tinha os menores valores de raio de aresta e de rugosidade de sua superfície. Em trabalhos futuros, pode-se realizar algum tipo de acabamento nas superfícies da ferramenta a fim de se obter rugosidade bem mais baixa que aquelas obtidas neste trabalho e, assim testar-se a influência deste parâmetro na diminuição da aderência de material da peça/cavaco na ferramenta e, consequentemente, na diminuição da intensidade do mecanismo de *attrition* que resultaria em aumento de sua vida.

Para todas as aplicações, o critério de fim de vida foi o atingimento de $R_a = 0,8 \mu\text{m}$ na superfície torneada da peça, ou seja, não houve uma avaliação de condições de ferramentas nem medição de V_B durante o processo.

Após o término dos testes, os inserts foram avaliados para verificar o tipo de desgaste e medição de V_B . O desgaste V_B variou entre 0,12 mm e 0,50 mm no momento em que a R_a era $0,8 \mu\text{m}$. Assim, pode-se afirmar que o desgaste V_B não teve influência direta no aumento da rugosidade, mas sim algum outro tipo de desgaste da ferramenta que faça com que a forma da ponta da ferramenta varie. A Fig. 4 mostra o valor do desgaste V_B ao fim da vida da ferramenta encontrado em cada ferramenta utilizada no trabalho.

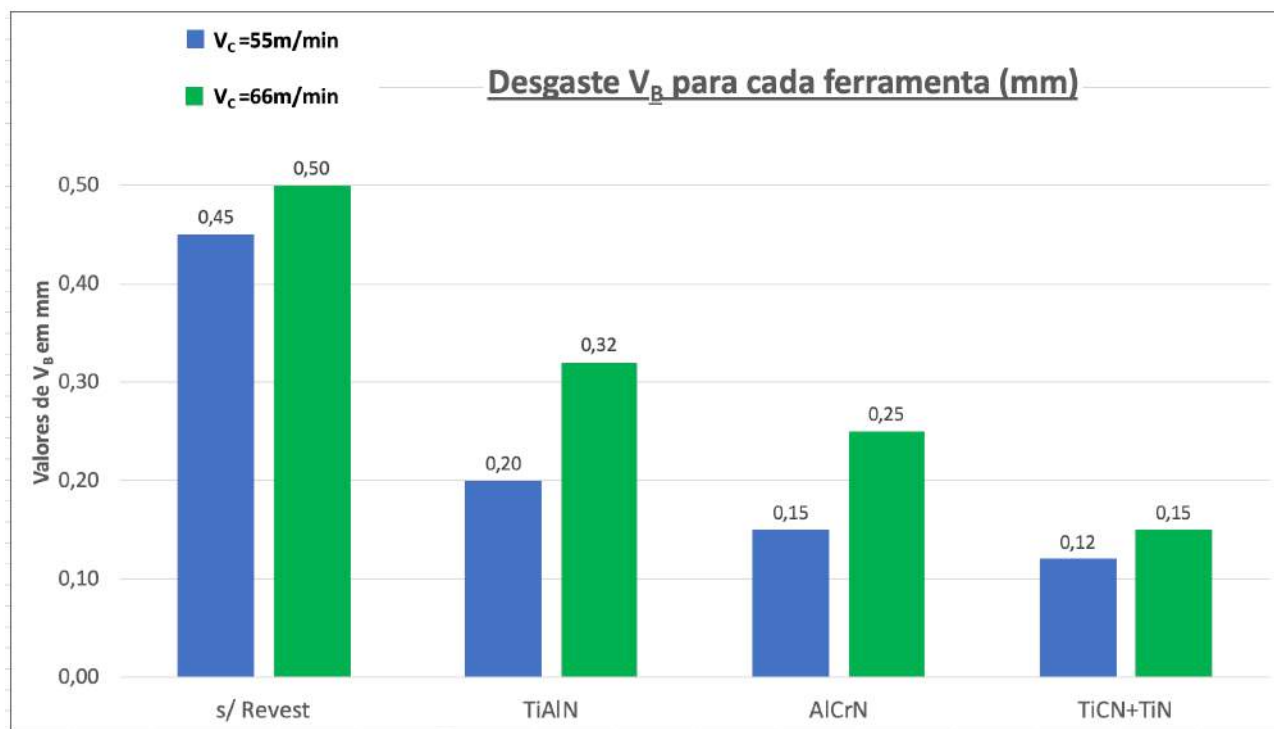


Figura 4 – Desgaste de flanco V_B para cada ferramenta (Autor)

Pode-se ver nesta Fig. 4 que a ferramenta que obteve a maior vida (metal duro com cobertura de TiCN+TiN) foi também aquela que apresentou o menor valor de desgaste de flanco ao fim de sua vida, nas duas velocidades de corte testadas. Isto aponta para o fato de que, se o critério de fim de vida fosse outro que não a rugosidade de $R_a = 0,8 \mu\text{m}$ (por exemplo, valor de $V_B = 0,3 \text{ mm}$), a ferramenta com cobertura de TiCN+TiN poderia continuar usinando e, assim, obter-se-ia vida ainda maior que aquela obtida nestes testes. Já a ferramenta sem cobertura estava completamente deteriorada quando a peça atingiu o critério de fim de vida estabelecido, com valores de V_B maiores que aqueles em que a ferramenta é usualmente substituída em operações com outros critérios de fim de vida.

A Tab. 2 mostra os preços (valores apenas de referência) de cada inserto testado. Vê-se nesta tabela que o TiCN+TiN, que é o inserto que obteve a maior vida em comprimento usinado, não é o inserto mais caro.

Tabela 2 - Análise de preços dos insertos e dos revestimentos (Autor)

	R\$ INSERTO	R\$ REVESTIMENTO	R\$ TOTAL	DIFERENÇA (%)
SEM REVEST.	R\$ 60,22	R\$ 0,00	R\$ 60,22	0%
TIALN	R\$ 60,22	R\$ 2,92	R\$ 63,14	5%
ALCRN	R\$ 60,22	R\$ 5,05	R\$ 65,27	8%
TICN+TIN	R\$ 60,22	R\$ 3,88	R\$ 64,10	6%

Fazendo uma relação direta com o preço unitário de cada inserto com a vida apurada de cada ferramenta medida em comprimento usinado, tem-se então o custo por metro usinado (R\$/m usin). A Tab. 3 mostra que o inserto revestido com TiCN+TiN obteve o menor valor em R\$/m usinado.

Tabela 3 - Análise do custo realizado em R\$/metro usinado (Autor)

	$V_c \text{ 55M/MIN}$	$V_c \text{ 66M/MIN}$
S/ REVEST.	R\$ 0,94/m usin	R\$ 1,77/m usin
TIALN	R\$ 0,58/m usin	R\$ 1,26/m usin
ALCRN	R\$ 0,99/m usin	R\$ 1,55/m usin
TICN+TIN	R\$ 0,47/m usin	R\$ 0,52/m usin

Para completar a análise de custo/benefício, deve-se considerar o tempo de troca e a frequência, ou seja, quantas trocas serão necessárias para cada inserto. Pode-se considerar que, quanto maior o comprimento usinado do inserto, menos trocas serão necessárias no mês, consequentemente, menos tempo de máquina parada ocorrerá por motivo de troca de ferramentas. Para este estudo, foi considerado 5 minutos para a troca do inserto, e o custo hora/máquina de R\$150,00 como sendo um valor estimado. O comprimento usinado para cada teste é de 11,27 mm e a produção horária é de 20 peças por hora. Considera-se também a produção de 3 turnos com 8h ininterruptos cada turno, Sendo assim, tem-se o seguinte resultado mensal mostrado na Tab. 4:

Tabela 4 - Análise custo/benefício mensal (Autor)

		COMPR USINADO MÉDIO EM METROS	Nº PEÇAS USIN NA MÉDIA	Nº DE INSERTO GASTOS NO MÊS	R\$ GASTO COM INSERTO	R\$ GASTO COM PARADAS DE MÁQUINA	R\$ TOTAL
V_c 55	Sem rev	32	2839,4	3,7	R\$ 223,96	R\$ 46,49	R\$ 270,45
	TiAlN	54	4791,5	2,2	R\$ 139,15	R\$ 27,55	R\$ 166,70
	AlCrN	33	2928,1	3,6	R\$ 235,39	R\$ 45,08	R\$ 280,47
	TiCN+TiN	68	6033,7	1,8	R\$ 112,19	R\$ 21,88	R\$ 134,06
V_c 66	Sem rev	17	1508,4	7,0	R\$ 421,58	R\$ 87,51	R\$ 509,09
	TiAlN	25	2218,3	4,8	R\$ 300,57	R\$ 59,51	R\$ 360,08
	AlCrN	21	1863,4	5,7	R\$ 369,90	R\$ 70,84	R\$ 440,74
	TiCN+TiN	62	5501,3	1,9	R\$ 123,04	R\$ 23,99	R\$ 147,04

Nestas condições, o TiCN+TiN utilizando $v_c = 55\text{m/min}$, obteve um maior comprimento usinado por aresta, consequentemente, a máquina irá parar menos vezes por mês para trocar o inserto, e o custo total com a ferramenta é de R\$134,06 mensal, ou seja, é a opção mais econômica apresentada. Quando se tem a opção de trabalhar com o mínimo custo possível, e que a máquina não seja gargalo na produção, esta opção se torna a mais viável.

O inserto com TiCN+TiN e $v_c = 66\text{m/min}$ obteve o segundo menor custo mensal com ferramenta para esta operação. Em casos em que a máquina é um gargalo na produção, a utilização desta ferramenta com esta velocidade de corte se torna a mais indicada. O comprimento usinado por aresta neste caso será um pouco inferior, 62 metros, porém, devido ao fato da velocidade de corte ser maior, o tempo de usinagem será menor e a utilização da máquina para usinar a demanda mensal de peças da empresa será também menor, o que é fator preponderante quando se tem uma máquina gargalo.

4. CONCLUSÕES

Na aplicação testada neste trabalho, o tempo de contato entre ferramenta/peça é considerado um tempo relativamente pequeno (3,1 segundos para $v_c = 55\text{m/min}$ e 2,6 segundos para $v_c = 66\text{m/min}$). Portanto, este fator deve ser considerado de grande importância na geração dos resultados deste trabalho. Para aplicações em que o tempo de contato for maior, os resultados podem ser diferentes.

Baseado nos resultados deste trabalho pode-se concluir para condições similares às aqui testada que:

- A dureza superficial da ferramenta influenciou pouco no resultado, pois a ferramenta de maior dureza superficial não obteve o melhor resultado.
- O coeficiente de atrito encontrado na superfície das ferramentas influenciou os resultados, pois as ferramentas que obtiveram os melhores resultados são as de menor coeficiente de atrito.
- O desgaste de flanco (V_B) gerado na ferramenta não teve nenhuma relação com a rugosidade da peça, pois com critério de fim de vida da ferramenta utilizado (R_a da peça igual a $0,8\text{ }\mu\text{m}$), o V_B variou entre $0,12\text{ mm}$ e $0,50\text{ mm}$.
- O raio de aresta e a rugosidade superficial do inserto não influenciaram nos resultados do teste realizado.
- Com o aumento da velocidade de corte, teve-se redução na vida da ferramenta.
- Quando se utilizou revestimento de TiCN+TiN observou-se que o desgaste V_B no momento de fim de vida foi muito baixo, ou seja, se o critério de fim de vida da ferramenta fosse o valor V_B , e a rugosidade da peça não fosse importante, seria possível continuar usinando com este inserto.
- O inserto sem revestimento obteve a menor vida devido às suas piores propriedades (menor dureza superficial, grande coeficiente de atrito e menor temperatura máxima de trabalho).

- A ferramenta que apresentou a maior vida dentre todas as testadas foi aquela recoberta com TiN/TiCN. Supõe-se que isto ocorreu porque, devido ao seu baixo coeficiente de atrito e ao fato de ser multi-camadas e com camadas de revestimento de espessura nanométrica, que fez com que ela resistisse ao principal mecanismo de desgaste, *attrition*, que incluía aderência de material sobre ela (baixo coeficiente de atrito) e arrancamento de suas partículas (devido à pequena espessura de suas camadas).
- A ferramenta com revestimento de TiCN+TiN é a mais indicada para a usinagem de titânio comercialmente puro grau 4 para qualquer velocidade de corte utilizada.

5. REFERÊNCIAS

- Leyens C., Peters M.. Titanium and Titanium alloys; Fundamental and application, 2003, WILEY-VCH, Germany, ISBN 3-527- 30534-3.
- David A. Stephenson, John S. AGAPIOU (2016) Livro *“Metal Cutting Theory and practice”*, third edition. Editora CRC press, Taylor & Francis Group
- Diniz, A.E., Marcondes, F.C., Coppini, N.L., 2003, Tecnologia da Usinagem dos Materiais, 9. ed., Artliber Editora, São Paulo, 151-170p
- Jahedi, M. Z., Zahiri, S. H., Gulizia, S., Tiganis, B., Tang, C., Fraser, D., 2009, “Direct Manufacturing of Titanium Parts by Cold Spray”, Materials Science Forum.
- Khan, A., Maity, K., 2017, “Comparative Study of Some Machinability Aspects in Turning of Pure Titanium with Untreated and Cryogenically Treated Carbide Inserts”, Journal of Manufacturing Processes vol. 28 pp. 272-284.
- Trent, E. M.; Wright, P. K. Metal Cutting, 4. ed, Woburn: Butterworth-Heinemann, 2000.
- Wang, M, Zang, Y., 1988, “Diffusion wear in milling titanium alloys”, Materials Science and Technology, vol. 4, n. 6, pp. 548-553.

6. RESPONSABILIDADE PELAS INFORMAÇÕES

Os autores são os únicos responsáveis pelas informações incluídas neste trabalho.

ANALYSIS OF TYPES OF CARBIDE TOOLS WITH AND WITHOUT COATING IN THE TITANIUM TURNING OF COMMERCIALLY PURE GRADE 4

Carlos Vinicius Lemes

Anselmo Eduardo Diniz

Universidade Estadual de Campinas, FEM, R. Mendeleyev, 200 - Cidade Universitária, Campinas - SP, 13083-860, Brasil
carloslemes2@hotmail.com ; anselmo@fem.unicamp.br

Abstract. The increasing use of titanium and its alloys in the manufacture of implants results from the simultaneous presence of excellent biocompatibility, relatively low density, high mechanical properties and corrosion resistance. Unlike the excellent application characteristics, the machining of titanium is considered bad, that is, classified as material of difficult machinability. The constant challenge for implant manufacturers is to apply turning tools with the correct application and the best cost-benefit ratio in the machining process. This work aims to compare the useful life of the uncoated insert with other 3 types of coatings on carbide tools, coatings used and recommended by some suppliers. Turning experiments were performed using grade 4 commercially pure titanium (typically used in dental implants), testing 2 cutting speeds for each tool used. The tests were carried out in a CNC rotary head lathe, using full cutting fluid in abundance. The results demonstrated that the TiN+TiCN double layer coating obtained the best service life and, consequently, the best cost-benefit ratio among the 4 tested inserts. This is due to the fact that it is an insert with multilayer structure coating, and it better resists the wear mechanism that occurs predominantly in this application, which is Attrition. Even with the increased cutting speed, this coating also achieved the best result.

Keywords: titanium, carbide, turning, coating, machinability

RESPONSIBILITY NOTICE

The author(s) is (are) the only responsible for the printed material included in this paper.