

REVISÃO DA LITERATURA SOBRE A USINABILIDADE DO TITÂNIO E SUAS LIGAS

Danian Henrique Oestreich, danian.henrique@ufrgs.br¹

Amauri Mosquen, amauri.mosquen@ufrgs.br¹

Doglas Rafael Stoffel, doglasstoffel@yahoo.com.br¹

André João de Souza, ajsouza@ufrgs.br¹

¹Universidade Federal do Rio Grande do Sul – UFRGS, Departamento de Engenharia Mecânica – DEMEC, Rua Sarmento Leite, 425 – Centro – CEP: 90050-170 – Porto Alegre, RS.

Resumo: *O titânio e suas ligas possuem baixa densidade aliada a uma alta resistência mecânica, mesmo em altas temperaturas. Com isso, se apresentam como ótimas soluções e recebem grande importância nas indústrias química, naval, aeroespacial, nuclear, bélica e biomédica. Com este enfoque, o trabalho em questão visa revisar de maneira qualitativa o principal problema intrínseco ao uso destas ligas: a sua difícil usinabilidade - causada por sua alta reatividade química e baixa condutividade térmica, que gera elevadas temperaturas na zona de corte e, conseqüentemente, problemas de desgaste por difusão. As altas pressões de corte e elevada dureza a quente causam danos prematuros à ferramenta enquanto que, por fim, o baixo módulo de elasticidade deste material acarreta em um alto nível de vibração dificultando o corte e danificando a ferramenta. Dentre as diferentes soluções conhecidas para tais problemas, abordou-se a utilização de meio lubrificante em alta pressão, a usinagem em altas velocidades de corte, a aplicação de lubrificante criogênico, a utilização de ferramentas rotativas e os métodos não-convencionais de usinagem (usinagem eletroquímica, fresamento químico e corte laser). Assim, pretende-se mostrar as dificuldades (e respectivas causas) encontradas, ressaltando a interação dos fatores (material da ferramenta, técnica de usinagem e meio de refrigeração) como solução para a usinagem de tais ligas.*

Palavras-chave: *usinabilidade, titânio, ferramenta rotativa, lubrificante em alta pressão, lubrificante criogênico.*

1. INTRODUÇÃO

Devido ao crescente avanço da tecnologia de materiais, a pesquisa em novas técnicas de processamento de ligas de alto desempenho torna-se cada vez mais constante. Dentre tais ligas estão as de titânio. Diversos benefícios são associados ao seu uso, tais como elevadas temperaturas de fusão, alta dureza a quente, excelentes propriedades mecânicas, alta resistência à corrosão, ótima razão resistência/peso e biocompatibilidade. Além disso, as ligas de titânio apresentam em geral resistência mecânica comparável à dos aços, com cerca de 50% de sua densidade e resistência mecânica 400% superior às ligas de alumínio, com densidade apenas 50 % superior (Antoniali, 2009).

A partir da década de 1950, estas vantajosas propriedades conduziram a uma ampla e crescente aplicação das ligas de titânio pela indústria aeroespacial, mesmo que sua obtenção tenha um custo relativamente alto. O preço elevado das ligas de titânio é consequência da complexidade de extração do material, das dificuldades de fundição e da sua baixíssima usinabilidade além, é claro, da atual demanda de mercado. Entretanto, a produção destas ligas continua a crescer ano a ano, sendo que a maior parte dos componentes fabricados a partir delas é usinada, devido principalmente às inúmeras exigências de projeto da indústria aeroespacial que, geralmente, não são atendidas por processos de conformação plástica (Ribeiro, 2003)

A utilização das ligas de titânio se dá em diversos componentes fabricados pela indústria aeroespacial, sendo sua principal aplicação nas turbinas a gás (Antoniali, 2009). Nesta situação, a temperatura de operação é superior a 500°C, o que impede a utilização de outros materiais além das superligas de titânio ou níquel (Ezugwu *et al.*, 2003). A Figura (1) ilustra o aumento da participação das ligas de titânio na massa total das turbinas fabricadas a partir da década de 50.

Embora as ligas de titânio sejam extensivamente utilizadas pela indústria aeroespacial, vale salientar que graças à sua excelente biocompatibilidade, boa parte das suas aplicações está associada à indústria biomédica. A crescente utilização das ligas de titânio como biomateriais pode ser atribuída à sua excelente resistência à corrosão, ao seu baixo módulo de elasticidade, à sua atoxicidade e, principalmente, à ausência de reação alérgica quando em contato com tecidos vivos (Antoniali, 2009). A Figura (2) ilustra uma prótese fabricada em liga de titânio.

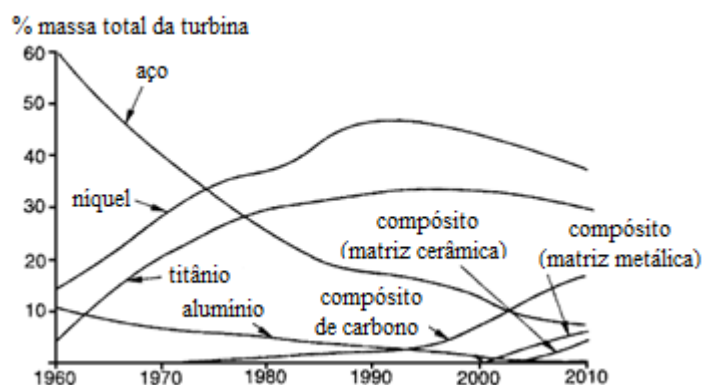


Figura 1. Evolução da porcentagem em massa das ligas de titânio nas turbinas (Ezugwu *et al.*, 2003)

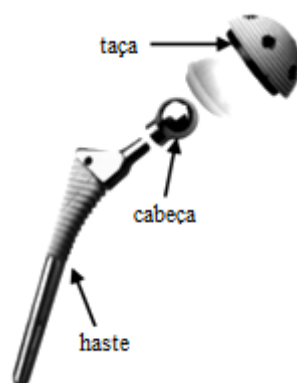


Figura 2. Prótese da articulação coxofemoral fabricado em liga de titânio (Antoniali, 2009).

A liga Ti-6Al-4V é muito utilizada na fabricação de componentes biomecânicos, em especial, articulações (Fig. 2), por possuir um excelente compromisso entre resistência à corrosão e resistência mecânica, especialmente em termos de resistência à fadiga. Outras ligas também vêm sendo utilizadas na indústria biomédica por possuírem baixo módulo de elasticidade, além da possibilidade do aumento da resistência mecânica através do tratamento de envelhecimento (Niinomi, 2003). Exemplos dessas ligas incluem a classe de titânio denominada tipo β , como as liga Ti-13Nb-13Zr, Ti-5Mo-5Zr-3Al e Ti-29Nb-3Ta-4,5Zr, que além de exibirem baixo módulo elástico combinado com alta resistência mecânica, exibem ainda elevada biocompatibilidade (Aleixo *et al.*, 2006).

O titânio e suas ligas têm grande gama de aplicação, como supracitado. Porém, deve-se salientar o grande problema associado ao seu uso: a grande dificuldade na sua usinabilidade, diretamente associada às propriedades desse material, como a elevada dureza em altas temperaturas, a baixa condutividade térmica, o baixo módulo de elasticidade e a alta reatividade química (Antoniali, 2009). Com isso, é necessário um estudo das vantagens, desvantagens e soluções envolvidas na usinagem de produtos em titânio.

2. USINABILIDADE DOS MATERIAIS

Segundo Diniz *et al.* (2003), usinabilidade pode ser definida como uma grandeza tecnológica que expressa, por meio de um valor numérico comparativo, o índice de usinabilidade, um conjunto de propriedades de usinagem de um material em relação a outro tomado como padrão. A usinabilidade de um material está associada com pelo menos um dos seguintes fatores: a vida da ferramenta de usinagem, a taxa máxima de remoção de material, os esforços de corte, o acabamento superficial e as características do cavaco.

Já Stemmer (1995) define usinabilidade como a propriedade dos materiais de se deixarem trabalhar com ferramentas de corte. Explica que materiais de difícil usinagem oferecem problemas tais como desgaste rápido ou superaquecimento da ferramenta, “empastamento” ou “engate” da ferramenta pelo material da peça, “lascamento” da aresta cortante, mau acabamento da superfície usinada, necessidade de grandes forças ou potências de corte etc.

A usinabilidade dos materiais pode ser avaliada em termos de vida da ferramenta (normalmente o mais importante), forças atuantes na ferramenta, potência consumida, acabamento superficial e formação do cavaco (Stemmer, 1995).

Em usinagem, a vida útil é geralmente expressa como o número de peças processadas por troca ou afiação da aresta de corte. Em geral, o objetivo do engenheiro é conseguir a combinação ideal entre desempenho da ferramenta, número de peças fabricadas e qualidade superficial da peça para uma dada operação de usinagem. Esta condição otimizada resulta em um aumento na taxa de produção e uma redução no custo da operação.

Na usinagem convencional, um dos principais parâmetros de corte relacionados com o desgaste da ferramenta é a velocidade de corte, que por sua vez está relacionada com a temperatura gerada na usinagem.

Machado *et al.* (2009) explicam que o titânio, quando ligado a alumínio (Al), manganês (Mn), estanho (Sn) ou vanádio (V), produz ligas de baixa densidade com excelente resistência mecânica e à corrosão, o que dificulta a usinagem. As elevadas temperaturas geradas na usinagem destas ligas são a principal razão para o desgaste acelerado das ferramentas (baixo tempo de vida), além de haver perigo de combustão durante a operação de corte. Sendo assim, são geralmente recomendadas velocidades de corte reduzidas no sentido de limitar as temperaturas de corte associadas à usinagem destas ligas. Porém, favorecem a formação de aresta postiça de corte.

No entanto, além de aumentar a produtividade, a utilização de altas velocidades na usinagem apresenta vantagens em relação à usinagem convencional, como: aumento de precisão, melhoria do acabamento superficial, redução da zona termicamente afetada pelo processo, redução de rebarbas e possibilidade do aumento da estabilidade do corte (Rahman *et al.*, 2003).

Esta relação dos parâmetros na usinagem convencional com a produtividade faz com que o estudo da usinabilidade das ligas tenha relevância, tanto na tentativa de ajustar os parâmetros, assim como, na busca de alternativas economicamente viáveis em processos não convencionais como usinagem eletroquímica (UEQ), o fresamento químico (FQ) e o feixe de laser (FL) (Infomet, 2010).

3. METALURGIA DAS LIGAS DE TITÂNIO

Historicamente já foi comprovado que o titânio e suas ligas são materiais de difícil usinagem. A maior parte desta dificuldade surgiu com o freqüente uso de titânio pela indústria aeronáutica. Igualmente, é fato também comprovado que os diversos tipos de titânio comercialmente puro (ASTM B, graus 1, 2, 3 e 4) com resistência à tração entre 241 e 552 MPa são muito mais fáceis de usinar do que as ligas comerciais de aviação tais como a liga Ti-6Al-4V. Elementos de liga que são adicionados ao titânio tornam o processo de usinagem mais difícil, assim como ocorre em outros tipos de materiais. Contudo, em geral, se as características peculiares das ligas de titânio forem levadas em consideração, a usinagem desse tipo de material não deve apresentar problemas indevidos ou insuperáveis (Infomet, 2010).

Analisando as forças de usinagem necessárias para cortar titânio, observa-se que estas são um pouco maiores que as necessárias ao corte de aço, por exemplo; mas as propriedades metalúrgicas que estas ligas possuem fazem com que a usinagem se torne mais complexa do que de outros metais com dureza equivalente (Infomet, 2010).

Conforme Ezugwu and Wang (1997), o titânio apresenta duas formas alotrópicas: uma estrutura cristalina hexagonal compacta (HC) a temperatura ambiente, chamada fase alfa (α), que se transforma alotropicamente para cúbica de corpo centrado (CCC), a 882°C, chamada fase beta (β). Elementos de liga nas ligas de titânio tendem a estabilizar sua fase α ou sua fase alotrópica β , modificando a temperatura de transição. Elementos que aumentam a temperatura de transição são chamados de α -estabilizadores, podendo citar como exemplo o alumínio (Al), oxigênio (O), nitrogênio (N) e o carbono (C). O Al endurece a fase α em temperaturas até 550°C, tendo como grande vantagem sua baixa densidade. Elementos como O, N e C são tidos como impurezas em ligas comerciais; contudo, O é utilizado como “endurecedor”, propiciando diversas combinações de dureza e capacidade de fabricação das ligas. Elementos que diminuem a temperatura de transição são chamados de β -estabilizadores, sendo mais relevantes o molibdênio (Mo), Vanádio (V) e nióbio (Nb).

De acordo com Knoll and Schaeffer (2006), as ligas de titânio podem então ser classificadas em três grupos de acordo com suas propriedades metalúrgicas básicas: ligas α , ligas α - β e ligas β . As ligas α contêm α -estabilizadores algumas vezes combinados com elementos neutros. Possui pouca relevância comercial tendo boas propriedades mecânicas em temperaturas até 300°C e utilização principal em aplicações que exigem resistências a corrosão e criogênica. As ligas α - β contêm α -estabilizadores e β -estabilizadores e são as ligas mais comuns, representando aproximadamente 45% do total da produção de titânio. Podem ser tratadas termicamente e são principalmente utilizadas em aplicações que exigem alta resistência em elevadas temperaturas (entre 350 e 400°C). As ligas β contêm β -estabilizadores e são caracterizadas por sua alta dureza. Pode-se dizer que apresentam resistência mecânica equivalente a das ligas α - β em temperatura ambiente, e inferior a altas temperaturas.

A Tabela (1) mostra a classificação de algumas ligas de titânio, de acordo com os elementos utilizados.

Tabela 1. Classificação das ligas de titânio (Knoll and Schaeffer, 2006)

Alfa (α)	Alfa-Beta (α - β)	Beta (β)
Ti -0,2Pb	Ti-6Al-4V	Ti-13V-11Cr-3Al
Ti-5Al-2,5Sn	Ti-8Mn	Ti-Al-8V-5Fe
Ti-8Al-Mo-V	Ti-7Al-4Mo	
Ti-6Al-2Co-Ta-Mo	Ti-4Al-3Mo-V	
Ti-6Al-2Sn-4Zr-2Mo	Ti-3Al-2,5V	

A liga de titânio mais utilizada comercialmente é a liga α - β , Ti-6Al-4V, cuja composição química pode ser observada na Tab. (2).

Tabela 2. Composição química da liga Ti-6Al-4V segundo a norma ASTM B 381-71 (Knoll and Schaeffer, 2006)

Elementos	Al	V	Fe	C	N	H	C	Outros	Ti
Teor (% em peso)	5,50-6,75	3,50-4,50	Máx. 0,40	Máx. 0,20	Máx. 0,05	Máx. 0,125	Máx. 0,10	Máx. 0,40	Balanço

Esta liga contém 6% de Al que estabiliza a fase α . A adição de 4% de V aumenta a resistência mecânica por dois mecanismos: por solução sólida e por estabilizar a fase β a temperatura ambiente (Knoll and Schaeffer, 2006).

Uma comparação entre a liga Ti-6Al-4V com seus diferentes tratamentos térmicos e um aço-carbono médio (AISI 1045) feita por Ezugwu and Wang (1997) é apresentada na Tab. (3).

Tabela 3. Comparação entre a liga Ti-6Al-4V e um aço AISI 1045 (Ezugwu and Wang, 1997)

Material	Tensão de ruptura [MPa]	Tensão de escoamento [MPa]	Módulo de Young [GPa]	Dureza [HV]	Densidade [g/cm ³]	Condutividade térmica [W/m.K]
Ti-6Al-4V (barra recozida)	895	825	110	340	4,43	7,3
Ti-6Al-4V (solubilizado e envelhecido)	1035	965	---	360	---	7,5
AISI 1045 (trefilado)	625	530	207	179	7,84	50,7

4. PROBLEMAS ASSOCIADOS À USINABILIDADE DO TITÂNIO

Dentre os diversos estudos sobre usinagem de materiais avançados (ligas termorresistentes e superligas), os fatos mais estudados são os problemas e dificuldades na usinagem desses materiais. Eles são geralmente resultados de aprimoramentos metalúrgicos em ligas já existentes em busca de melhores relações resistência mecânica/ peso e resistência mecânica a quente/ resistência à corrosão. Tais materiais apresentam resistência mecânica acima da maioria das ligas e podem mantê-la em temperaturas mais altas; conseqüentemente, a formação de cavacos torna-se bastante difícil, se comparada à maioria da ligas metálicas. Ademais, elas têm baixa condutividade térmica, tendem a se soldar facilmente às arestas da ferramenta de corte e a endurecer por deformação, além de ter elementos altamente reativos e alta porcentagem de carbonetos dispersos na microestrutura – todas péssimas características para as operações de usinagem (Machado *et al.*, 2009).

Com as ligas de titânio não é diferente. Rahman *et al.* (2003), ao analisarem a liga mais aplicada atualmente na indústria aeroespacial (Ti-6Al-4V), descobriram que sua usinabilidade é dificultada por sua alta reatividade química com o material da ferramenta e sua baixa condutividade térmica (aproximadamente 7,3 W/m.K) gerando uma alta temperatura entre cavaco, ferramenta e peça, favorecendo assim os mecanismos de difusão, Fig. (3). Também se percebe que da totalidade do calor gerado no processo, cerca de 80% é retido pela ferramenta e 20% no cavaco, sendo que o tipo do cavaco gerado na usinagem desta liga é sempre segmentado independente das condições de corte.

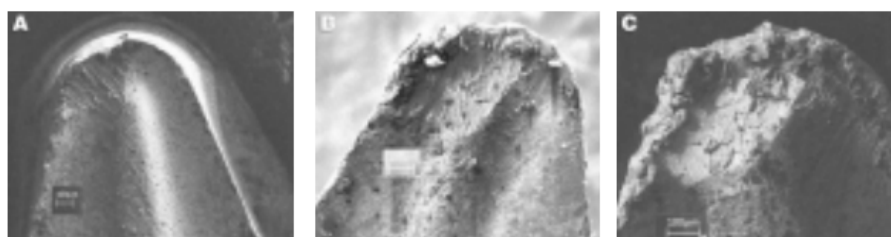


Figura 3. Caracterização de desgaste ferramenta ISO S15 no corte de titânio a diferentes velocidades de corte: A) 85 m/min B) 100 m/min C) 120 m/min (Moreira *et al.*, 2004)

A Figura (4) mostra uma relação entre a distribuição percentual de temperatura cavaco-ferramenta de acordo com o material da ferramenta (cerâmica, aço-rápido, metal-duro P10, Stellite, metal-duro K10/K20 e diamante) para o aço AISI 1045 e a liga Ti-6Al-4V.

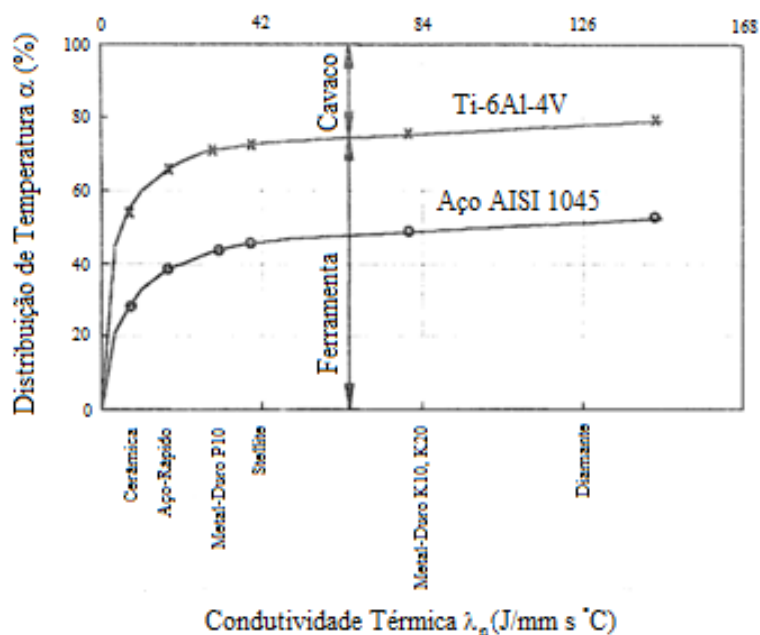


Figura 4. Distribuição de temperaturas cavaco-ferramenta (Rahman *et al.*, 2003)

Segundo Ezugwu *et al.* (2003), outro problema enfrentado na usinagem é a alta pressão de corte exigida no processo. As forças de corte exigidas são parecidas com as dos aços e a potência é por sua vez igual ou até mesmo menor em comparação com de outros materiais de mesma dureza. O problema surge nas proximidades da aresta de corte devido à pequena área de contato do cavaco com a ferramenta na superfície de saída. Adicionalmente pode-se citar ainda a alta resistência a deformação apresentada pelo titânio em altas temperaturas (acima de 800°C).

O titânio possui um módulo de elasticidade relativamente baixo apresentando, portanto, um “efeito mola” mais acentuado que os aços. A peça de titânio apresenta a tendência de se afastar da ferramenta de corte, a não ser que se mantenham cortes pesados ou que um apoio adequado seja utilizado. Cavacos menos espessos tendem a se dobrar sob as pressões utilizadas na ferramenta causando vibrações, fricção com a ferramenta e problemas relacionados com tolerâncias dimensionais. Por conseguinte, a rigidez do sistema completo é muito importante, assim como o uso de ferramentas afiadas e com formato apropriado (Infomet, 2010)

As propriedades de fadiga do titânio são fortemente influenciadas por uma tendência ao dano nas superfícies se determinadas técnicas de usinagem forem utilizadas. Em geral esses danos surgem sob a forma de microtrincas, acúmulos de material em arestas, deformação plástica, zonas termicamente afetadas e tensões residuais. Deve-se ter cuidado para evitar perda de integridade na superfície, especialmente durante polimento ou lixamento. As propriedades de fadiga básicas de muitas ligas de titânio dependem de uma tensão superficial compressiva favorável induzida pela ação da ferramenta durante a usinagem. A remoção eletromecânica de material, produzindo uma superfície isenta de tensões, pode causar certa perda de propriedades de resistência à fadiga (Infomet, 2010).

5. SOLUÇÕES NA USINAGEM DO TITÂNIO

No escopo do trabalho, serão apresentadas nos itens que se seguem quatro diferentes soluções para a usinagem de ligas de titânio: 1) utilização de fluido refrigerante de alta pressão; 2) aplicação de lubrificador refrigerante criogênico; 3) utilização de ferramentas rotativas; 4) aplicação de métodos não-convencionais de usinagem.

5.1. Utilização de Fluido Refrigerante de Alta Pressão

Rahman *et al.* (2003) citam que as ligas de titânio possuem características intrínsecas que promovem uma alta taxa de desgaste da ferramenta, provenientes de altas temperaturas que surgem na região de interface peça-ferramenta. Os desgastes de ferramenta precisam ser controlados ao longo do processo para, no final, obter uma alta eficiência na remoção de material.

Assim, a fim de aumentar a produtividade na usinagem de ligas de titânio, técnicas eficientes de arrefecimento foram estudadas, reduzindo a temperatura na região de corte. O uso de arrefecimento criogênico (item 5.2) é um excelente método adotado atualmente em processos de usinagem para a diminuição da temperatura na região de corte (Ezugwu *et al.*, 2003).

Outra técnica utilizada é de arrefecimento de alta pressão. Em HPC (do inglês *High-Pressure Coolant*), um jato de alta velocidade de fluido de corte é direcionado para a interface peça-ferramenta, retirando o calor diretamente da região de corte. O objetivo é atingir uma lubrificação refrigeração hidrodinâmica, de modo que a temperatura induzida pelo desgaste da ferramenta pode ser suprimida de forma eficaz, auxiliada pela alta pressão e velocidade adquirida pelo fluido. Observa-se ainda que, quando devidamente direcionado, o jato de alta pressão ajuda na remoção do cavaco, reduzindo assim as forças de usinagem (Rahman *et al.*, 2003)

Experimentos com HPC foram iniciados em 1952 por R. J. S. Pigott e A. T. Colwell com o trabalho “*Hi-Jet System for Increasing Tool Life*” e continuados cronologicamente de acordo com a evolução dos processos de usinagem. Inicialmente aplicados em aços, os resultados do uso de HPC foram: melhorias substanciais na vida da ferramenta, no acabamento superficial, na precisão dimensional, além de uma redução drástica da temperatura da zona de corte, das forças de corte e também do coeficiente de atrito na interface peça/ferramenta. Já para ligas de titânio, os testes com HPC foram iniciados por Kovacevic em 1995, por Machado em 1998 e por Lopez em 2000, tendo eles encontrado os mesmos resultados alcançados por Pigot e Colwell em 1952 trabalhando com aço. Atualmente as pesquisas se voltam para o estudo da interação entre os processos HPC e de usinagem em altas velocidades (Rahman *et al.*, 2003).

5.2. Aplicação de Lubrificante Criogênico

De acordo com Venugopal *et al.* (2007), outra estratégia para diminuir as elevadas taxas de desgaste é a aplicação de um fluido lubrificante com grande capacidade de arrefecimento. Isso pode ser feito, por exemplo, através da aplicação de nitrogênio líquido (LN₂), que possui excelente capacidade refrigerante aliada ao fato de não ser agressivo ao meio ambiente.

Conforme Ezugwu *et al.* (2003), uma maneira de se aumentar a eficiência da refrigeração é ainda utilizar um sistema com bocal duplo para alimentação do fluido de corte, um deles direcionado na interface de corte, sobre a superfície de saída e outro na superfície secundária de folga (Fig. 5).

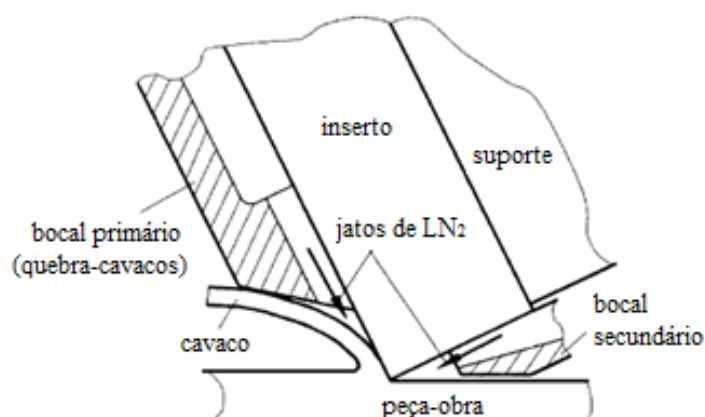


Figura 5. Esquema de refrigeração com LN₂ utilizando bocal duplo (Ezugwu *et al.*, 2003).

Na usinagem com LN₂ como fluido lubrificante, as forças de corte aumentam devido ao aumento na dureza do material a baixas temperaturas (Ezugwu *et al.*, 2003). Contudo, os autores verificaram experimentalmente que quando em comparação com a refrigeração convencional, houve uma diminuição na taxa de desgaste de cinco vezes, aumentando consideravelmente o tempo de vida da ferramenta de corte.

5.3. Utilização de Ferramentas Rotativas

Como já anteriormente citado, um dos grandes problemas da usinagem do titânio se deve a sua baixa condutividade, o que acaba por gerar temperaturas extremamente elevadas na região de corte, o que, aliada a sua alta reatividade química, acaba por desgastar as ferramentas de corte rapidamente.

Em meio a este problema, surge uma nova proposta, a da utilização de ferramentas rotativas. Existem muitos tipos de ferramentas rotativas, mas basicamente podem ser classificadas em: ferramentas rotativas ortogonais (eixo da ferramenta paralelo a velocidade de avanço) ou, em outro caso, ferramentas oblíquas.

Segundo Lei e Liu (2002), o torneamento com ferramentas rotativas é um processo onde a aresta de corte da ferramenta gira em torno de seu eixo (Fig. 6), fazendo com que a região do gume de corte em contato com a peça seja continuamente alterada. Conseqüentemente, isso permite uma refrigeração contínua desta região. Como exemplo, os autores citam a redução de até 500°C na usinagem de aços comuns.

Lei e Liu (2002) realizaram alguns testes com uma ferramenta rotativa desenvolvida para o experimento e concluíram que a vida nominal desta aumentou 64 vezes em relação a uma estacionária. Quando o resultado foi normalizado apenas para o comprimento da aresta em contato com a peça, o aumento da vida absoluta foi de 70%. Por fim, observaram ainda que uma vez montada, a ferramenta rotativa pode cortar por um longo período antes de ela ser

substituída, o que resulta em uma alta produtividade. Em contraste, as ferramentas estacionárias possuem tempo de vida muito inferior, e conseqüentemente maior tempo de *setup*, resultando, portanto em menor produtividade.

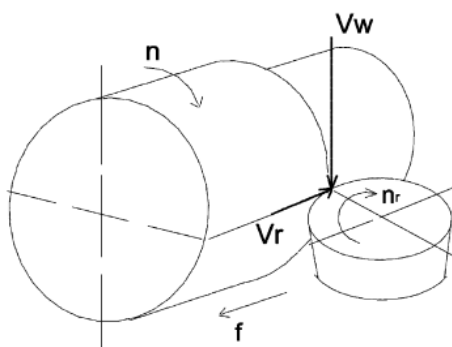


Figura 6. Esquema de uma ferramenta rotativa oblíqua, onde: n – rotação da peça; n_r – rotação da ferramenta; f – avanço da ferramenta; V_r – velocidade de rotação; V_w – velocidade de corte (Lei e Liu, 2002).

5.4. Métodos Não-Convencionais de Usinagem

O projeto de componentes de ligas de titânio pode ainda requerer o uso dos chamados métodos não-convencionais de usinagem, como exemplo, pode-se citar a usinagem eletroquímica (UEQ), o fresamento químico (FQ) e o feixe de laser (FL) (Infomet, 2010).

A usinagem eletroquímica (UEQ) é um processo não-convencional muito importante e relativamente novo (década de 90) no qual o principal objetivo é a remoção de material realizado através do escoamento a alta velocidade do eletrólito entre uma ferramenta catódica e uma peça anódica, segundo um perfil apresentado por uma ferramenta (eletrodo). A UEQ baseia-se no princípio inverso da eletrólise em que a reação eletroquímica ocorre entre um material metálico e um meio de ação, ou seja, funciona por remoção e transporte, átomo a átomo, do metal usinado, mergulhado numa solução eletrolítica. Porém, não é levada em conta a capacidade de a solução eletrolítica dissolver o metal. A energia, que é de natureza elétrica, provém de uma fonte externa. Nesse tipo de usinagem não existe contato entre peça e ferramenta, porque a remoção do material ocorre por eletrólise. Por isso, a usinagem eletroquímica é considerada como um processo de usinagem a frio. No caso das ligas de titânio em geral se utiliza como eletrólito o cloreto de sódio em concentrações da ordem de 100 g/l. As grandes vantagens da UEQ são a remoção de material sem geração significativa de calor e sem desgaste da ferramenta com controles da quantidade de material removido e da velocidade de retirada do material; a usinagem de materiais condutores muito resistentes e sensíveis ao calor que são difíceis de usinar por processos tradicionais; a obtenção de formas geométricas complexas; a geração de superfícies quase espelhadas (rugosidades inferiores a 1 μm); boa repetitividade e boa reprodutibilidade. A principal aplicação está na remoção seriada de formas complicadas de rebarbas em locais de difícil acesso em lotes de peças (Infomet, 2010; Kalpakjian e Schmid, 2010; Klock e König, 2007).

O fresamento químico (FQ) foi desenvolvido a partir da observação de que os produtos químicos atacam e causticam a maioria dos metais, pedras e algumas cerâmicas, removendo assim pequenas quantidades de material da superfície. O processo consiste na dissolução controlada do material da peça por contato com um forte reagente químico. A reação entre a peça e o agente químico resulta em um produto volátil de fácil remoção. A peça a ser usinada é submetida a uma limpeza e as partes onde não se deseja usinar são cobertas com uma máscara resistente à reação química. As regiões nas quais se deseja a reação química são expostas quando o material é mergulhado no reagente químico, que então somente dissolve estas regiões resultando na peça final requerida. No processo, cavidades rasas podem ser produzidas em placas, chapas, forjados e extrudados para redução de peso. O processo tem sido usado em uma ampla variedade de metais, com profundidades de remoção de até 12 mm. O ataque seletivo pelo reagente químico em diferentes áreas da superfície da peça é controlado por camadas de material removível ou por imersão parcial no reagente. O FQ é utilizado na indústria aeroespacial para remover as camadas superficiais do material de componentes de grande porte para aviões, painéis externos (casca) de mísseis e peças extrudadas para fuselagens. As capacidades dos tanques para os reagentes chegam a 3,7 m x 15 m. O processo também é usado para fabricar dispositivos microeletrônicos. Em termos de capacidade do processo, as superfícies usinadas de ligas de titânio por fresamento químico apresentam rugosidade R_a na faixa de 0,1 a 0,8 μm e tolerância dimensional de 12,5 a 25 μm . Alguns danos na superfície podem ser gerados principalmente por causa do reagente e/ou pelo ataque intergranular, que alteram as propriedades de superfície. O FQ de estruturas soldadas ou brasadas pode resultar em remoção irregular de material. O FQ de peças fundidas pode gerar superfícies irregulares pela porosidade e/ou pela não uniformidade do material (Infomet, 2010; Kalpakjian e Schmid, 2010).

O feixe laser (FL) é um processo rápido e silencioso, ideal para chapas finas de diferentes materiais com um mínimo de desperdício e sem distorções. Ao utilizar o FL, tem-se um corte de altíssimo nível de precisão, o que permite realizar tarefas extremamente delicadas. Atualmente, o tipo mais comum de laser usado na indústria utiliza o gás

carbônico (CO₂) como veículo ativo. Outros gases, como o nitrogênio (N₂) e o hélio (He), são misturados ao CO₂ para aumentar a potência do feixe que pode chegar a 3 kW/cm², capaz de vaporizar a maioria dos metais. O He auxilia ainda na dissipação do calor gerado pelo campo elétrico. Ligas de titânio são cortadas em altas velocidades através do uso de uma onda de laser CO₂ contínua, usando o O₂ como gás removedor. O FL, por ser uma luz, não há contato direto com a peça, não causando distorções e não havendo desgaste da “ferramenta”. Com o corte a laser é possível: minimizar a zona afetada pelo calor na peça; reduzir ou eliminar perdas; iniciar o corte de qualquer posição; ter um processo não ruidoso; proporcionar cortes retos; gerar pequena largura de corte; obter arestas de excelente qualidade. Em contrapartida, tem-se: elevado investimento inicial; dificuldades de cortar materiais que refletem a luz; necessidade de integração a sistemas CNC, com mesa x, y e z; necessidade de gás de assistência (Infomet, 2010; Kalpakjian e Schmid, 2010; Klock e König, 2007).

6. CONCLUSÕES

Devido a sua baixa condutividade térmica, a usinagem de titânio e suas ligas eleva demasiadamente as temperaturas na aresta de corte, fazendo com que o desempenho e a vida da ferramenta seja em muito reduzido.

Com base nisso, pode-se dizer que atualmente existem diversos métodos, bastante conhecidos, para se enfrentar tal problema. A utilização de HPC reduz as temperaturas na zona de corte, mas, pode ser mais eficiente (desde que corretamente aplicado) se for utilizado em conjunto com a idéia de fluido lubrificante refrigerante criogênico, agregando as características favoráveis de cada método.

Outra alternativa é o uso de ferramentas rotativas para o corte. Essas ferramentas têm o grande diferencial de que uma região de sua aresta de corte fica em contato cíclico com a peça, permitindo desta maneira melhor refrigeração e conseqüente queda nas temperaturas.

Deve-se salientar ainda a possibilidade do uso de métodos não-convencionais de usinagem, que podem se fazer necessários quando a finalidade da peça se dá em aplicações com exigências mais rigorosas, como bom acabamento superficial, alta precisão ou excelente integridade microestrutural na superfície usinada.

Neste artigo foram apenas expostos de maneira superficial alguns métodos de usinagem e idéias de sistemas de refrigeração, contudo, é importante se ter em mente que a real solução para a usinagem de tais ligas parte, na verdade, de uma combinação de três fatores essenciais: material da ferramenta, técnica de usinagem e meio de refrigeração.

7. REFERÊNCIAS

- Aleixo, G.T., Button, S.T., Caram, R., 2006, “Forjamento de Hastes de Próteses Femorais em Liga de Titânio Tipo β ”, Anais do 17º CBECIMat – Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciência dos Materiais, Foz do Iguaçu, Brasil, pp. 4311-4322.
- Antonialli, A.I.S., 2009, “Uma Contribuição ao Fresamento Frontal da Liga de Titânio Ti-6Al-4V”, 137 f. Tese (Doutorado) – UNICAMP, Campinas.
- Diniz, A.E., Marcondes, F.C., Coppini, N.L., 2003, “Tecnologia da Usinagem dos Materiais”, 4. ed., Artliber Editora, São Paulo, 248p.
- Ezugwu, E.O. and Wang, Z.M., 1997, “Titanium Alloys and their Machinability – a review”, Journal of Material Processing Technology, Vol. 68, pp. 262-274.
- Ezugwu, E.O., Booney, J., Yamane Y., 2003, “An Overview of the Machinability of Aeroengine Alloys”, Journal of Material Processing Technology, Vol. 134, pp. 233-253.
- Infomet, 2010, “Handbook de Aços e Ligas”, Disponível em: <https://www.infomet.com.br/acos-e-ligas-conteudo-ler.php?cod_tema=9&cod_secao=14&cod_assunto=94&cod_conteudo=189>. Acesso em: 25 out. 2010.
- Kalpakjian, S. and Schmid, S.R., 2010, “Manufacturing Engineering and Technology”, 6. ed., Pearson Prentice Hall, Upper Saddle River, 1176 p.
- Knoll, P.K. and Schaeffer, L., 2006, “Análise Microestrutural da Liga de Titânio $\alpha+\beta$, Ti-6Al-4V, Forjada a Quente”, 17º CBECIMat – Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciência dos Materiais, Paraná, Brasil, pp. 7740-7451.
- Klock, F. and König, W., 2007, Fertigungsverfahren 3: Abtragen, Generieren Lasermaterialbearbeitung, VDI-Buch, Springer-Verlag, Berlin, 389p.
- Lei, S. and Liu, W., 2002, “High-speed machining of titanium alloys using the driven rotary tool”, International Journal of Machine Tools & Manufacturing, Vol. 42, pp. 653-661.
- Machado, A.R., Abrão, A.M., Coelho, R.T., Silva, M. B., 2009, “Teoria da Usinagem dos Materiais”, Ed. Blucher, São Paulo, 371p.
- Moreira, M.R.V., Cunha, E.A., Ribeiro, M.V., Okimura, H., 2004, "Torneamento da liga Ti6Al4V", O Mundo da Usinagem (São Paulo), Vol. 4, pp. 16-19, ISSN: 1518-6091, Impresso.
- Niinomi, M., 2003, “Recent research and development in titanium alloys for biomedical applications and healthcare goods”, Science and Technology of Advanced Materials. Vol. 4, pp.445-454.
- Rahman, M., Wong, Y.S., Zareena A.R., 2003, “An overview of the machinability of aeroengine alloys”, Journal of Material Processing Technology, Vol. 134, pp. 233-253.
- Stemmer, C. E., 1995, “Ferramentas de Corte I”, 4. ed., Editora da UFSC, Florianópolis, 249p.
- Venugopal, K.A., Paul, S., Chattopadhyay A.B., 2007, “Machinability of Titanium Alloys”, JSME International Journal, Vol. 46, pp. 107-115.

A LITERATURE REVIEW ON THE MACHINABILITY OF TITANIUM AND ITS ALLOYS

Danian Henrique Oestreich, danian.henrique@ufrgs.br¹

Amauri Mosquen, amauri.mosquen@ufrgs.br¹

Doglas Rafael Stoffel, doglasstoffel@yahoo.com.br¹

André João de Souza, ajsouza@ufrgs.br¹

¹Universidade Federal do Rio Grande do Sul – UFRGS, Departamento de Engenharia Mecânica – DEMEC, Rua Sarmiento Leite, 425 – Centro – CEP: 90050-170 – Porto Alegre, RS.

Abstract: *Titanium and its alloys are light-weight and high-resistant materials, even in high temperatures. Thereby, they are considered as a great solution, receiving a considerable importance in chemical, shipbuilding, aerospace, nuclear, war and biomedical industries. Considering it, this work intends to overview in a qualitative manner the main problem faced in the usage of such alloys: its hard machining – caused by its high chemical reactivity and low thermal conductivity, generating high temperatures on the cut zone, and consequently, problems with wear by diffusion. The high cut pressures and high hot hardness cause premature damages to the cutting tool while the low Young modulus of titanium leads to a high vibration level, increasing the cut difficulty and tool damages. Among the different known solutions for such problems, it was discussed the usage of high pressure coolant (HPC), high speed machining (HSM), cryogenic coolant, rotary tools and non-conventional machining methods (electrochemical machining, chemical milling and laser cut). Thereby, it is intended to show what makes titanium machining so hard, emphasizing the interaction among different factors (tool material, machining technique and coolant) that lead to solutions for titanium alloys machining.*

Keywords: *machinability, titanium, rotary tool, high-pressure coolant, cryogenic coolant.*