

Desgaste de ferramentas no torneamento com alta velocidade de corte da superliga “waspaloy”

Leonardo Roberto da Silva

Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais (CEFET-MG)
Coordenação do Curso Técnico em Mecânica
Av. Amazonas, 5253 - Nova Suíça - CEP: 30.410-000 - Belo Horizonte - Minas Gerais
E-mail: lrsilva@deii.cefetmg.br

Reginaldo Teixeira Coelho

USP - Escola de Engenharia de São Carlos - Departamento de Engenharia Mecânica
Av. do Trabalhador São-Carlense, 400 - CEP: 13.566-590 - São Carlos - São Paulo
E-mail: rtcoelho@sc.usp.br

Rodrigo Eduardo Catai

UNESP - Universidade Estadual Paulista - Guaratinguetá
Av. Dr. Ariberto Pereira da Cunha, 333, CEP 12516-410, Guaratinguetá - SP, Brasil
E-mail: rcatai@feb.unesp.br

Resumo

Nesse trabalho, procurou-se estudar os mecanismos de desgaste de diversas geometrias de ferramentas cerâmicas ($Al_2O_3 + SiC_w$ e $Al_2O_3 + TiC$) e ferramentas de PCBN. Para isto foram realizados ensaios de torneamento com alta velocidade de corte em uma superliga à base de níquel (Waspaloy) com dureza de aproximadamente 40 HRC sob condição de corte a seco. As superligas são conhecidas como materiais de difícil usinabilidade devido à alta dureza, alta resistência mecânica em alta temperatura, afinidade para reagir com materiais da ferramenta e baixa condutividade térmica. Os resultados mostraram que o material da ferramenta e a geometria influenciaram o comportamento dos mecanismos de desgaste. De uma maneira geral, o tipo de desgaste dominante foi o de entalhe e os mecanismos foram abrasão, attrition (aderência com arrastamento) e provável difusão na maioria das ferramentas utilizadas.

Palavras-chave: Usinagem com alta velocidade (HSM), superligas à base de níquel, mecanismos de desgaste e ferramentas cerâmicas e PCBN.

Abstract

The purpose of this work is to study the wear mechanisms in several geometries of ceramic tools ($Al_2O_3 + SiC_w$ and $Al_2O_3 + TiC$) and PCBN tools. Several high speed turning experiments were accomplished in nickel-base superalloy (Waspaloy) with hardness of approximately 40 HRC under dry cutting condition. The nickel based superalloys are known as difficult to cut materials due to their high hardness, high mechanical strength at high temperature, chemical affinity to tool materials and lower thermal conductivity. The results showed that the material of the tool and geometry influence the behavior of wear mechanisms. In general, the dominant type of wear was notching and the mechanisms were abrasion, attrition and probable diffusion in most of the used tools.

Keywords: High-speed machining (HSM), nickel based superalloys, wear mechanisms and ceramic and PCBN tools.

1. Introdução

A participação da usinagem no custo final dos componentes mecânicos pode ser muito alta. Devido a esse motivo, nos últimos anos a usinagem com alta velocidade (HSM - *High Speed Machining*) tem ganhado importância e, assim, tem sido dada uma maior atenção ao desenvolvimento e à disponibilização no mercado das tecnologias para velocidades de avanço e rotações muito elevadas. Mas, antes que a tecnologia HSM possa ser empregada de uma forma econômica, todos os componentes envolvidos no processo de usinagem, incluindo a estrutura da máquina, o eixo-árvore, a ferramenta e as pessoas envolvidas precisam estar afinados com as peculiaridades desse novo processo. As máquinas devem satisfazer requisitos particulares de segurança. As ferramentas também devem estar à altura das condições severas que se originam com as altas velocidades de corte. O corte com altas velocidades pode ser usado para todo processo de usinagem de metais leves, não-ferrosos e plásticos. Para aço, ferro fundido e ligas de difícil usinabilidade, é adequado apenas para o corte final (Fallböhmer et al. 2000). Os termos HSM e HSC (*High Speed Cutting*) estão sendo utilizados para descrever o fresamento de acabamento em altas rotações, entretanto no torneamento, roscamento e furação têm-se observado poucos trabalhos publicados em comparação com o fresamento principalmente em superligas (Andrae, 1999).

Das diversas variáveis que afetam o bom desempenho das operações de usinagem, a ferramenta de corte, embora pequena e de relativo baixo custo, é a mais crítica. De acordo com Novaski e Corrêa (1998), as ferramentas de corte e seus acessórios constituem outro elemento-chave no desenvolvimento da tecnologia HSM, tanto em relação aos materiais quanto ao projeto. Thangaraj e Weinmann, (1992), Gatto e Iuliano (1994), Jun et al. (1997) e Ezugwu et al. (1999) afirmam que a vida da ferramenta obtida na usinagem das superligas à base de níquel é inadequada, aumentando o custo de produção. Na maior parte, os principais parâmetros que compreendem o

processo para um melhor desempenho são: seleção do material da ferramenta, geometria da ferramenta, método de usinagem, velocidade de corte, avanço, profundidade de corte, etc. Com esses parâmetros bem controlados, pode-se conseguir tempo de vida adequado para as ferramentas durante a usinagem. As ferramentas empregadas na usinagem das superligas devem atender aos seguintes aspectos: excelente resistência aos mecanismos de desgaste; alta resistência mecânica, dureza e tenacidade em alta temperatura; resistência ao choque térmico; alta condutividade térmica e suficiente estabilidade química em altas temperaturas (Shaffer, 1999 e Ezugwu et al. 1999).

A composição química com elevado teor de elementos de liga confere excelentes propriedades mecânicas e térmicas às superligas, mas dificultam a realização da usinagem desses materiais. As principais propriedades são alta resistência mecânica a temperaturas elevadas, alta resistência à fluência, alta resistência à fadiga e boa resistência à corrosão. Suas aplicações estão concentradas nas indústrias aeronáutica, marítima, química, petroquímica e em componentes que trabalham a altas temperaturas, mantendo excelente resistência mecânica. A usinagem de superligas afeta negativamente a integridade da peça. Por essa razão, cuidados especiais devem ser tomados para assegurar a vida da ferramenta e a integridade superficial de componentes usinados por intermédio de controle dos principais parâmetros de usinagem (Brinksmeier et al., 1982 e Ezugwu et al., 1999).

A superliga à base de níquel (*Waspaloy*) com dureza de aproximadamente 40 HRC é utilizada nos ensaios de usinagem descritos nesse trabalho. O presente trabalho objetiva estudar o comportamento de diversas geometrias de ferramentas cerâmicas ($Al_2O_3 + SiC_w$ e $Al_2O_3 + TiC$) e de PCBN, sendo que se utilizou o processo de torneamento com alta velocidade de corte sem fluido de corte. A avaliação do desempenho foi feita através da análise dos mecanismos de desgaste.

1.1 Materiais de ferramentas e mecanismos de desgaste

As superligas à base de níquel são normalmente usinadas com metal duro (WC - Co) com velocidades de corte na faixa de 10-30 m/min. Porém ferramentas de metal duro não podem ser utilizadas na usinagem com alta velocidade, porque não resistem às altas temperaturas e tensões na zona de corte. Ferramentas de cerâmicas são mais adequadas para o uso em altas velocidades de corte. Com a introdução das cerâmicas do tipo *sialon* (a base de Si_3N_4), é possível multiplicar a velocidade de corte pelo fator de 5 e, mais recentemente, ferramentas de alumina reforçada com *whiskers* ($Al_2O_3 + SiC_w$ - contendo 25% SiC) possibilitam utilizar velocidade de corte de até 10 vezes comparada com as ferramentas de metal duro (Vigneau 1997, Choudhury & Baradie, 1998 e Ezugwu et al. 1999).

Richards e Aspinwall (1989) apresentam uma revisão sobre a aplicação de cerâmicas na usinagem das ligas de níquel. Foi destacado que, com o emprego de alumina reforçada com *whiskers* (SiC_w), velocidades de corte podem chegar à 750 m/min na usinagem de algumas ligas. O desgaste de entalhe, muitas vezes, pode predominar e, nesse caso, são recomendados pequenos valores do ângulo de posição ($\chi_r = 45^\circ$) e ângulos de saídas negativos. Da mesma opinião são König e Gerschwiler (1999), revelando que o ângulo de posição de 45° demonstrou ser favorável às operações de torneamento com ferramentas cerâmicas e PCBN. A alta condutividade térmica e o baixo coeficiente de expansão térmica dos *whiskers* aumentam a resistência ao choque térmico.

Os mecanismos de desgaste das ferramentas cerâmicas são complexos e geralmente influenciados por: difusão, lascamento, abrasão na superfície de flanco, adesão na superfície de saída, abrandamento térmico, fratura catastrófica, cratera e desgaste de entalhe no flanco e na aresta secundária. O desgaste por difusão é determinado principalmente pela reação química e dissolução no material da peça. As superligas à base

de níquel têm alta afinidade química com muitos materiais de ferramenta e, como tal, freqüentemente formam uma camada de aderência conduzindo aos desgastes de difusão e arrastamento drástico (*attrition*) (Wayne & Buljan, 1990; Gatto & Iuliano, 1994; Jun et al., 1997 e Choudhury & Baradie, 1998). Geralmente, encontra-se o desgaste de entalhe na altura da profundidade de corte, como o responsável pela rejeição da ferramenta de corte a baixas velocidades de corte. Com altas velocidades de corte, o desgaste de flanco compete com o desgaste de entalhe, dependendo do tipo de cerâmica utilizada. Jun et al. (1997) acrescentaram que deformação plástica, difusão e desgaste por aderência e *attrition* contribuem muito para com o desgaste de flanco e fratura catastrófica da aresta em altas velocidades devido às altas tensões, removendo agregados dos grãos. O desgaste de entalhe foi predominante em todas condições de corte. Insertos com geometria redonda apresentaram melhor desempenho em comparação com a quadrada, devido à maior resistência na aresta, auxiliando na resistência ao desgaste de entalhe e na dissipação de calor.

Richards e Aspinwall (1989), König e Gerschwiler (1999) e Machado e Silva (1999) afirmam que algumas superligas à base de níquel podem ser usinadas eficazmente com o emprego de ferramenta de PCBN, principalmente no torneamento de acabamento, proporcionando um menor nível de desgaste, mas o alto custo dessas ferramentas torna sua aplicação economicamente inviável. Takatsu apud Ezugwu et al. (1999) comprovou que, nos testes de torneamento do *Inconel 718*, utilizando ferramentas de PCBN com concentração de 30-95% CBN, o desgaste de entalhe se reduz significativamente com o aumento da concentração de CBN, enquanto que a média do desgaste de flanco apresentou pequena variação. Por outro lado, Elbestawi et al. (1993) observaram que ferramentas de PCBN são também suscetíveis a altas taxas de desgaste por difusão e subsequente perda de cristal. A essa consideração, acrescentam König e Gerschwiler (1999) a seguinte afirmação: a resultante das propriedades química, física e mecânica tem uma decisiva

influência sobre o desgaste e o comportamento do desempenho de ferramentas de PCBN. Classes de PCBN com constituição estimada de 30-50% em volume de TiC ou TiN são satisfatórias para operação de acabamento em *Inconel 718* e *Waspaloy*.

Ezugwu et al. (1999) comprovaram, em seus experimentos, na usinagem de superligas a base de níquel, que a forma e a geometria das ferramentas de corte representam um importante papel na determinação da vida da ferramenta e na natureza da superfície usinada. Ferramentas de cerâmica de forma losangular geralmente fornecem baixo desempenho na usinagem das superligas, entretanto os insertos de forma redonda e quadrada proporcionam alto desempenho como também um melhor acabamento superficial. Isto se deve ao aumento no ângulo de ponta dos insertos quadrados e redondo, os quais tendem a aumentar a resistência da aresta dos insertos e a área de contato.

2. Procedimento experimental

A superliga à base de níquel *Waspaloy* foi utilizada nos ensaios de usinagem, produzida pelo processo de laminação e endurecida pelo tratamento térmico de solubilização seguido de precipitação com a dureza final de 40 HRC aproximadamente. A composição química e as propriedades mecânicas foram fornecidas pelo fabricante, mediante certificado de qualidade da análise química conforme Tabela 1.

As ferramentas utilizadas, conforme indicação dos fabricantes e literatura, foram as pastilhas de cerâmica reforçada com *whiskers* CC670 (Al_2O_3 +

25%SiC_w), cerâmica mista CC650 (Al_2O_3 + 28%TiC) e PCBN (CB7050 contendo 50% de CBN) fabricadas pela Sandvik Coromant nas geometrias: quadrada, redonda e triangular. A especificação ISO das pastilhas e a geometria dos conjuntos porta-ferramentas são indicadas na Tabela 2.

Os parâmetros de corte (velocidade de corte, avanço e profundidade de usinagem) foram selecionados mediante recomendação da literatura técnica e ensaios preliminares. Os mesmos foram ajustados de acordo com a capacidade da máquina e faixas de aplicações industriais na operação de acabamento com alta velocidade de corte em peças de superligas à base de níquel. As condições de corte selecionadas para a realização dos testes preliminares foram: $V_c = 300; 400; 500$ e 600 m/min; $f = 0,05; 0,10$ e $0,15$ mm/rev. e $a_p = 0,35$ mm sob condição de corte a seco. A velocidade de corte que proporcionou um melhor acabamento e menor taxa de desgaste foi a de 500 m/min com avanço de 0,10 mm/rev., sendo esta selecionada para executar os experimentos.

Os experimentos foram executados em um torno *Index GU600*, equipado com comando numérico computadorizado (S810 D) com potência do motor do eixo-árvore de 22 kW e faixa de rotação de 50-5000 RPM.

As formas e mecanismos de desgastes foram analisados através do microscópio eletrônico de varredura *Zeiss* modelo DSM 960 (*Digital Scanning Microscope*). A análise dos mecanismos de desgaste envolvidos foi realizada com a finalidade básica de comparar os tipos de desgastes das ferramentas cerâmicas (CC670, CC650) e de PCBN (CB7050).

Tabela 1 - Composição química (em %) e propriedades mecânicas do *Waspaloy*.

Ni	Cr	Fe	Mo	Ti		Cu		Co
58,00	19,16	-	4,23	3,00		0,01		13,40
Al	Si	C	Mn	L _R (Mpa)		L _E (Mpa)		A (%)
				21°C	650°C	21°C	650°C	
1,37	0,02	0,04	0,02	1275	1120	795	690	25

L_R = limite de resistência, L_E = limite de escoamento e A = alongamento.

3. Resultados e discussões

As características do material da peça (frágil, baixa condutividade térmica, presença de carbetos, resistência à alta temperatura e tendência a endurecer ao ser trabalhado) ocasionaram intenso desgaste nas ferramentas, proporcionando um tempo de vida reduzido. A presença de “aresta postiça de corte (APC)” não foi observada em nenhuma geometria, apesar de alguns pesquisadores comentarem que ela é freqüente. Em geral, diferentes tipos de desgastes são evidentes em todas as figuras. Em nenhuma ferramenta ocorreu falha catastrófica nas condições testadas. Entretanto notam-se indícios de desgaste de cratera na superfície de saída, muito embora em proporção bem inferior ao desgaste de entalhe.

O aspecto do desgaste encontrado nas ferramentas cerâmicas (CC650 e CC670) de geometria triangular, quadrada e redonda pode ser observado nas Figuras 1 a 3. De uma maneira geral, os desgastes que ocorreram no torneamento com alta velocidade de corte não são provenientes de um único mecanismo de desgaste, mas, sim, de uma combinação de vários deles.

O sulco na profundidade de corte na usinagem de superligas à base de níquel tem sido visto como um dos principais fatores limitantes da vida das ferramentas cerâmicas. Isto é causado pela combinação de alta temperatura, alta resistência do material da peça, alta deformação plástica, endurecimento da camada superficial durante a usinagem, alta tensão na interface cavaco-ferramenta e cavacos abrasivos (Richards & Aspinwall, 1989; Gatto & Iuliano, 1994 e Ezugwu et al. 1999). Contudo, em nenhuma condição, a usinagem com alta velocidade resultou em quebra catastrófica das ferramentas cerâmicas e de PCBN. Isto se deve, provavelmente, ao aumento da velocidade de corte, resultando no aumento da temperatura e, presumivelmente, na redução do nível de tensões mecânicas e térmicas desenvolvidas na região do corte e da capacidade do material da ferramenta suportar essas ten-

Tabela 2 - Material e geometria das ferramentas e dos conjuntos porta-ferramentas.

Material	Geometria da pastilha	Ângulo de posição (χ_x)	Ângulo de saída (γ_o)	Ângulo de folga (α_o)	Ângulo de inclinação (λ_s)
Cerâmicas CC670/650	RNGN 120400 T01020	-	-6°	6°	-6°
Cerâmicas CC670/650	SNGN 120408 T01020	45°	-6°	6°	0°
Cerâmicas CC670/650	TNGN 160408 T01020	91°	-6°	6°	-4°
PCBN CB7050	SNGN 120408 T01020	45°	-6°	6°	0°
PCBN CB7050	TNGA 160408 T01020	91°	-6°	6°	-4°

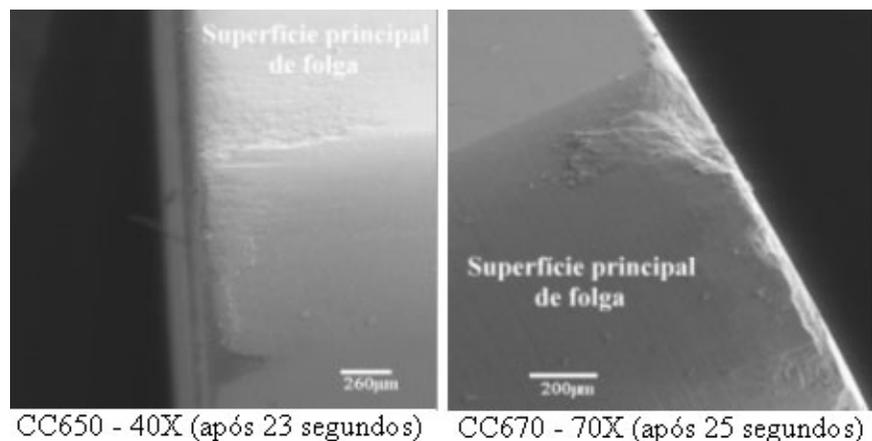


Figura 1 - Condição de desgaste das ferramentas cerâmicas (triangular).

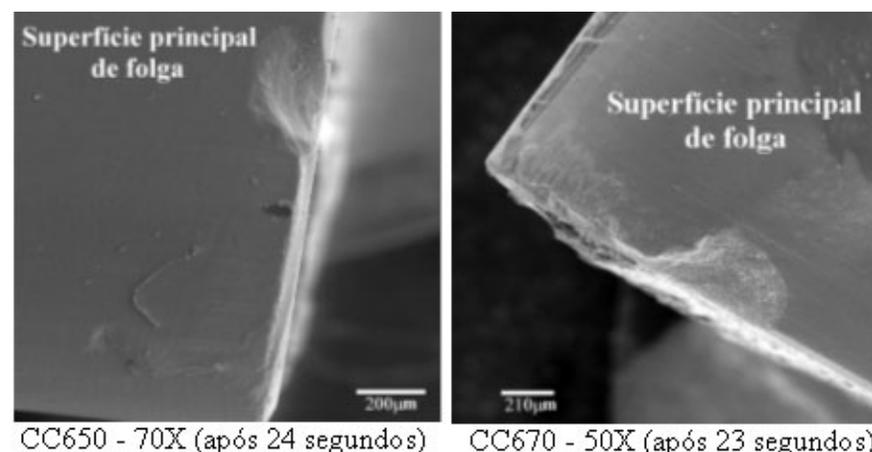


Figura 2 - Condição de desgaste das ferramentas cerâmicas (quadrada).

sões sem microfraturas. Além disso, o torno utilizado desempenhou um papel muito importante, por ter alta rigidez e potência.

Observa-se a intensa presença de microlascamento e aderência no raio da ferramenta até a extremidade da profundidade de corte, região de contato com a superfície usinada, devido, provavelmente, à alta deformação plástica. A região onde se concentram esses mecanismos é muito importante, devido ao contato íntimo com a superfície da peça acabada durante o corte, influenciando, conseqüentemente, na rugosidade da peça.

O desgaste de entalhe na altura da profundidade de corte é originado pela alta deformação plástica na extremidade da profundidade de corte, ocasionando aumento na temperatura, o que favorece a adesão de material da peça na ferramenta. Em todas condições, a limitação do desgaste transcorreu por desgaste de entalhe na altura da profundidade de corte associado aos desgastes por abrasão, difusão e *attrition* (aderência e arrastamento), envolvendo a perda de material por microssulcamento ou sulcos, causada por partículas de elevada dureza. Conseqüentemente, o mecanismo do tipo *attrition* é transferido para o desgaste de entalhe (Smith, 1994).

Segundo Pashby e Khamsehzhadeh (1990), as inclusões de SiC_w aumentam a condutividade térmica e a dureza, mas, infelizmente, a estabilidade química é reduzida e há evidência de que isto influencia a taxa de desgaste. A taxa de desgaste da ferramenta CC670 foi superior em relação à ferramenta CC650, confirmando a inferioridade de estabilidade química e a resistência à abrasão.

De acordo com Narutaki et al. (1993), Elbestawi et al. (1993) e Jun et al. (1997), o desgaste por difusão, que pode acontecer na usinagem com alta velocidade, utilizando ferramenta de Al₂O₃ + SiC_w, no qual o níquel e o ferro difundem para dentro do material da ferramenta, reagindo quimicamente com SiC_w, produzindo FeSi e NiSi. Isto significa que as fibras de SiC_w desaparecem da superfície da ferramenta sob condição de alta velocidade de corte, diminuindo a resistência e a dureza da ferramenta e aumentando a taxa de desgaste.

Nos testes de difusão, Narutaki et al. (1993) afirmam que não existe difusão, quando são utilizadas ferramentas de cerâmica Al₂O₃ + TiC (CC650), tornando-a mais estável na usinagem do *Waspaloy* em relação às outras cerâmicas. A boa estabilidade química das ferramentas cerâmicas CC650, aliada a uma melhoria da resistência ao choque térmico e mecânico através da adição de TiC, são características que, sem dúvida, beneficiam a situação com alta velocidade de corte.

Apesar de as ferramentas cerâmicas serem conhecidas por sua estabilidade química, encontram-se fortes indícios de mecanismos químicos em todas ferramentas e condições utilizadas. Esse comportamento pode ser explicado em função de o corte com alta velocidade gerar alta temperatura na região do corte.

O aspecto do desgaste encontrado nas ferramentas de PCBN (CB7050) pode ser observado na Figura 4.

Um resultado surpreendentemente negativo foi obtido com as ferramentas de PCBN, pois vários pesquisadores as indicaram como uma alternativa de grande potencial para a usinagem de superligas à base de níquel, o que não foi comprovado em nenhuma geometria. Os pesquisadores afirmam que o melhor desempenho das ferramentas de PCBN é devido, em grande parte, à sua maior dureza a quente.

Os efeitos das possíveis reações químicas ocorridas com as ferramentas de PCBN são difíceis de serem identificados, especialmente por causa da complexidade das superligas, devido à grande quantidade de elementos químicos

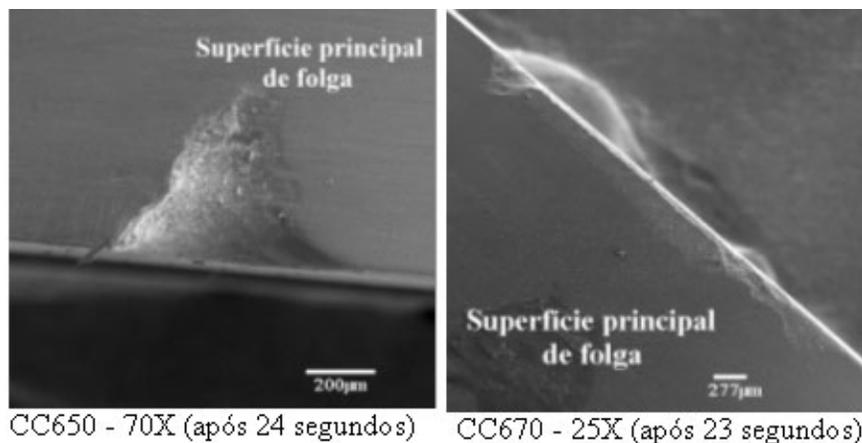


Figura 3 - Condição de desgaste das ferramentas cerâmicas (redonda).

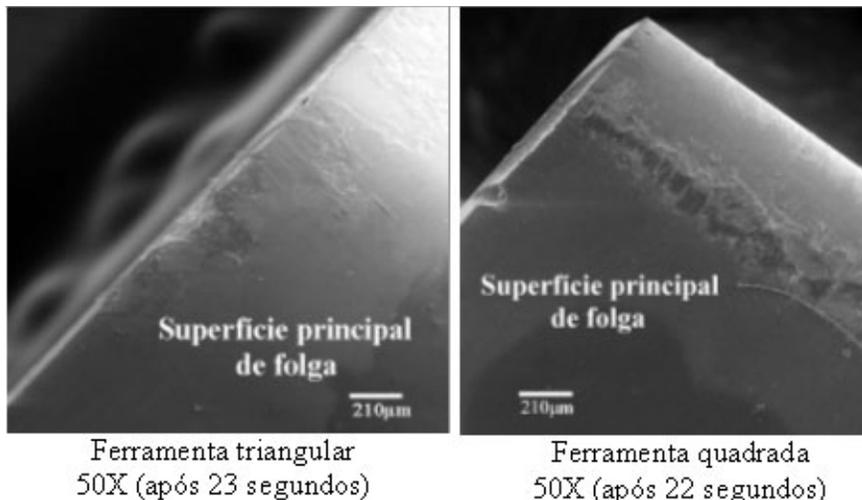


Figura 4 - Condição de desgaste das ferramentas de PCBN.

presentes, sendo que qualquer elemento pode estar envolvido na reação. Por outro lado, o material da 2ª fase da ferramenta de PCBN pode reagir com os elementos das superligas, principalmente o níquel. Analisando-se os tipos de mecanismos de desgaste predominante nas ferramentas de PCBN, é considerado mais provável que tenham ocorrido o desgaste por difusão, abrasão e *attrition* (aderência com arrastamento) na superfície de folga e saída causados por partículas de carboneto da peça ou por grãos de CBN liberados durante o corte, devido à deterioração do material ligante, principalmente pela alta temperatura e interações químicas, contribuindo para o desgaste da ferramenta.

4. Conclusões

Diante dos resultados apresentados e das discussões desenvolvidas, pôde-se concluir, para o torneamento com alta velocidade de corte da superliga “Waspaloy”, que:

- As características térmicas, mecânicas e metalúrgicas das superligas dificultam demasiadamente a usinagem, proporcionando elevado nível de desgaste.
- De uma maneira geral, o tipo de desgaste dominante foi o de entalhe e os mecanismos foram abrasão, *attrition* (aderência com arrastamento) e provável difusão na maioria das ferramentas utilizadas. Entretanto a presença do desgaste de entalhe na profundidade de corte foi mais fortemente influenciada. O desgaste de flanco foi mais prevalecente ao longo da aresta

de corte com uma provável combinação dos mecanismos de desgaste do tipo abrasão e adesão.

- Apesar de as ferramentas cerâmicas serem conhecidas por sua boa estabilidade química, encontram-se fortes indícios de mecanismos químicos em todas as ferramentas e condições utilizadas, em menor grau na ferramenta cerâmica CC650.

5. Referências bibliográficas

ANDRAE, P. Chip formation in high speed cutting HSC. In: INTERNACIONAL MACHINING & GRINDING CONFERENCE, 3. p.107-120, Oct, 1999.

BRINKSMIEIER, E., CAMMETT, J. T., KÖNIG, W., LESKOVAR, P., PETERS, J., TÖNSHOFF, H. K. Residual stresses - Measurement and causes in machining processes. In: *Annals of the CIRP*, v. 31, n.2, p. 491-510, 1982.

CHOUHDURY, I. A., BARADIE, M. A. Machinability of nickel-base super alloys: a general review. *Journal of Materials Processing Technology*, v.77, p.278-287, 1998.

ELBESTAWI, M. A., ELWARDANY, I., TAN, M. Performance of whisker-reinforced ceramic tools in milling nickel-based superalloy. In: *Annals of the CIRP*, v.42, n.1, p.99-102, 1993.

EZUGWU, E. O., WANG, Z. M., MACHADO, A. R. The machinability of nickel-based alloys: a review. *Journal of Materials Processing Technology*, n.86, p.1-16, 1999.

FALLBÖHMER, C. A., RODRÍGUEZ, T., ÖZEL, T., ALTAN, T. High-speed machining of cast iron and alloy steels for die and mold manufacturing. *Journal of Materials Processing Technology*, n.98, p.104-115, 2000.

GATTO, A., IULIANO, L. Chip formation analysis in high speed machining of a nickel base superalloy with silicon carbide whisker-

reinforced alumina. *Internacional Journal Machine Tools Manufacturing*, v.34, n.8, p.1147-1161, 1994.

JUN, Z., JIANXIN, D., JIANHUA, Z., XING, A. Failure mechanisms of a whisker-reinforced ceramic tool when machining nickel-based alloys. *Wear*, n.208, p.220-225, 1997.

KÖNIG, W., GERSCHWILER, K. Machining nickel-based superalloys. *Manufacturing Engineering*. n.3, p.102-108, 1999.

MACHADO, A. R., SILVA, M. B. *Usinagem dos metais*. (4. ed.). Uberlândia: Editora da Universidade Federal de Uberlândia, 1999.

NARUTAKI, N., YAMANE, Y., KAYASHI, K. High-speed machining of Inconel 718 with ceramic tools. In: *Annals of the CIRP*, v.42, n.1, p.103-106, 1993.

NOVASKI, O., CORRÊA, M. A. HSC como vantagem competitiva. *Máquinas e Metais*, n. 394, p.74-89, nov, 1998.

PASHBY, I. R.; KHAMSEHZADEH, H. A usinagem de waspaloy com diferentes pastilhas cerâmicas. *Máquinas e Metais*, n.296, p.30-39, set, 1990.

RICHARDS, N., ASPINWALL, D. Use of ceramic tools for machining nickel based alloys. *Internacional Journal Machine Tools Manufacturing*, v.29, n.4, p.575-588, 1989.

SHAFFER, W. Cutting tool edge preparation. In: INTERNACIONAL MACHINING & GRINDING CONFERENCE, 3. p. 799-808, Oct, 1999.

THANGARAJ, A. R., WEINMANN, K. J. On the wear mechanisms and cutting performance of silicon carbide whisker-reinforced alumina. *Journal of Engineering for Industry*, v.114, p.301-308, Aug, 1992.

VIGNEAU, J. Obtendo alta produtividade na usinagem de ligas de titânio e superligas. *Máquinas e Metais*, n. 380, p.16-31, set, 1997.

WAYNE, S. F., BULJAN, S. T. Wear of ceramic cutting tools in Ni-based superalloy machining. *Tribology Transactions*, v.33, n.4, p.618-626, 1990.

Artigo recebido em 13/11/2003 e
aprovado em 15/07/2004.

REM - Revista Escola de Minas
68 anos divulgando CIÊNCIA.
