

- Müller, P. e Soto, M.I., 1999, “Usinagem sem Refrigeração de Furos e Roscas”, 4º Seminário Internacional de alta tecnologia – Inovações Tecnológicas na Manufatura para o Ano 2000, Unimep, ago.
- Narutaki, N., Yamane, Y. and Kayashi, K., 1993, “High-Speed Machining of Inconel 718 with Ceramic Tools”, Annals of the CIRP, Vol.42, n.1, pp. 103-106.
- Novaski, O. e Corrêa, M. 1998, “A HSC como Vantagem Competitiva”, Máquinas e Metais, n.394, pp. 74-89, nov.
- Richards, N. and Aspinwall, D., 1989, “Use of Ceramic Tools for Machining Nickel Basead Alloys”, Internacional Journal Machine Tools Manufacturing, Vol.29, n.4, pp. 575-588.
- Schock, J., 1998, Usos Potenciais da HSC na Usinagem de Matrizes, Máquinas e Metais, n.394, pp. 28-33, nov.
- Schulz, H., 1996, “High Speed Machining”, 1º Seminário Internacional de Alta Tecnologia - Usinagem com altíssima velocidade de corte e alta precisão, Unimep. out.
- Schulz, H., 1997, “Start of Art and Trends of High Speed Machining”, 2º Seminário Internacional de Alta Tecnologia - Usinagem com altíssima velocidade de corte e alta precisão, Unimep. July.
- Schulz, H., 1999, “Trends in Manufacturing Technology at the Threshold of the Millennium”, 4º Seminário Internacional de alta tecnologia – Inovações Tecnológicas na Manufatura para o Ano 2000, Unimep, ago.
- Sharman, A. and Dewes, R. C., Aspinwall, D. K., 1999, “Tool Life when High Speed Ball Nose end Milling”, Internacional Conference in Advances in Materials and Processing technologies – AMPT, Dublin, Irlanda, pp.437-445.
- Sinhoff, V., Altmüller, S. and Eisenblätter, G., 1999, “A Usinagem a Seco em Alta Velocidade: Revolução ou Evolução”?, Máquinas e Metais, n.404, pp.22-37, set.
- Smith, S. and Tlustý, J., 1997, “Current Trends in High-Speed Machining”, Transactions of the ASME, v.119, pp.664-666, Nov.
- Stockinger, F., Beck, W. and Enderl, D., 1998, “Desenvolvimento em Ferramentas de Corte a Alta Velocidade”, Máquinas e Metais, n.388, pp.28-39, maio.
- Vigneau, J., 1997, “Obtendo alta Produtividade na Usinagem de Ligas de Titânio e Superligas”, Máquinas e Metais, n.380, pp .16-31, set.

propósito de fazer o processo de usinagem ser dramaticamente veloz e precisamente produtivo.

## 5. REFERÊNCIAS

- Abrão, A.M. and Aspinwall, D.K., 1996, "The Surface Integrity of Turned and Ground Hardened Bearing Steel", *Wear*, Vol. 196, pp. 279-284.
- Agba, E., 1999, "High Speed Machining of Unsupported Thin-walled Structures", 3<sup>rd</sup> Internacional Machining & Grinding Conference, pp. 121-132, Oct.
- Andrae, P., 1999a, "Chip Formation in High Speed Cutting HSC", 3<sup>rd</sup> Internacional Machining & Grinding Conference, pp. 107-120, Oct.
- Andrae, P., 1999b, "Tool & Process Design for High-Efficient Machining", 3<sup>rd</sup> Internacional Machining & Grinding Conference, pp. 133-148, Oct.
- Choudhury, I. A. and Baradie, M. A., 1998, "Machinability of Nickel-Base Super Alloys: a General Review", *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 77, pp. 278-287.
- Darwish, S. M., 1997, "The Impact of Tool Material and Cutting Parameters on Surface Roughness of a Nickel-Base Superalloy", *Materials and Manufacturing Processes*, Vol.12, n. 6, pp. 1017-1035.
- Dewes, R. C. and Aspinwall, D. K., 1997, "A Review of Ultra High Speed Milling of Hardened Steels", *Journal of Materials Processing Technology*, n. 69, pp. 1-17.
- Elbestawi, M. A., Elwardany, I. and Tan, M., 1993, "Performance of Whisker-Reinforced Ceramic Tools in Milling Nickel-Based Superalloy", *Annals of the CIRP*, Vol. 42, n.1, pp. 99-102.
- Enderle, K.D. and Knuszynski, J., 1998, "A Tecnologia de Corte a Alta Velocidade Produz Furos de Melhor Qualidade", *Máquinas e Metais*, n.385, pp. 16-20, fev.
- Ezugwu, E.O., Wang, Z.M. and Machado, A.R., 1999, "The Machinability of Nickel-Base Alloys: a Review", *Journal of Materials Processing Technology*, n.86, pp. 1-16.
- Gatto, A. and Iuliano, L., 1994, "Chip Formation Analysis in High Speed Machining of a Nickel Base Superalloy with Silicon Carbide Whisker-Reinforced Alumina", *Internacional Journal Machine Tools Manufacturing*, Vol.34, n.8, pp. 1147-1161.
- Hanasaki, S., Fujiwara, J. and Miyamoto, T., 1996, "Mechanism of Groove Wear Formation in Cutting of hi-Nickel Alloy", *Progress of Cutting and Grinding*, Vol.3, ICPCG, pp.114-119.
- Heisel, U. and Gringel, M., 1996, "Machine Tool Design Requirements for High-Speed Machining", *Annals of the CIRP*, Vol. 45, n.1, pp. 389-392.
- Jun, Z., Jianxin, D., Jianhua, Z. and Xing, A., 1997, "Failure Mechanisms of a Whisker-Reinforced Ceramic Tool when Machining Nickel-based Alloys", *Wear*, N.208, pp. 220-225.
- Kirschnik, M., 1997, "Comando Numérico Computadorizado para Aplicações HSC", 2<sup>o</sup> Seminário Internacional de Alta Tecnologia - Usinagem com altíssima velocidade de corte e alta precisão. Unimep, jul.
- Kitagawa, T., Kubo, A. and Maekawa, K., 1996, "Temperature and Wear of Cutting Tools in High-Speed Machining of Inconel 718 and Ti-6Al-6V-2Sn", *Wear*, N.202, pp. 142-148.
- König, W. and Gerschwiler, K., 1999, "Machining Nickel-Based Superalloys", *Manufacturing Engineering*, Vol.3, pp.102-108.
- Kramer, B. M., 1987, "On Tool Materials for High-Speed Machining", *Journal of Engineering for Industry*, Vol.109, pp. 87-91.
- Machado, A. R. e Silva, M.B., 1999, "Usinagem dos Metais", 4. Ed. Editora da Universidade Federal de Uberlândia.

de alta pressão do Incoloy 901 com ferramentas de metal duro e cerâmica reforçada com *whiskers* ( $\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{SiC}$ ).

Usinagem a alta velocidade nas ligas de Inconel 718 e Incoloy 901 demonstram que o desgaste de entalhe pode ser suprimido pelo emprego da técnica de torneamento cônico. Esta técnica consiste em variar constantemente a profundidade de corte ao longo da aresta cortante, deste modo distribuindo a concentração do esperado desgaste de entalhe. Esta técnica, também resulta na significativa redução ou eliminação completa da fratura da aresta de corte causada primeiramente pelo excesso do entalhamento na ponta da ferramenta e/ou no fim da região da profundidade de corte. A técnica descrita é vantajosa, independente do material da ferramenta de corte (Ezugwu et al., 1999). Segundo Narutaki et al. (1993) com a otimização da geometria da ferramenta pode-se reduzir este tipo de desgaste no torneamento de alta velocidade do Inconel 718. Os autores testaram três tipos de formato de pastilhas: quadrada, redonda e especial tipo “S”.

No torneamento a alta velocidade (250-450 m/min) do Inconel 718 (440 HV) com ferramentas de cerâmica ( $\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{SiC}$ ) diferentes tipos de desgaste foram evidentes. No raio de aresta, considerável lascamento e a presença de material soldado, como se APC estivesse sido formada. Desgaste devido ao efeito abrasivo do cavaco e a presença notável de desgaste de entalhe também estavam presentes. O lascamento foi dominante sobre os outros mecanismos de desgaste (Gatto & Iuliano, 1994)

Ezugwu et al. (1999) comprovaram com 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 fornece baixo desempenho na usinagem das superligas, entretanto os insertos de forma redonda e quadrada proporcionam alto desempenho como também um melhor acabamento superficial. Isto deve-se ao aumento nos ângulos compreendidos dos insertos quadrado e redondo, os quais tende em aumentar a resistência da aresta dos insertos e a área de contato, resultando em baixas tensões e temperatura na aresta cortante. A variação no ângulo de aproximação nos insertos de forma quadrada, losangular e redondo, tem também efeitos sobre a vida da ferramenta, confirmado por Rahman et al. (1997). Observa-se que a vida aumenta a medida que o ângulo aumenta de  $-5^\circ$  para  $45^\circ$ .

Schulz (1996) e Andrae (1999b) afirmaram que na maioria dos casos as ferramentas atualmente disponíveis para HSC são perigosas quando operando em altas velocidades. Com base nas pesquisas atuais pode-se concluir que deve-se: usar materiais dúcteis; minimizar o efeito entalhe dependendo do espaço necessário para o cavaco; manter as massas pequenas para todos os componentes da ferramenta; manter a resistência ao desgaste em alta velocidade de corte, ter baixo erro de balanceamento, obter boa trajetória para deslocamento de cavacos, possuir grande número de aresta de corte.

#### **4. CONSIDERAÇÕES FINAIS**

HSC é uma promissora tecnologia na atualidade e para o futuro. Força de usinagem e potência requerida podem ser reduzidas aproximadamente em 30%. HSC requer máquinas-ferramentas com alto desempenho. Os mecanismos de formação de cavaco em diferentes zonas de cisalhamento são modificados pelo aumento da velocidade de corte. Com o aumento da velocidade de corte, cavacos segmentados são gerados. HSC afeta positivamente a integridade superficial da peça como também a qualidade dos componentes usinados. O corte HSC pode ser usado para todo processo de usinagem de ligas leves, não-ferrosos e plásticos, mas para aço, ferro fundido e ligas de difícil usinabilidade ele é adequado apenas para o corte final. Pesquisadores e indústrias de todo o mundo estão firmemente comprometidos com o

responsável pela rejeição da ferramenta de corte à velocidade de corte baixas. A velocidades de corte altas, o desgaste de flanco compete com o desgaste de entalhe, dependendo do tipo de cerâmica utilizada. A essa consideração, acrescenta Jun et al. (1997) 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 a altas tensões, removendo agregados dos grãos.

Fresamento em Inconel 718 utilizando cerâmica reforçada com whiskers de geometria redonda e quadrada mostra que os insertos suportam com eficiência três tipos de desgaste: desgaste de flanco, entalhe e abrasão. O desgaste de entalhe foi predominante em todas condições de corte. Insertos de geometria redonda apresentaram melhor desempenho em comparação com a quadrada, devido a maior resistência na aresta auxiliando na resistência ao desgaste de entalhe (Elbestawi et al., 1993).

De acordo com Gatto & Iuliano (1994) para uma otimização dos parâmetros de usinagem e a construção de modelo de vida da ferramenta deve-se levar em consideração a análise de formação de cavaco e o mecanismo de desgaste, sendo necessária uma análise macroscópica e microscópica criteriosa.

Richards & Aspinwall (1989); König & Gerschwiler (1999) e Machado & Silva (1999) afirmaram que algumas superligas a base de níquel podem ser usinada eficazmente com o emprego de ferramenta de CBN, principalmente no torneamento de acabamento, proporcionando um menor nível de desgaste, mas o alto custo destas ferramentas tornam sua aplicação economicamente inviável. Takatsu apud Ezugwu et al. (1999) comprovaram que nos testes de torneamento do Inconel 718 utilizando ferramentas de CBN com concentração de 30-95% CBN, mostraram que o desgaste de entalhe 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 CBN são também suscetíveis para com alta taxas de desgaste por difusão e subsequente perda de cristal. A essa consideração, acrescenta König & Gerschwiler (1999) a seguinte afirmação: a resultante das propriedades química, física e mecânica tem uma decisiva influência sobre o desgaste e comportamento do desempenho de ferramentas de PCBN. Classe 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.

Gatto & Iuliano (1994) e Vigneau (1997) encontraram a presença de cavacos segmentados no torneamento a altas velocidades do Inconel 718 (440 HV) devido as condições de corte de cisalhamento adiabático. Observaram que o tamanho dos cavacos segmentados aumentam com o aumento do avanço e da velocidade de corte. Macroscopicamente este fenômeno corresponde a segmentação do cavaco e pode ser explicado pelo aumento da temperatura na área de corte, sendo os mesmos responsáveis pela redução da força de corte.

Jun et al. (1997) demonstraram que o desgaste adesivo e *attrition* foram os principais mecanismos de desgaste no torneamento das superligas a base de níquel com ferramenta de  $Al_2O_3 + SiC_w$  em baixas velocidades. Da mesma opinião é Sharman et al. (1999) quando no fresamento a alta velocidade do Inconel 718 com ferramenta de metal duro com cobertura de TiAlN. Kitagawa et al. (1996) encontraram presença severas de desgaste de entalhe no torneamento de alta velocidade do Inconel 718 com ferramentas de alumina mista ( $Al_2O_3 + TiC$ ). Hanasaki et al. (1996) também observaram a presença em grande escala do desgaste de entalhe no torneamento de uma superliga de níquel contendo 50%Ni, 25%Cr e 6%Mo, utilizando pastilhas de metal duro K10, M10 e P20 com diversas velocidades de corte na operação de acabamento. O desgaste de entalhe concentrou-se na altura da profundidade de corte, e era o responsável pela fratura da ferramenta principalmente em altas velocidades. Semelhantes resultados apresentaram Ezugwu et al. (1990) no torneamento com refrigeração

### 3.1 Materiais de ferramentas para usinagem de superligas a base de níquel e mecanismos de desgaste

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 Lisboa apud Novaski & Corrêa (1998) as ferramentas de corte e seus acessórios constituem outro elemento-chave no desenvolvimento da usinagem HSC, tanto em relação aos materiais quanto ao projeto. Gatto & Iuliano (1994); Jun et al. (1997) e Ezugwu et al. (1999) demonstraram que a vida da ferramenta obtida na usinagem das superligas a 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, e 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 os seguintes aspectos: excelente resistência ao desgaste, alta resistência e tenacidade em alta temperatura, alta dureza à quente, boas propriedades de choque térmico, alta condutividade térmica e suficiente estabilidade química em altas temperaturas.

As superligas a 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 a alta velocidade, porque não resistem a 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 de sialon ( $\text{Si}_3\text{N}_4$ ) é possível multiplicar a velocidade de corte pelo fator de 5 e mais recentemente, ferramentas de alumina reforçada com *whiskers* ( $\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{SiC}$  - 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 & 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), velocidades de corte podem chegar à 750 m/min na usinagem de algumas ligas. O desgaste de entalhe, muitas vezes pode predominar e neste caso, são recomendados pequenos valores do ângulo de posição ( $\cong 45^\circ$ ) e ângulos de saídas negativos. Da mesma opinião são König & Gerschwiler (1999) revelando que o ângulo de posição  $\cong 45^\circ$  demonstrou favorável para operações de torneamento com ferramentas cerâmicas e PCBN. A alta condutividade térmica e a baixa expansão térmica dos *whiskers* aumenta a resistência ao choque térmico.

Ezugwu et al. (1999) comprovaram que a utilização de ferramentas de metal duro com múltiplas camadas (TiN + TiCN + TiN) manufaturadas pela técnica de deposição de vapor físico (PVD) têm mostrado notável melhora na usinagem das superligas à base de níquel. Por outro lado, Choudhury & Baradie (1998) revelam que ferramentas sem cobertura tem melhor desempenho que as ferramentas com cobertura para usinagem do Inconel 718.

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 no raio de ponta da ferramenta. O desgaste do tipo difusão é determinado principalmente pela reação química e dissolução no material da peça. As superligas a base de níquel tem alta afinidade química por muitos materiais de ferramenta e como tal frequentemente formam uma camada de aderência conduzindo aos desgaste de difusão e arrastamento drástico (*attrition*) (Gatto & Iuliano, 1994; Jun et al., 1997; Choudhury & Baradie, 1998 e Sharman et al., 1999). Geralmente, encontram o desgaste de entalhe na altura da profundidade de corte, como o

da ferramenta e/ou na altura da profundidade de corte; a alta resistência dessas ligas é mantida a elevadas temperaturas, e isto se opõe ao processo de deformação plástica necessária para formar o cavaco, mesmo a temperaturas de corte elevadas; tendência de reagirem com as ferramentas, em determinadas condições atmosféricas, conduzindo para alta taxa de desgaste do tipo difusão; tendências de aderirem nas superfícies das ferramentas formando aresta postiça de corte (APC), o que causa pobre acabamento superficial; a presença de carbonetos duros e abrasivos na matriz aumentando a presença de desgaste abrasivo severo nas ferramentas; a condutividade térmica é baixa, o que contribui para o desenvolvimento de altas temperaturas na ponta da ferramenta como também alto gradiente térmico.

Todos estes fatores operando juntos ou em combinação causam altas temperaturas de corte (podem chegar a 1000°C) e alta tensão de compressão na superfície de saída (pode chegar a 3450 MPa), isso leva ao desenvolvimento rápido do desgaste de flanco, cratera ou desgaste de entalhe, dependendo do material da ferramenta e das condições de corte (Ezugwu et al., 1999; Gatto & Iuliano, 1994 e Choudhury & Baradie, 1998).

A questão da qualidade de componentes usinados é muito discutida e cada vez mais se exige componentes mecânicos com alta eficiência, pelo aspecto funcional e de segurança. A textura superficial pode ter uma influência decisiva na aplicação e no desempenho do componente usinado. Segundo Andrae (1999a) o aumento da velocidade de corte afeta positivamente a integridade superficial de peças assim como a qualidade do componente. Os fatores mais críticos que afetam a integridade superficial são o desgaste da ferramenta e a velocidade de corte. O desgaste da ferramenta induz tensões normais e de cisalhamento, conduzindo a deformação superficial e subsuperficial, que podem causar tensões residuais, e velocidades baixas podem resultar no desenvolvimento de danos causados pela presença de APC (Abrão & Aspinwall, 1996).

De acordo com Ezugwu & Wang (1996); Vigneau (1997) e Ezugwu et al. (1999), a usinagem de superligas induz efeitos na integridade da superfície, os quais incluem: rugosidade superficial; modificações na dureza da camada superficial devido ao endurecimento da peça; microtrincas ou macrotrincas particularmente em retificação; deformação plástica; transformações metalúrgica atribuída a alta temperatura; tensões residuais (tração ou compressão); alterações química incluindo alta temperatura de oxigenação e difusão agindo entre a peça e o material da ferramenta. Por essa razão, deve-se tomar cuidados especiais para assegurar vida de ferramenta e integridade superficial adequada a componentes usinados por intermédio de controle dos principais parâmetros, incluindo a escolha do material e geometria da ferramenta, método de usinagem, velocidade de corte, valores de avanço, profundidade de corte, etc.

No torneamento de superligas a base de níquel, o aumento da velocidade de corte, da convencional para a alta, leva a diminuir o pico de tensão de tração na superfície e a aumentar o pico de tensão de compressão, o que é benéfico (Vigneau 1997). Os efeitos do fresamento a alta velocidade ainda não são muito bem conhecidos, mas já se sabe que algumas de suas condições induzem a altas tensões de tração. Ezugwu et al. (1999) revelaram que o torneamento com ferramenta nova com aresta afiada e com ângulo de saída positivo tende a minimizar o valor da tensão residual, da deformação plástica e do endurecimento da peça. A forma da ferramenta de corte pode também afetar a superfície usinada. Melhoria do acabamento superficial e mínima camada danificada pode ser obtida na utilização de insertos redondos. Usinagem prolongada tende a aumentar a dureza da camada da superfície e também deteriorar a superfície usinada.

peças, o que elimina muitas vezes trabalhos posteriores; diminuição das forças de corte proporcional ao aumento das velocidades de corte; usinagem sem vibrações, pois as oscilações induzidas pelo corte da ferramenta são de alta frequência; melhoria na dissipação de calor do processo, pois a maior parte da energia térmica gerada se concentra no cavaco; alta taxa de remoção de cavacos e possibilidade de emprego de usinagem a seco. Por outro lado, Kramer (1987); Dewes & Aspinwall (1997); Kirschnik (1997); Schulz (1999) e Andrae (1999b) comentaram que existem também notáveis desvantagens que precisam ser consideradas, sendo estes os pontos principais: alto nível de desgaste da ferramenta, necessita de ferramentas e máquinas-ferramenta de maior custo (especiais), fusos especiais, fusos caros com baixa durabilidade (tipicamente 5000 – 10000 h na máxima velocidade rotacional), balanceamento do ferramental, sistema de controle especiais e parâmetros tecnológicos para a usinagem otimizada, os quais ainda não são totalmente conhecidos e dominados.

Salienta-se que as desvantagens descritas devem-se principalmente ao fato de que a usinagem a alta velocidade de corte é uma tecnologia recente. Com o passar do tempo novos estudos adicionarão informações que permitirão a utilização cada vez mais otimizada desta tecnologia.

### **3. USINABILIDADE E INTEGRIDADE SUPERFICIAL DE SUPERLIGAS A BASE DE NÍQUEL**

Em termos gerais, usinabilidade pode ser definida como uma grandeza que indica a facilidade ou dificuldade de usinar um material. Pode ser usada também para quantificar a performance de ferramentas de corte, fluidos de corte e geometria das ferramentas. Forças de corte, energia requerida na usinagem, vida da ferramenta, acabamento superficial, taxa de desgaste, temperatura de corte, controle de cavaco e mesmo algumas propriedades físicas, são variáveis que podem ser consideradas como medida da usinabilidade.

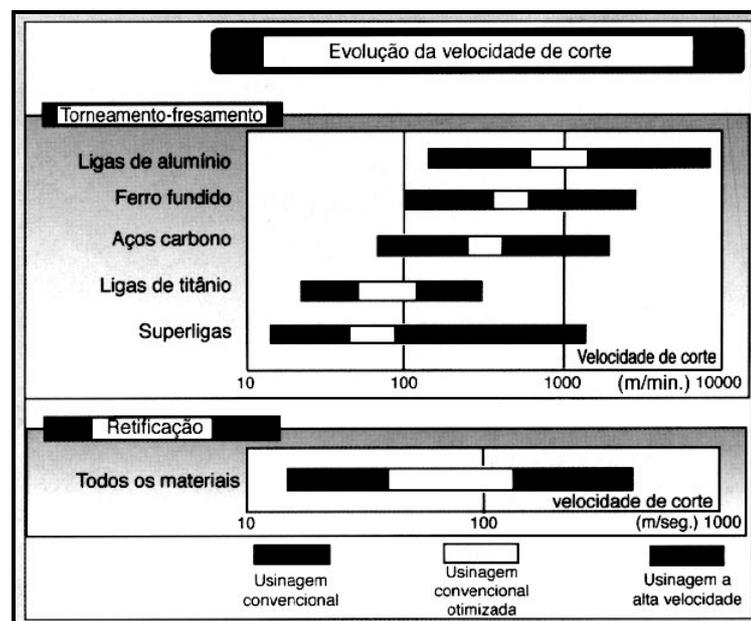
As principais propriedades das ligas de níquel são alta resistência mecânica à temperaturas elevadas, alta resistência à fluência, alta resistência à fadiga e boa resistência à corrosão. As principais aplicações são na indústria aeronáutica, nos componentes que trabalham a altas temperaturas (> 500°C), como pás e discos de turbinas, estruturas de aeronaves, câmaras de combustão, válvulas de admissão/escape, aplicações médicas, indústrias química e petroquímica, etc. As superligas representam cerca de 55% dos materiais usados para construção de motores aeroespaciais ( Gatto & Iuliano, 1994; Vigneau, 1997; Choudhury & Baradie 1998, e Machado & Silva, 1999).

As superligas de níquel são endurecidas pela precipitação de Ni<sub>3</sub> (Al-Ti) fase (gama) e pela solução sólida de elementos refratários na matriz, e a resistência mais alta à temperatura é obtida pelo aumento da fração de volume desta fase. A família das superligas de níquel apresenta uma composição química numa faixa relativamente ampla de percentuais, destacando-se os seguintes elementos: níquel até 79,6%; cromo até 23% e molibdênio até 9%. Se por um lado a composição química com elevado teor de elementos de liga confere excelentes propriedades mecânicas e térmicas às superligas de níquel, por outro lado, dificultam demasiadamente a realização da usinagem desses materiais. Choudhury & Baradie (1998) e Ezugwu et al. (1999) apresentam as principais superligas a base de níquel contendo classificação, a composição química e a densidade.

De acordo com Darwish (1997); Machado & Silva (1999); König & Gerschwiler (1999); Sharman et al. (1999) e Ezugwu et al. (1999), os principais problemas na usinagem das superligas a base de níquel, devido as características e propriedades citadas, são: possuem matrizes austeníticas e como os aços inoxidáveis, encruam rapidamente durante a usinagem, produzindo um severo endurecimento da peça. Isto pode causar problemas em passes subsequentes, contribuindo principalmente para a progressão do desgaste de entalhe na ponta

Na Europa, normalmente fala-se em velocidade de corte, enquanto nos Estados Unidos emprega-se velocidade do eixo-árvore. Muitos autores usam velocidade absoluta do eixo-árvore, sendo que a faixa mais real a ser considerada como definição inicial de usinagem a alta velocidade está em torno de 8000 rpm, ou maiores. Porém isto é enganoso porque não indica o diâmetro do eixo-árvore. É muito fácil alcançar alta velocidade com fuso de pequeno diâmetro. Uma representação mais exata da alta velocidade do fuso, do ponto de vista de projeto, é o número DN (diâmetro do fuso em “mm” multiplicado pela rotação do fuso em “rpm”). Existem várias máquinas comerciais disponíveis com o número DN na faixa de 1,5 milhões e poucos fusos (principalmente em laboratório) com número DN que excedem a 2 milhões (Smith & Tlusty, 1997).

Segundo Kitagawa et al. (1996); Schulz (1997) e Finzer apud Novaski & Corrêa (1998) a definição do que é altíssima velocidade de corte está intimamente associada ao tipo de material usinado, tipo de operação de corte e tipo de ferramenta entre outros itens. Vigneau (1997) indica na figura 1 a faixa de valores que definem a alta velocidade de corte para cada material específico. De acordo com Heisel & Gringel (1996); Skock (1998) e Schulz (1999) entende-se por usinagem a alta velocidade, a usinagem de materiais com velocidades de corte e taxas de avanço aumentadas por um fator de 5 até 8 em relação às velocidades de corte e avanços tradicionais. Enderle & Knuszynski (1998) e Müller & Soto (1999) afirmam que as definições da faixa de velocidade de HSC variam substancialmente conforme se muda de um tipo de usinagem para outro. Por exemplo, se no caso de fresamento uma aplicação de HSC envolve uma velocidade de corte da ordem de cinco a dez vezes maior que a velocidade convencional (conforme citação), o dobro da velocidade convencional já é suficiente para que os processos de furação e rosqueamento sejam considerados como HSC.



**Figura 1.** Definição de faixas de valores para HSC

## 2.1 Vantagens técnicas da HSC

Segundo Schulz (1996); Kirschnik (1997); Novaski & Corrêa (1998) e Andrae (1999a) o conhecimento da tecnologia de usinagem HSC proporciona ganhos de ordem tecnológica, a exemplo de: melhoria da exatidão das peças, especialmente em usinagem de peças delgadas; melhoria nos mecanismos de formação de cavaco; incremento da qualidade superficial das

furação tem-se observado poucos trabalhos publicados em comparação com o fresamento (Andrae, 1999a).

Muitas vantagens de HSC tem sido citadas. De acordo com Dewes & Aspinwall (1997); Schulz (1997) e Andrae (1999a) as mais comumente reivindicadas são: altas taxas de remoção, baixas forças de corte, mínima distorção da peça pela melhor dissipação do calor do processo e a capacidade de usinar peças de paredes finas. Adicionalmente à redução do tempo de produção, o uso da tecnologia HSC também produz peças de melhor qualidade superficial e dimensional. Por outro lado, a tecnologia HSC faz exigências muito particulares sobre a máquina-ferramenta. São necessárias altas velocidades no eixo-árvore para atingir as velocidades de corte desejadas no processo. As enormes faixas de avanço resultantes e os dados necessários para a aceleração só podem ser obtidos com eixos-árvore de acionamento dinâmico e estruturas de máquinas estáveis com boas características de fixação. Comandos rápidos e modernos são absolutamente essenciais para a implementação de processos de altas velocidades.

As principais propriedades das ligas de níquel são alta resistência mecânica a temperaturas elevadas, alta resistência à fluência, alta resistência à fadiga e boa resistência à corrosão, tornando difícil a sua usinabilidade. A composição química com elevado teor de elementos de liga confere excelentes propriedades mecânicas e térmicas as superligas de níquel, mas dificultam demasiadamente a realização da usinagem desses materiais. A usinagem de superligas prejudica a integridade da superfície. Por essa razão, cuidados especiais devem ser tomados para assegurar vida de ferramenta e integridade superficial adequada de componentes usinados por intermédio de controle dos principais parâmetros.

Hoje raros eventos e publicações omitem o corte a alta velocidade e os fabricantes de ferramentas, máquinas-ferramentas e pacotes de programa CAD/CAM parecem estar desenvolvendo e vendendo atualmente apenas produtos com capacitação para alta velocidade (Sinhoff et al., 1999).

## **2. UMA VISÃO GERAL DA HSC**

O conceito de usinagem a alta velocidade foi desenvolvido pelo Dr. Carl J. Salomon durante uma série de experimentos de 1924 a 1931 (Dewes & Aspinwall, 1997 e Agba, 1999). Salomon reconheceu que em princípio as temperaturas e as forças de corte tendiam a decrescer em altíssimas velocidades, mas um longo percurso teve de ser trilhado até a introdução da tecnologia HSC. Baseou-se sobre uma série de curvas de velocidade de corte plotadas comparando-as com a temperatura de corte atingida. Somente com o desenvolvimento dos eixos-árvore de alta rotação no início dos anos 80, com os quais foi possível atingir altas velocidades, abriu-se a possibilidade de serem realizadas pesquisas tecnológicas de base nessa área.

O termo “corte a alta velocidade” não é de fácil definição. O projeto da CEN (Comité Européen de Normalisation) de 05 de outubro de 1995 – “Ferramentas de fresamento para usinagem por remoção de cavacos a velocidades periféricas elevadas em máquinas para corte de metais – Requisitos de segurança” define velocidades acima de 1.000 m/min como usinagem a alta velocidade. Isso faz sentido sob o ponto de vista da segurança, mas certamente não é a melhor classificação. Para ser mais exato, devem ser considerados o material a ser usinado e o material de corte usado. Quando uma carcaça de alumínio é usinada com pastilhas de diamante, uma velocidade de 10.000 m/min ainda pode ser considerado razoável. Por outro lado, se um aço endurecido é usinado com ferramenta de nitreto cúbico de boro (CBN), a velocidade de corte de 200m/min, isto certamente pode ser considerado como usinagem HSC (Stockinger et al., 1998).

## **USINAGEM A ALTA VELOCIDADE DE SUPERLIGAS A BASE DE NÍQUEL: REVISÃO BIBLIOGRÁFICA**

**Leonardo Roberto da Silva**  
**Reginaldo Teixeira Coelho**  
**Alexandre Araújo Bezerra**

Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo - USP, Departamento de Engenharia Mecânica, 13560-250, São Carlos, SP, Brasil. E-mail: lrsilva@sc.usp.br

### **Resumo**

Apresenta-se temas relevantes à usinagem a alta velocidade de corte - HSC (*high speed cutting*) no que se refere a máquinas-ferramentas, ferramentas e mecanismos de desgastes, usinabilidade de superligas e integridade superficial. Nos meados da década de 80, a globalização da competição mudou a forma de abordagem, pelas empresas, do processo de manufatura, em especial a usinagem de componentes metálicos. Dentre as novas tecnologias que começaram a ser empregadas, e devem tornar-se o caminho certo na busca da competitividade, está a tecnologia HSC. Nos últimos anos HSC tem ganhado grande importância, sendo dada maior atenção ao desenvolvimento e à disponibilização no mercado de máquinas-ferramentas de rotações muito elevadas (25.000-100.000 rpm). O presente trabalho trata-se da usinagem a alta velocidade de superligas a base de níquel, que são conhecidas como materiais de difícil usinabilidade devido a alta dureza, alta resistência em alta temperatura, afinidade para reagir com materiais da ferramenta e baixa condutividade térmica.

**Palavras chaves:** HSC, Desgaste, Superligas de níquel, Integridade superficial.

### **1. INTRODUÇÃO**

Novas tecnologias, conceitos de automação e estratégias têm sido adotados e implementados, com o objetivo de incrementar o desempenho e eficiência da máquina e do operador. Durante os últimos anos a usinagem a alta velocidade tem ganhado importância e tem sido dada uma maior atenção ao desenvolvimento e à disponibilização no mercado de componentes de rotações muito elevadas, devendo se tornar o caminho certo a ser trilhado na busca da competitividade em curto espaço de tempo. Mas antes que a tecnologia HSC possa ser empregada de uma forma econômica, todos os componentes envolvidos no processo de usinagem, incluindo a máquina, o eixo árvore, a ferramenta e o pessoal, precisam estar afinados com as condições especiais deste processo. As máquinas de corte têm de satisfazer requisitos particulares de segurança. As ferramentas também devem estar à altura das condições térmicas severas que se originam das altas velocidades de corte.

O corte a 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 (Schulz, 1996).

Os termos HSC e HSM (*high speed machining*) estão sendo utilizados para descrever o fresamento de acabamento em altas rotações, entretanto no torneamento, rosqueamento e