



ASPECTOS TÉCNICOS DO FRESAMENTO NA ZONA DE TRANSIÇÃO ENTRE AS VELOCIDADES CONVENCIONAIS E A ALTA VELOCIDADE

Olívio Novaski

Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Mecânica
Depto de Eng. de Fabricação – Núcleo de Manufatura e Qualidade - NMQ
novaski@fem.unicamp.br – Campinas, SP, Brasil

Fábio Ricardo da Silva

Seco Tools Ind. E Com. Ltda
secoadm@secotools.com.br - Sorocaba, S.P., Brasil

Maurício Correa

Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Mecânica
Depto de Eng. de Fabricação – Núcleo de Manufatura e Qualidade - NMQ
mcorrea@fem.unicamp.br – Campinas, SP, Brasil

Francisco E. Lima

Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Mecânica
Depto de Eng. de Fabricação – Núcleo de Manufatura e Qualidade - NMQ
felima@fem.unicamp.br – Campinas, SP, Brasil

***Resumo.** Esse trabalho, procurou verificar, justamente, a região compreendida entre os processos de fresamento que utilizam velocidades de corte consideradas convencionais e as altas velocidades de corte. Para tanto, foi proposto um estudo do comportamento das classes de metal duro e cermet em um material de grande aplicação na indústria de ferramentaria e matrizaria, utilizando um equipamento de alta velocidade (HVM - High Velocity Machine). Os resultados obtidos, foram plotados e analisados, indicando uma tendência diferente dos resultados obtidos na região considerada de altíssima velocidade de corte.*

1. INTRODUÇÃO

Hoje a otimização das condições de produção se apresenta como um dos objetivos principais da indústria de bens de consumo. Nas ferramentarias e matrizarias o lote de fabricação é geralmente unitário, fato que implica na alocação de todos os custos de produção diretamente sobre um único produto. Observando atentamente esse tipo de atividade, verifica-se que grande parte do tempo disponível na máquina é gasto em operações e movimentos que não agregam valor ao produto e consomem muito tempo, tanto de operadores quanto de mão-de-obra especializada de alto custo. Além disso, o tempo restante em que a máquina efetivamente remove material é bastante elevado, podendo ser subdividido basicamente em quatro etapas distintas: desbaste, semi-desbaste, semi-acabamento e acabamento. Dentre essas quatro etapas, o acabamento consome praticamente meta-

de de todo o tempo gasto na fabricação do produto, tornando essa operação altamente improduti-
va. A esse fato, soma-se ainda que a maior parte dos perfis complexos gerados em moldes e matri-
zes sofrem operações manuais de acabamento que aumentam consideravelmente o tempo final.
Quando as operações de acabamento são efetuadas mecânica ou automaticamente, necessitam de
ferramentas esféricas de pequeno diâmetro e elevado comprimento, fato que diminui consideravel-
mente a estabilidade do sistema, induzindo a vibrações. Sob esse enfoque, a utilização da tecnologia
de usinagem a alta velocidade representa um grande salto na solução definitiva de um dos principais
problemas encontrados na indústria de moldes e matrizes, ou seja, a redução significativa nos tem-
pos de corte.

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA - A USINAGEM HSC – CONCEITOS

Definir o processo de usinagem à alta velocidade não é um problema simples de ser resolvido.
Certamente o processo de corte a alta velocidade é um tema extremamente abrangente, cujas infor-
mações são bastante limitadas, principalmente as informações relacionadas ao fresamento e/ou retifi-
cação em altas velocidades (HSM e HSG). As taxas de velocidade utilizadas atualmente nos proces-
sos de corte em geral, dependem de algumas variáveis como: o tipo de material, o tipo de operação
de corte, o tipo de ferramenta, o material cortante, etc. Mas, tais processos não sofrem uma influên-
cia significativa da tecnologia empregada. A ação de corte do processo de usinagem à alta veloci-
dade, além de ser influenciado por todos os fatores citados, também depende de modo sensível do
tipo de tecnologia disponível; ou seja, a tecnologia de corte será responsável pelo desenvolvimento
de todos os outros componentes que fazem parte do processo [Schulz & Moriwaki - 1992, Schulz
- 1996].

A usinagem em alta velocidade ou mais especificamente o corte de metais com altas veloci-
dades (High Speed Cutting) tem atraído o interesse de vários pesquisadores e engenheiros. As aplica-
ções iniciais voltaram-se principalmente para a usinagem de materiais homogêneos como o alumínio
e o cobre. Atualmente, os interesses pelo uso desse método de usinagem tem aumentado não só na
indústria aeronáutica, mas também na indústria eletro-eletrônica. A ampliação do campo de aplica-
ção desses novos métodos tornou-se possível, graças ao desenvolvimento de novos materiais cor-
tantes, como, Si_3N_4 utilizado principalmente em ferros fundidos e o PCBN utilizado em ferros fundi-
dos e aços endurecidos. No entanto, em outros tipos de materiais, de corte extremamente difícil
(ligas à base de níquel, ligas de titânio, aços ferramenta, etc...) a limitação da velocidade de corte
fica estabelecida principalmente pelo desgaste da ferramenta [Schulz & Sahm - 1996] A definição
de zona de transição e à alta velocidade representa um problema de difícil solução. Certamente as
taxas de velocidade utilizadas nos processos de corte em geral, dependem de diferentes variáveis.
Observando-se a figura 1, verifica-se a existência de uma grande região compreendida entre as
operações de corte com velocidades convencionais e as operações que trabalham com altas veloci-
dades.

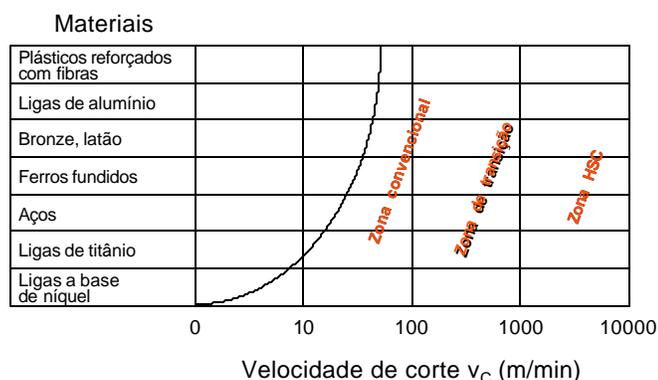


Figura 1 - Faixas de velocidade limite para operações HSM [Schulz & Moriwaki – 1992]

Essa região intermediária pode ser denominada de área de transição e apresenta um comportamento bastante peculiar que difere das outras duas regiões. Observando a figura 1, verifica-se que, dependendo do tipo de material a ser usinado, as frequências necessárias no eixo árvore são extremamente elevadas, limitando consideravelmente a oferta de equipamentos que atendem a esse propósito. Os ensaios objetivaram basicamente, abordar as tendências dessa região quanto ao comportamento de alguns dos diferentes materiais cortantes disponíveis no mercado. Para tanto foi utilizado máquinas, dispositivos e ferramentas largamente difundidos, porém trabalhando com parâmetros de corte (velocidade de corte, avanço por dente, etc...) típicos da zona de transição.

3. PROCEDIMENTOS EXPERIMENTAIS

As experiências conduzidas em laboratório, objetivaram o levantamento de curvas de desgaste para os materiais cortantes especificados. Todas as curvas de desgaste foram monitoradas através do comprimento linear usinado em cada passada da ferramenta. Resumindo, a cada 200 mm de material usinado, a ferramenta era retirada da região de contato e parada para medição e análise. Foi estipulado inicialmente como critério de fim de vida, a usinagem de 8400 mm de material ou o lascamento severo da aresta de corte (Observação: os 8400 mm correspondem à um tempo médio de contato da ferramenta de 20 minutos. Esse tempo médio foi adotado, devido à utilização desse padrão pela maioria dos fabricantes de ferramentas de corte). Caso os 8400 mm fossem atingidos, haveria a comparação do desgaste de flanco máximo VB da pastilha. Foi considerado lascamento severo, o lascamento de pelo menos 60% do comprimento utilizado da aresta de corte, ou seja, utilizando um $a_p = 4.0$ mm, o lascamento seria considerado severo se pelo menos 2.4 mm da aresta de corte estivesse lascada. O corpo de prova foi fixado através de uma morsa de fuso hidráulico de 4 toneladas. A máquina utilizada foi um centro de usinagem horizontal CNC Heller, de 30 kW, com fresa de topo de fixação mecânica com corte lateral com apenas um inserto.

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Na condução dos testes de laboratório cabe ressaltar que utilizou-se pastilhas do mesmo lote de fabricação afim de evitar dispersão nos pontos. O lote do material usinado também foi mantido constante com o mesmo objetivo. Para cada ensaio foram executadas três repetições para verificar a dispersão dos pontos. Os valores representados nos gráficos das figuras 2, 3, 4, 5, 6 e 7 representam os pontos médios obtidos experimentalmente com uma dispersão máxima entre 10 e 15%.

As figuras 2, 3, 4, 5, 6 e 7 apresentam a evolução dos desgastes em determinadas condições de corte para intervalos lineares previamente estabelecidos. A simples comparação das condições de trabalho com a evolução do desgaste de flanco não oferece informações suficientes para a análise do comportamento da classe em condições de trabalho não típicas (fresamento de topo na região de transição). A T15M por ser uma classe basicamente recomendada para a usinagem de ferros fundidos cinzentos e ferros fundidos nodulares em condições de elevada severidade (campo de aplicação ISO K01-K25), considera a utilização de seções de corte relativamente altas em combinação com velocidades particularmente elevadas (Seco Tools AB - Technical Guide - 1984).

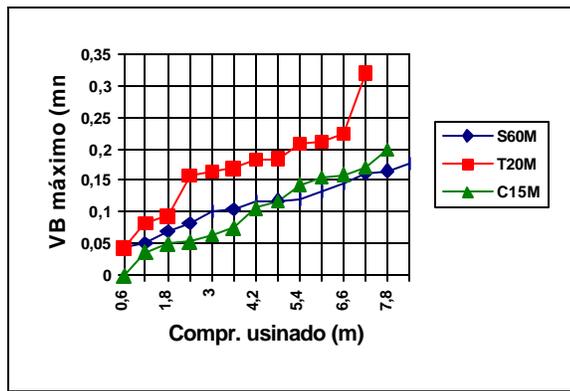


Figura 2 - Curva de desgaste do ensaio 1 $v_c=300$ m/min, $f_z=0.08$ mm/dente, $a_p=4.0$ mm, $a_e=4.0$ mm, mov. concordante.

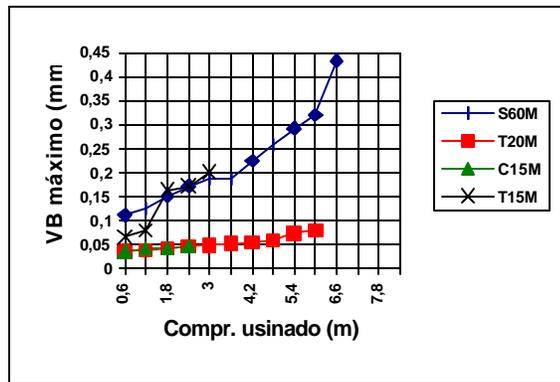


Figura 3 - Curva de desgaste do ensaio 2 $v_c=300$ m/min, $f_z=0.12$ mm/dente, $a_p=4.0$ mm, $a_e=4.0$ mm, mov. concordante.

Para tanto, o procedimento de análise se tornará mais prudente e seguro se houver a abordagem das características metalúrgicas da classe. Em primeira aproximação a classe T15M apresenta as seguintes características (Seco Tools do Brasil - 1997): espessura total da cobertura - 3.5 μm , $\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Ti}(\text{C},\text{N}) + \text{TiC} + \text{Ti}(\text{C},\text{O},\text{N})$, com substrato (Zona enriquecida de cobalto: ausente $\text{Co} \cong 6\%$). A classe T15M apresenta sua primeira camada de cobertura composta por Al_2O_3 . O óxido de alumínio é um composto de baixo coeficiente de dilatação térmica e baixa condutividade térmica. Por ser um composto basicamente refratário, irá proteger o substrato da pastilha contra a ação das elevadas temperaturas geradas nas interfaces de contato entre o cavaco, a ferramenta e a peça. No entanto, a espessura total da camada de cobertura da classe T15M não é comparativamente elevada.

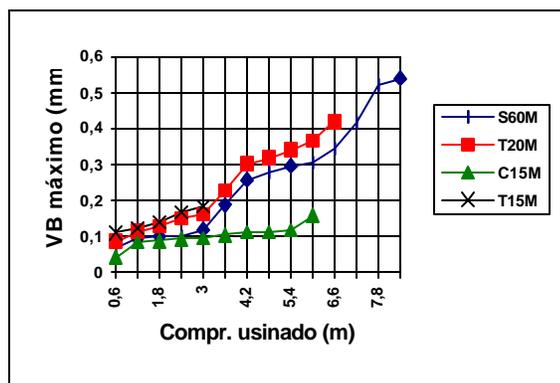


Figura 4 - Curva de desgaste do ensaio 3 $v_c=348$ m/min, $f_z=0.08$ mm/dente, $a_p=4.0$ mm, $a_e=4.0$ mm, mov. concordante.

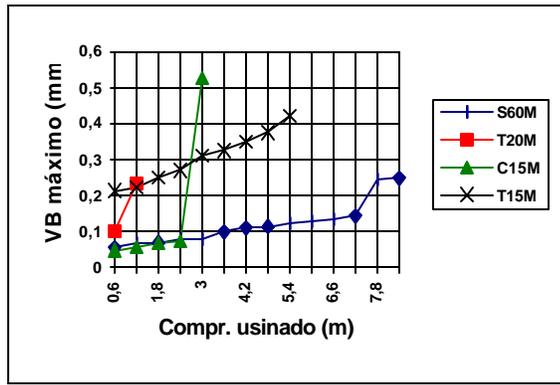


Figura 5 - Curva de desgaste do ensaio 4 $v_c=348$ m/min, $f_z=0.12$ mm/dente, $a_p=4.0$ mm, $a_e=4.0$ mm, mov. concordante.

Essa menor espessura limitará a capacidade de restrição do fluxo de calor, tornando o substrato mais sensível à diminuição de dureza. Por outro lado, o substrato por apresentar uma boa tenacidade e uma dureza moderada, será mais sensível às reduções de dureza localizadas, principalmente em regiões próximas à aresta de corte. Além do chanfro de proteção, o processo de cobertura CVD exige por sua vez, um maior arredondamento da aresta para melhorar a aderência das diferentes camadas de cobertura. Esse maior arredondamento da aresta dificulta a utilização da classe em aplicações onde a espessura do cavaco é muito pequena (cavacos delgados) ou seja, em baixa velocidade de avanço. Nesses casos, a adesão e a fadiga térmica serão responsáveis pelo lascamento da aresta de corte. Esse fato pode ser observado através das figuras numeradas de 2 a 7, onde a velocidade de corte de 300 m/min combinada com a taxa de avanço de 0.08 mm/rotação levou ao lascamento severo da aresta de corte em comprimentos inferiores a 600 mm (figura 2).

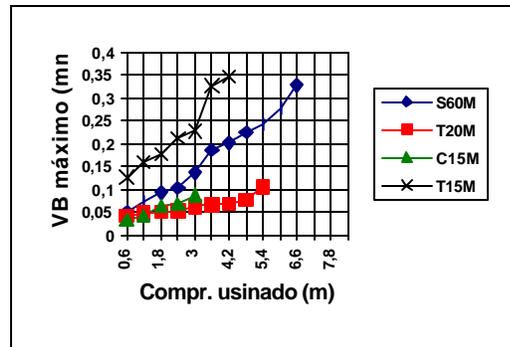


Figura 6 - Curva de desgaste do ensaio 1v $v_c=402$ m/min, $f_z=0.08$ mm/dente, $a_p=4.0$ mm, $a_e=4.0$ mm, mov. concordante.

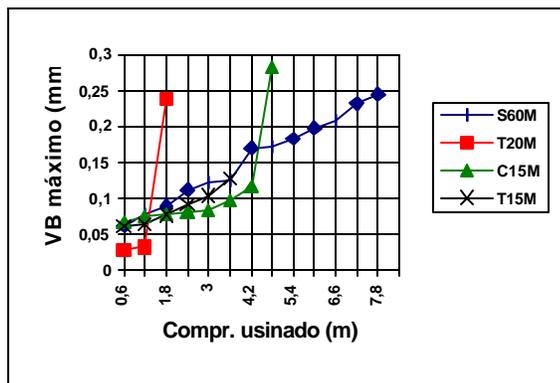


Figura 7 - Curva de desgaste do ensaio 1 $v_c=402$ m/min, $f_z=0.12$ mm/dente, $a_p=4.0$ mm, $a_e=4.0$ mm, mov. concordante.

No entanto, o aumento da temperatura de corte ocasionado pelo aumento da espessura, possibilitou a alteração do comportamento do desgaste, minimizando a adesão e melhorando o desempenho geral da classe (figura 3). Ainda, observando as figuras, verifica-se que à 348 m/min de velocidade de corte, a tendência de evolução do desgaste de flanco se assemelha muito ao observado na velocidade de 300 m/min (figuras 3 e 4). Contudo, o melhor desempenho pode ser explicado pela minimização da soldagem de partículas do cavaco (adesão) pelo aumento da temperatura de corte. Considerando a velocidade de 402 m/min, observa-se que o aumento da taxa de avanço levou a uma diminuição do valor do comprimento linear usinado, devido à deformação localizada e ao lascamento da camada de cobertura, causados pelo aumento excessivo da temperatura de corte. Durante o levantamento experimental de dados, pôde ser observado que depois do lascamento da cobertura existia um processo acelerado de remoção da cobertura, levando ao lascamento severo da aresta de corte. Assim, todos os parâmetros responsáveis pelo aumento da temperatura de corte, favoreceram o desempenho da classe, todavia nota-se pelas figuras 2, 3, 4, 5, 6 e 7 que, existe um limite de aumento da temperatura pela combinação $v_c = 402$ m/min e $f_z = 0.12$ mm/dente. A classe T20M apresenta as seguintes características (Seco Tools do Brasil - 1997): Cobertura (Espessura total da cobertura - $4.5 \mu\text{m}$) TiN + Al_2O_3 + TiN + Ti(C,N) + TiN, com substrato apresentando zona enriquecida de cobalto ausente. Observando a evolução dos desgastes para a classe T20M através das figuras 2, 3, 4, 5, 6 e 7, verifica-se que em taxas de avanço menores ($f_z = 0.08$ mm/dente) existe um comportamento teóricamente esperado, ou seja, uma diminuição do comprimento linear usinado com o aumento da velocidade de corte. Para a taxa de avanço $f_z = 0.08$ mm/dente a redução da vida da ferramenta pode ser atribuído principalmente à deformação do substrato e à fase. Observando mais atentamente, verifica-se que a 402 m/min o desempenho foi ligeiramente aumentado. Esse aumento pode ser atribuído principalmente à diminuição do efeito de soldagem de partículas sobre regiões que apresentavam micro lascas. Ou seja, o aumento da velocidade de corte (v_c), mantendo-se o avanço, provocou uma piora da vida da ferramenta, o mesmo ocorrendo com o aumento do avanço, que conduziu à aceleração do lascamento do revestimento. A S60M é uma classe sem cobertura com tenacidade extremamente elevada, indicada principalmente para operações severas de desbaste em condições altamente desfavoráveis (campo de aplicação ISO P30-P45, M30-M35). Apresenta um bom desempenho em altas taxas de avanço e grandes profundidades de corte. Apresenta também um bom desempenho em materiais difíceis de serem usinados que endurecem por precipitação ou materiais que encruam facilmente, exigindo elevada tenacidade (Seco Tools AB - Technical Guide - 1994). Observando metalúrgicamente a classe, destacam-se as seguintes características (Seco Tools do Brasil - 1997): Substrato: Zona enriquecida de cobalto ausente. Observando a evolução do desgaste de flanco máximo para a classe S60M através das figuras 2, 3, 4, 5, 6 e 7, verifica-se que em baixas taxas de avanço ($f_z = 0.08$ mm/dente), o aumento da velocidade de corte produziu um aumento natural da marca de desgaste para os mesmos comprimentos lineares usinados, devido ao aumento da temperatura na região de corte. Com a combinação de uma velocidade de corte de 300 m/min e uma taxa de avanço de 0.08 mm/min foram gerados baixo encruamento e pequena soldagem de cavacos, fato que minimizou o lascamento severo da pastilha. O aumento da velocidade de corte para 348 m/min trouxe como consequência um aumento considerável da temperatura de corte. O aumento da marca de desgaste, nessa faixa de velocidade pode ser explicado principalmente pelo aumento da temperatura de corte. O aumento da geração de calor tende a reduzir a dureza do substrato facilitando a abrasão mecânica do cavaco. No entanto com uma velocidade de corte de 402 m/min, mantendo a taxa de avanço de $f_z = 0.08$ mm/dente, o nível de desgaste de flanco foi ligeiramente inferior que na velocidade de 348 m/min. Esse fato pode ser atribuído principalmente à menor adesão de cavacos, constatada visualmente no microscópio. O menor desempenho da classe S60M, a 402 m/min, pode ser atribuído à redução ainda mais significativa da dureza do substrato em combinação ao encruamento do

cavaco. Com maior espessura de corte ($f_z = 0.12$ mm/dente) pode ser observado um aumento significativo da marca de desgaste na velocidade de corte de 300 m/min. Nessas condições, o maior encruamento causado pelo aumento da espessura do cavaco em combinação com uma grande adesão levaram ao lascamento severo da aresta de corte em um menor comprimento linear usinado. Embora a soldagem de cavacos tenha sido minimizada a combinação da craterização com a redução de dureza fez com que a pastilha apresentasse um desempenho ligeiramente inferior ao encontrado com a velocidade de 348 m/min. Assim, todos os parâmetros responsáveis pelo aumento da temperatura de corte, favoreceram o aumento do desgaste de flanco, todavia nota-se pelas figuras 2, 3, 4, 5, 6 e 7 que, a partir de determinado patamar de temperatura inicia-se o processo de lascamento da aresta de corte, ocasionado principalmente pela adesão. A C15M é um cermet baseado em Ti(C,N) especialmente desenvolvido para operações de fresamento no campo de aplicação ISO P10-P20. Apresenta um bom desempenho em operações de acabamento e semi-desbaste de aços em geral ou operações de acabamento fino em aços inoxidáveis austeníticos (Seco Tools AB - Technical Guide - 1994). Observa-se que os cermets apresentam como características principais, elevada dureza e pequeno arredondamento da aresta. Esse menor arredondamento, torna-se particularmente interessante em operações que utilizam baixas taxas de avanço. A classe C15M apresenta como constituintes básicos Ti(C,N) + WC + TaC + Co + Ni + Mo. A baixa afinidade química dos cermets com uma ampla gama de materiais os torna uma boa opção para operações de acabamento de aços em elevadas velocidades de corte (Seco Tools AB - 1991). Observando a evolução do desgaste de flanco máximo para o cermet C15M através das figuras 2, 3, 4, 5, 6 e 7, verifica-se que com pequenas espessuras ($f_z = 0.08$ mm/dente), o aumento da velocidade de corte produziu um aumento natural da marca de desgaste para os mesmos comprimentos lineares usados. Esse aumento da marca de desgaste pode ser explicado pelo aumento da temperatura na região de corte, diminuindo a dureza a quente. Com a combinação da velocidade de corte de 300 m/min e o avanço de 0.08 mm/dente, o desgaste de flanco máximo e o comprimento linear usinado foram consideravelmente maiores que os valores levantados nas velocidades de 348 e 402 m/min.

5. CONCLUSÕES

1. Pode ser verificado através dos experimentos práticos que o fenômeno do desgaste predominante para o material utilizado dentro da faixa de velocidade de corte de 300 a 400 m/min, foi a aresta postiça e a adesão.
2. A forte adesão e a soldagem de cavacos levou ao lascamento generalizado das classes de metal duro com e sem cobertura e da classe de cermet.
3. O cermet apresentou, como era esperado, um menor desgaste de flanco, devido à maior dureza a quente, a maior estabilidade química e a menor tendência à soldagem dos cavacos. No entanto, seu desempenho não foi superior à classe S60M (metal duro sem cobertura), devido à menor tenacidade e à maior tendência a propagação de trincas.
4. As classes de metal duro com cobertura foram particularmente sensíveis ao lascamento severo, devido à menor dureza a quente do substrato, levando a deformação de pontos localizados da aresta de corte e ao lascamento da camada de cobertura.
5. As classes de metal duro com cobertura foram particularmente sensíveis ao encruamento do material e a variação de dureza localizada (variação de carga), acelerando fenômenos como o lascamento da camada de cobertura e o aumento da adesão.
6. As classes sem cobertura, com elevada tenacidade, se apresentaram mais indicadas para as operações na região de transição, entre processos convencionais e processos considerados de elevada velocidade, devido à maior segurança da aresta de corte mesmo em condições de desgaste mais severos.

REFERÊNCIAS

- Schulz, Herbert - High Speed Machining, Seminário “Usinagem com Altíssima Velocidade de Corte” - Universidade Metodista de Piracicaba, 10/10/1996.
- Sahm, D - The Technology of High Speed Cutting, Seminário “Usinagem com Altíssima Velocidade de Corte” - Universidade Metodista de Piracicaba, 10/10/1996.
- Schmitt, Th. - High Speed Milling Machines, Seminário “Usinagem com Altíssima Velocidade de Corte” - Universidade Metodista de Piracicaba, 10/10/1996.
- Finzer, Thorsten - The HSC Technology, Seminário “Usinagem com Altíssima Velocidade de Corte” - Universidade Estadual de Campinas, 1997.
- Schulz, H., Moriwaki, T. - High Speed Machining, Annals of the CIRP, v.41/2/1992
- Thusty, J - High Speed Machining, Annals of the CIRP, v.42/2/1993.
- Seco Tools AB, Milling - Technical Guide, Sweden. Seco Tools AB, Fagersta, Sweden 1994.
- Seco Tools AB, Technical Information - Milling Basic Education, Sweden. Seco Tools AB, Fagersta, Sweden.
- Seco Tools AB, Technical Information - C15M The New Cermet Grade for Milling, Sweden.
- Seco Tools AB, Milling Basic Education Package - Presentation, Sweden, Seco Tools AB, Fagersta, 1995.
- Seco Tools AB - Copy Milling - Catalog and Technical Guide, Sweden, Fagersta, 1996.

THE MILLING PROCESS IN THE TRANSITION ZONE BETWEEN CONVENTIONAL SPEED AND HIGH SPEED CUTTING

Abstract. This work found to verify the region between the milling processes that uses conventional cutting speeds and HSC. Therefore, it was proposed a hardmetal and cermet grade behavior survey in a wide application material for mould and die suppliers and it was used a HVM (high velocity machine) equipment. The achieved results, were plotted and analysed, showing a different tendency from the results achieved in the HSC considered region. The results of this work showed that the intermediate region between the high speed cutting and the conventional speed cutting must be better studied, mainly because actually is the more important region for the metal mechanics industry