

Novos desenvolvimentos em Usinagem em Alta Velocidade

Ian Faccio

Laboratório de Engenharia de Fabricação - Dept. de Eng. Mecatrônica e de Sistemas Mecânicos–EPUSP-Av. Prof. Mello de Moraes, 2231, 05508-900, S. Paulo, SP-ian.faccio@volkswagen.com.br

Gilmar Ferreira Batalha

Laboratório de Engenharia de Fabricação – PMR –EPUSP-Av. Prof. Mello de Moraes, 2231, 05508-900, S. Paulo, SP - gfbatalh@usp.br

1. Introdução

A *High Speed Machining* (Usinagem com Altíssima Velocidade de Corte), no âmbito da melhoria do processo em tempo, pode ser considerada uma redução no tempo global do processo, e não somente durante o corte do material. Os materiais e os elementos de máquina envolvidos na construção das máquinas que permitem a usinagem em altíssima velocidade garantem uma redução do tempo de aproximação e recuo da ferramenta, bem como do tempo de troca destas ferramentas, além da evidente redução do tempo de usinagem.

Referente a qualidade, os processos em HSM permitem uma qualidade equivalente, as vezes até superior, à de processos convencionais executando as mesmas peças, tanto em qualidade dimensional (tolerâncias de dimensão, forma e ajuste) como em qualidade superficial (rugosidade). Entretanto, é no custo que provavelmente surge o maior obstáculo para a utilização de processos em HSM: tanto as máquinas, bem como o ferramental e o consumo de energia são, até o momento, bastante onerosos e muitas vezes não permitem a utilização deste processo em diversas operações.

Tendo em vista estas três características, seria interessante que se verificasse a possibilidade de conseguir processos inteiros (envolvendo máquina, ferramenta, peça e dispositivos) que mostrassem viabilidade de custo, sem deixar de lado, é claro, o tempo e a qualidade desta fabricação. Fabricações difíceis para processos convencionais (por exemplo, usinagem de materiais endurecidos, peças de grande complexidade, alta produtividade aliada a alta flexibilidade de um processo) são os melhores pontos de partida para se verificar tal possibilidade, pois em geral são de custo elevado e permitem uma maior elasticidade ao que seria permitido ou não, quando fosse introduzida a usinagem com altíssima velocidade de corte.

2. Colocação do Problema / Estado da Arte

McGee, em 1979 observou, enquanto realizava experimentos com HSM em alumínio para o exército norte-americano, que os conceitos existentes a respeito de usinagem com velocidades de corte altas não eram razoáveis. As teorias vigentes pregavam que existiria uma temperatura máxima de corte a uma velocidade de corte intermediária, e que esta temperatura diminuiria conforme a velocidade de corte fosse aumentada a partir deste ponto.

Caso a temperatura do corte diminuísse após atingir um máximo, haveria então duas velocidades de corte que resultariam em uma mesma temperatura, fato nunca observado: a temperatura era sempre crescente com o aumento da velocidade de corte.

Uma vez que esta influência da temperatura constantemente é ligada ao desgaste da ferramenta, um desenvolvimento mais voltado a este tipo de usinagem veio sendo estudado desde então, apoiado pelo desenvolvimento de novos materiais para ferramentas. Materiais como nitreto cúbico de boro e cerâmicas, que suportam maiores temperaturas de trabalho, contribuíram em muito para a busca de novos limites de usinabilidade em materiais.

Atualmente, a grande consumidora a adotar esta tecnologia de usinagem tem sido a indústria automobilística, que utiliza principalmente o fresamento de topo com HSM para fabricações de moldes para estamparia. Um dos principais motivos para se adotar a altíssima velocidade de corte para tal tarefa é a possibilidade de se eliminar o retrabalho dos moldes, efetuado por mão de obra altamente especializada e cara. Fatores como tempo e flexibilidade de produção também influíram nesta decisão.

Além deste tipo de operação com HSM, já existem aplicações também para linhas flexíveis de usinagem de cabeçotes de motor com furações através de usinagem com altíssima velocidade de corte. Tanto cabeçotes de motor de alumínio como de ferro fundido podem ser fabricados utilizando esta tecnologia com níveis de produtividade equivalentes ou melhores que os processos de fabricação convencionais.

3. Definição de High Speed Machining

O conceito de HSM por muitos anos foi definido como sendo um processo de fresamento de topo com ferramentas de pequeno diâmetro e rotações na faixa de 10.000 a 100.000 rpm. Entretanto, este processo, inicialmente aplicável a ligas leves,

gradualmente foi sendo utilizado para outros materiais, incluindo aços e ferro fundido endurecidos.

Uma definição mais atualizada da altíssima velocidade de corte é apresentada abaixo, considerando-se curvas de transição da usinagem convencional para a HSM para diferentes materiais.

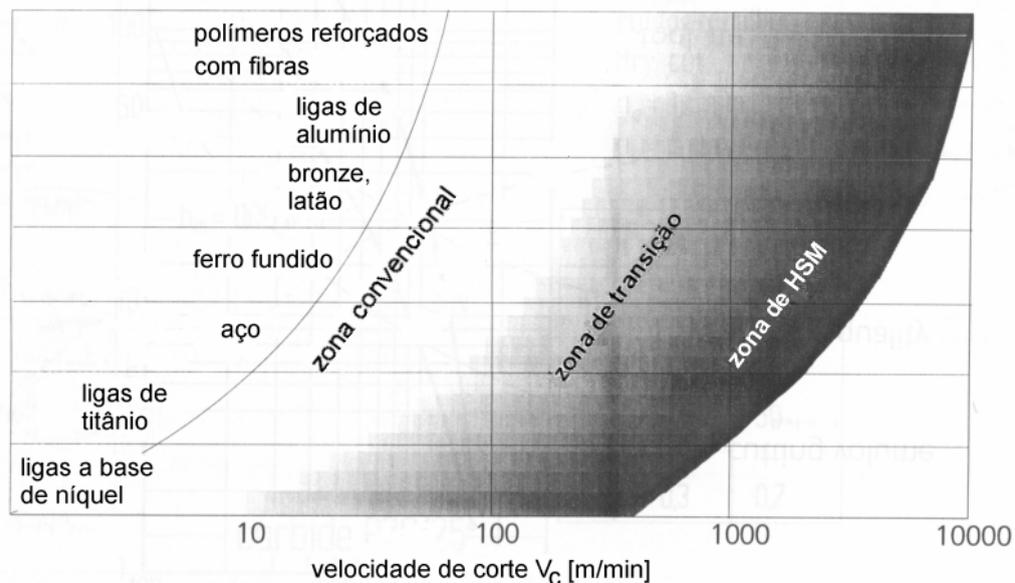


Figura 1: Campo da aplicação da velocidade de corte V_c em relação ao material usinado

Esta figura tem a vantagem de conseguir reunir diversas informações relacionadas ao processo de usinagem, como o material usinado e a velocidade de corte V_c , porém não considera variáveis importantes como o material da ferramenta de corte ou o avanço.

Há ainda uma classificação apresentada em que três classes para máquinas fresadoras são estipuladas através da velocidade disponível do fuso e do máximo avanço obtido pela máquina, conforme observado na figura abaixo.

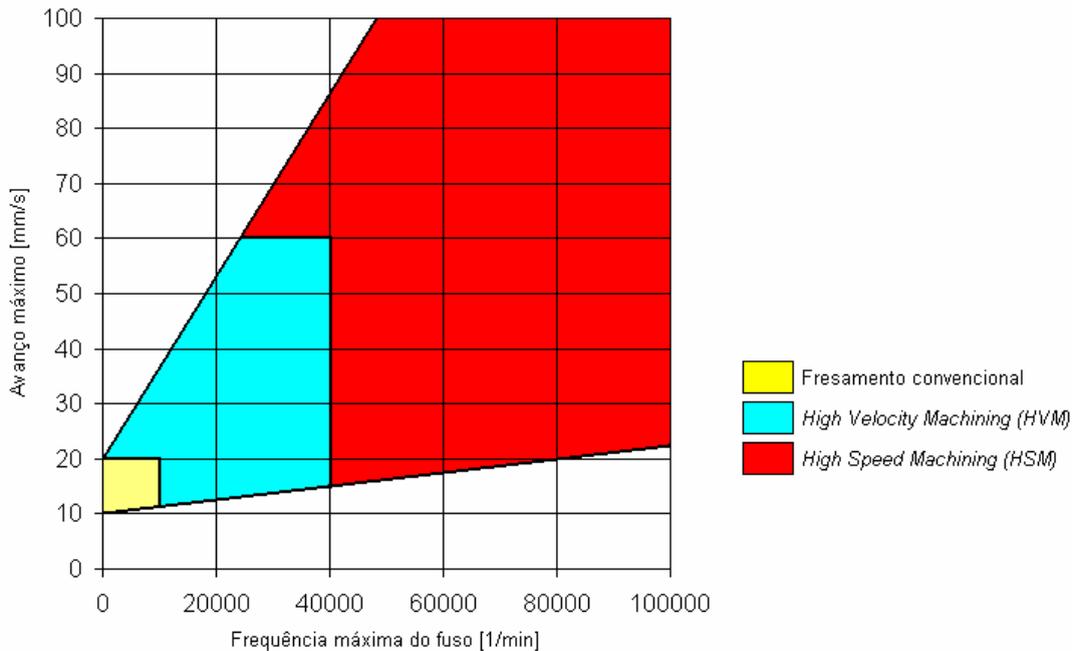


Figura 2: Classificação de máquinas fresadoras através da velocidade de fuso disponível e do máximo avanço permissível

Através da semântica inglesa, que define dois sinônimos para velocidade (velocity e speed), o autor defende que existam duas classes de máquinas que operam com altíssima velocidade de corte: no campo inferior, a HVM (High Velocity Machining), encontram-se máquinas que de uma maneira geral permitem volumes de remoção de metal médios e altos, composta por centros de usinagem de porte elevado para fresamento de moldes grandes e por centros de usinagem para produção de lotes pequenos e médios (ou seja, a maioria das máquinas disponíveis comercialmente); no campo superior, a HSM legítima para este autor, restringe-se às máquinas que operam em velocidades de corte e avanços máximos para volumes de remoção de metal médios e pequenos, que são aquelas destinadas a manufatura de pequenos moldes, além de novos conceitos de maquinário e protótipos de laboratório.

Esta conceituação é extremamente útil no sentido da seleção de materiais e elementos para construção das máquinas, além dos sistemas de comando computadorizado.

4. Processos de fabricação envolvendo High Speed Machining

Fresamento de Topo: O processo com HSM atualmente mais difundido é, sem dúvida, o fresamento de topo, tanto para moldes de aço e ferro fundido como para alumínio e ligas leves. Grande parte dos esforços de pesquisa neste sentido foram e são destinados a indústria aeroespacial, que pela necessidade de fabricar peças em pequenos lotes, ou moldes para estampagem de baixo custo, ou ainda estruturas de ligas de titânio ou ligas leves, acabavam por tornar a HSM um processo atraente, apesar de suas desvantagens. Todavia, avanços nas técnicas de construção de máquinas possibilitaram a utilização deste processo em outras áreas, seja por viabilidade econômica ou por vantagens de tempo e flexibilização. As principais aplicações são destinadas a produção de componentes de pequeno lote produtivo, moldes para fundição, matrizes para forjamento, moldes de injeção e moldes de sopro, eletrodos em grafite e cobre para a eletro-erosão, além de aplicações para usinagem de paredes finas.

Torneamento: Mais recentemente, de 1990 em diante, o torneamento com altíssima velocidade de corte passou a ser considerado como uma alternativa razoável em processos de fabricação, em parte pela evolução nas técnicas utilizadas e em parte pelo barateamento dos componentes para fabricação de máquinas e das ferramentas utilizadas para esta tecnologia. Este processo é, em sua maioria, destinado a componentes de ligas leves e ligas de titânio. A indústria aeroespacial voltou-se para esta possibilidade para a construção de peças de mísseis e outras estruturas cilíndricas feitas de materiais de dureza elevada. Algumas das considerações voltadas ao torneamento em duro são válidas também para o processo de torneamento com HSM: altas taxas de remoção de material, maior flexibilidade de processo (perfis e múltiplas faces de usinagem sem mudança ou dressagem de rebolo) e características ecologicamente favoráveis durante a fabricação (mínima quantidade de lubrificação ou nenhum líquido refrigerante para o corte, logo não exigindo instalações dispendiosas e nocivas ao meio ambiente para transporte e separação do cavaco).

Furação: A aplicação de HSM para furações tem suas aplicações restritas, de uma maneira muito mais incisiva, ao material da ferramenta, do que as outras aplicações com HSM. A validade da lubrificação do corte ainda é discutida, seja por mínimas quantidades de lubrificante (MQL, em que se pulveriza um fluido de corte lubrificante com ar comprimido), ou por revestimentos aplicados a broca (que a rigor não é um lubrificante, mas uma camada sólida, como Nitreto de Titânio e outros). Em todo

caso observado, a furação com altíssima velocidade de corte é de quatro a dez vezes mais produtiva (mais velocidade por desgaste de ferramenta) quando comparada a outras alternativas de furação. Porém, o gasto atrelado a este processo com energia e instalações para o sistema de refrigeração muitas vezes tendem a condenar este tipo de conceito de usinagem. Os maiores campos de aplicação do processo de furação com HSM encontram-se na indústria eletrônica, na fabricação mecânica de peças de baixa produção seriada, em processos que se exigem altas qualidades dimensionais para furos pequenos (em muitos casos pode-se descartar o brunimento) e produções seriadas de peças de ligas leves como magnésio e alumínio.

Outros Processos: utilizando a tecnologia de HSM, outras alternativas de usinagem de materiais encontram vantagens em relação a sua contraparte convencional. Por exemplo, o alargamento de furos é bastante difundido nos últimos anos, principalmente devido a sua característica de alta precisão geométrica. Com as principais aplicações voltadas para peças em alumínio, aço e ferro fundido cinzento, a preferência neste tipo de operação é para alargamentos com alargadores, ao invés de mandrilhamento de furos. Há, evidentemente, vantagens e desvantagens de um processo sobre o outro, mas estes quesitos são aumentados devido as condições de corte pertinentes a HSM. Em operações de acabamento de perfis de alumínio para fabricação de esquadrias, são possíveis reduções de até 60% no tempo de trabalho, utilizando a usinagem com altíssima velocidade de corte para todas as operações, incluindo o corte: serras circulares com rotações muito elevadas garantem uma alta repetibilidade neste processo, além de permitir uma maior sistematização do fluxo produtivo por reduzir a mão de obra envolvida. Alguns pesquisadores relatam que aplicações de processo de usinagem com altíssima velocidade de corte em produção de larga escala são viáveis. Ressaltam entretanto que para que se atinja esta viabilidade, a área de trabalho dentro da máquina, seja uma linha transfer ou uma linha flexível de centros de usinagem, deve ser a menor possível. Com esta redução de espaço pode-se reduzir volumes de dispositivos de fixação, minimizar a quantidade de meios de refrigeração e diminuir sistemas de amortecimento. Existem desenvolvimentos do processo de fresotorneamento com altíssima velocidade de corte, para uma tentativa da substituição do torneamento e/ou da retificação de virabrequins de aço forjado.

5. Materiais e Métodos de Ensaio envolvendo HSM

Não existe ainda uma norma para ensaios envolvendo HSM, como há na maioria de outros processos de fabricação: tanto devido a sua utilização recente como ao fato de ser um processo de complexidade elevada, muitas das análises realizadas contemplam poucas variáveis em casos específicos, obtendo informações de extrema valia, porém de pouca utilidade ao se variar minimamente as condições em que foram obtidas.

Destas análises específicas, pode-se identificar 8 grandes conjuntos em que estas pesquisas encontrem compatibilidade: desgaste de ferramenta de corte, acabamento superficial, qualidade dimensional de peça acabada, análise da vibração durante a usinagem, esforços de corte, morfologia de cavaco, custos econômicos e temperatura durante a usinagem.

As medições fundamentadas em medir algum tipo de desgaste de ferramenta de corte são, de longe, a maior base de dados existente na literatura disponível. Diversos critérios de monitoramento indireto são adotados para mensurar o volume de material removido da ferramenta de corte após a usinagem. Os trabalhos podem utilizar critérios de comprimento da área desgastada da aresta da pastilha, como o VB, para comparar diversas classes de ferramentas de usinagem assim como demonstrar o comportamento da evolução do desgaste durante o corte. Não são raros também casos de medição de desgaste por intermédio de um valor de vida de ferramenta, geralmente através de comparações de comprimento de corte efetuado ou tempo de usinagem decorrido até um critério de falha preestabelecido, como quebra ou aresta postiça.

Para os trabalhos que adotam o acabamento da superfície usinada como parâmetro de análise, toda a literatura aponta para a utilização de valores normalizados comuns as operações de usinagem corriqueiras, tais como R_a , R_z , R_{max} , etc. Algumas pesquisas enfocam o mínimo valor de algum índice de rugosidade que pode ser alcançado, em determinadas condições de corte com HSM. Evidentemente buscando comprovações de operações de acabamento que possam ser substituídas pelo processo com HSM que analisam, buscam assim indicar todos os parâmetros de corte e características da ferramenta que atingem valores de índices de rugosidade menores ou iguais aos de processos de fabricação caros e inflexíveis, tais como retificação e polimento.

Partindo para o grupo das pesquisas voltadas a análise da qualidade dimensional da peça acabada obtida por usinagem com altíssima velocidade de corte, pesquisas reportam as condições de usinagem de topo com HSM que chegam a variar dezenas

de micra devido a deflexão da ferramenta utilizada, sendo que esta deflexão aumenta consideravelmente com o progresso de seu desgaste. Talvez a principal aplicação da variação dimensional para instalações de alta produção com HSM seja o estudo voltado a qualidade geral de furações em peças de ferro fundido: extensos testes têm sido desenvolvidos de forma a determinar quanta influência o avanço durante a usinagem com altíssima velocidade de corte tem sobre as principais tolerâncias de furos. Características como desvio de posição de centro, conicidade, circularidade, desvio de diâmetro e inclinação apresentam-se muito melhores que as obtidas por processo convencionais, entretanto não aparentam ter uma tendência de variação com relação ao avanço.

O grupo de análises da vibração durante o processo de usinagem com altíssima velocidade de corte encontra dificuldades no processamento e leitura dos fenômenos que considera relevantes para a modelagem e controle de trepidação (conhecido também como "chatter control", do inglês): não apenas devido à rapidez que os fenômenos analisados ocorrem, mas também por causa da elevada rigidez exigida nas máquinas de HSM, que atrapalha ainda mais o monitoramento deste tipo de leitura.

Em relação ao monitoramento direto de esforços de corte, tais como forças de corte e de avanço, há uma dificuldade inerente ao processo de HSM. Tanto dificuldades imediatas, como a ausência de placas dinamométricas comercialmente disponíveis para este tipo de usinagem, bem como a dificuldade em se instrumentar deslocamentos e acelerações em tempos muito curtos, força a necessidade de processamentos e leituras mais caros e sofisticados. Ainda assim, muitos autores contribuem para o entendimento da dinâmica da usinagem com processos de monitoramento relativamente simples. Mesmo com métodos de leitura e aquisição de dados comuns, cuidados extras devem ser levados em conta, principalmente no momento da atribuição de modelos, de desgaste e de dinâmica, para a usinagem com altíssima velocidade de corte. Alguns pesquisadores sugerem que prevaleça sob determinados momentos, uma condição quasi-hidrodinâmica e/ou hidrodinâmica para a espessura do filme lubrificante.

De qualquer modo, toda a literatura pesquisada para a medição de esforços de corte é voltada para a obtenção de dados através de métodos convencionais, ainda que cautelas específicas sejam adotadas. Ou seja, não há ainda sensores ou métodos específicos neste sentido, ao menos de uma maneira amplamente divulgada.

Paralelamente a medição de esforços, a análise da morfologia do cavaco em HSM tem consideráveis descobertas sobre o processo de usinagem, mas com métodos mais caros e elaborados. Alguns trabalhos foram realizados no sentido de descrever a variação da morfologia do cavaco durante a usinagem de ligas para a indústria aeroespacial, como o inconel e ligas de titânio: verificou-se a redução da espessura do cavaco com o aumento da velocidade de corte, além de uma acentuação no dentado da borda do cavaco.

Investigações através de métodos menos sofisticados, como observação direta, também contribuem sobremaneira. Análises sobre a largura do cavaco em furações com altíssima velocidade de corte ajudam na previsão de afiações especiais para brocas, que contribuem para redução da temperatura na peça, sob as mesmas condições de corte. Um modelo bastante difundido, sobre mecanismos de corte, apresenta a evolução da morfologia do cavaco em relação a variação da velocidade de corte. Considera obtenções de cavaco por cisalhamentos catastróficos e por fissuração, além de estabelecer regiões em que o corte proporcionaria encruamento ou o amolecimento térmico do cavaco.

Com relação aos custos econômicos envolvidos na HSM, envolvendo tempo, mão de obra, material e energia consumida, há diversas e extensas bases de dados sobre este tema, uma vez que os métodos para coleta e análise destas informações são os mesmos utilizados para estudos econômicos de usinagens convencionais. Alguns autores apontam que, ao se considerar diversos custos por volume no fresamento de diferentes aços, a aplicação da HSM comparada a usinagem convencional é profundamente influenciada pela escolha da tecnologia de corte correta, velocidades de corte, avanços e ferramentas otimizadas. Significando desta maneira que para cada material a ser usinado há um conjunto de operações específicas e relativamente pequeno, que depende de parâmetros tais como máquina, geometria da ferramenta e material. Mesmo que estes conjuntos sejam pequenos, há relatos de redução de tempos específicos para ferramenta e material acima de 50 % em comparação com máquinas de usinagem convencional. Caso se considere apenas processos de acabamento, a redução apontada aumenta para 80 a 90%.

Constatações curiosas podem vir a tona ao se examinarem os custos envolvidos em um processo com HSM: materiais de dureza mais elevada podem ser mais baratos de se usinar quando comparados com outros de dureza mais baixa, ferramentas de

custo dez vezes maior que uma convencional podem acarretar economias consideráveis ao se considerar custos globais.

Por fim, talvez o campo mais promissor para compreensão e análise do processo de usinagem com altíssima velocidade de corte seja o da medição da temperatura durante o corte: seja da peça, da ferramenta ou do cavaco, grandes esforços têm sido direcionados para a medição e para o desenvolvimento de métodos de medição da temperatura em diversos processos de usinagem com HSM. As justificativas para tal são várias: o processo de formação do cavaco é diretamente relacionado à temperatura na região do corte, muitos dos mecanismos de desgaste da ferramenta envolvem ou são atribuídos a temperatura, a seleção do tipo do material da ferramenta e sua geometria são influenciados pela temperatura que se espera obter durante o corte, a utilização ou não de fluidos refrigerantes para o corte são fortemente baseadas em níveis de temperatura que se atinge durante a HSM, entre outros.

Todavia, os métodos utilizados para tal não são corriqueiros, mesmo quando comparados aos métodos adotados para usinagens convencionais, já considerados complexos. Procedimentos convencionais de medição de temperatura para usinagem não apresentam uma resposta satisfatória ao se lidar com HSM, devido a magnitude das deformações ocorridas e as grandes variações de temperaturas no cavaco e na interface peça-ferramenta.

Indo mais além, outros autores utilizam métodos mistos para medir a temperatura durante a usinagem. Por exemplo, para tentar garantir que a leitura da temperatura máxima na interface ferramenta/cavaco fosse registrada, um fio termopar foi usinado junto da peça ensaiada, reduzindo as variações induzidas pela posição ao longo da superfície cortante.

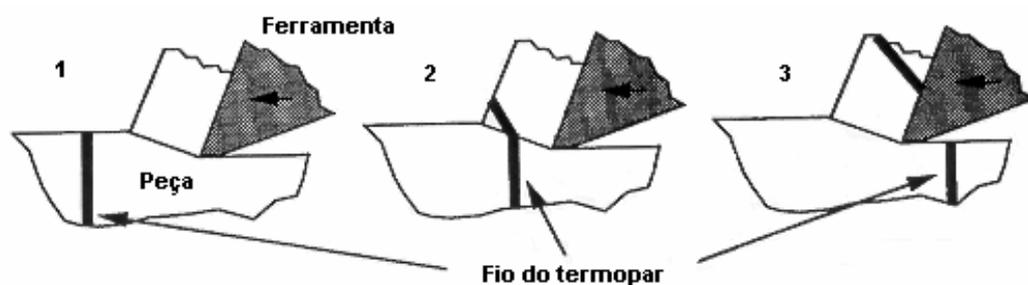


Figura 3: Sequência de usinagem quando se utiliza o termopar implantado na peça.

Além destas medições com termopares, existem medições obtidas através de leituras da radiação térmica emitida durante o processo de usinagem através de um termômetro infravermelho. Este método tem a vantagem de ser menos invasivo que o da técnica com termopares, porém não permite que fluidos refrigerantes sejam usados no ensaio, bem como muitas vezes a temperatura registrada é aquela da face superior do cavaco, que obscurece a interface peça/ferramenta, normalmente mais interessante.

6. Máquinas para HSM

Não há uma característica que defina um conjunto do que são as máquinas adaptadas para HSM. Muitos dos fabricantes de máquinas afirmam que seus produtos são adequados para tais operações simplesmente por permitirem velocidades um pouco acima das convencionais, e não raramente abusam do termo por seu apelo comercial e inovador. Entretanto, independentemente da definição que se adote para a HSM, é perceptível que não há máquinas de uso universal para tais aplicações: as características construtivas das máquinas para usinagem com altíssima velocidade de corte não permitem grandes variações dentro da faixa de rotações de seu fuso principal.

Desta maneira, as utilizações otimizadas para determinados tipos de aplicações destas máquinas são exclusivas: por exemplo, aplicações destinadas à usinagem de polímeros reforçados com fibras necessitam de máquinas que não permitem condições ótimas para aço ou alumínio, uma vez que seus parâmetros de corte são muito diferentes entre si.

Tais incompatibilidades são fruto principalmente das características construtivas do fuso principal, juntamente com seu sistema de mancais. Este exemplo é ilustrado através da Figura abaixo.

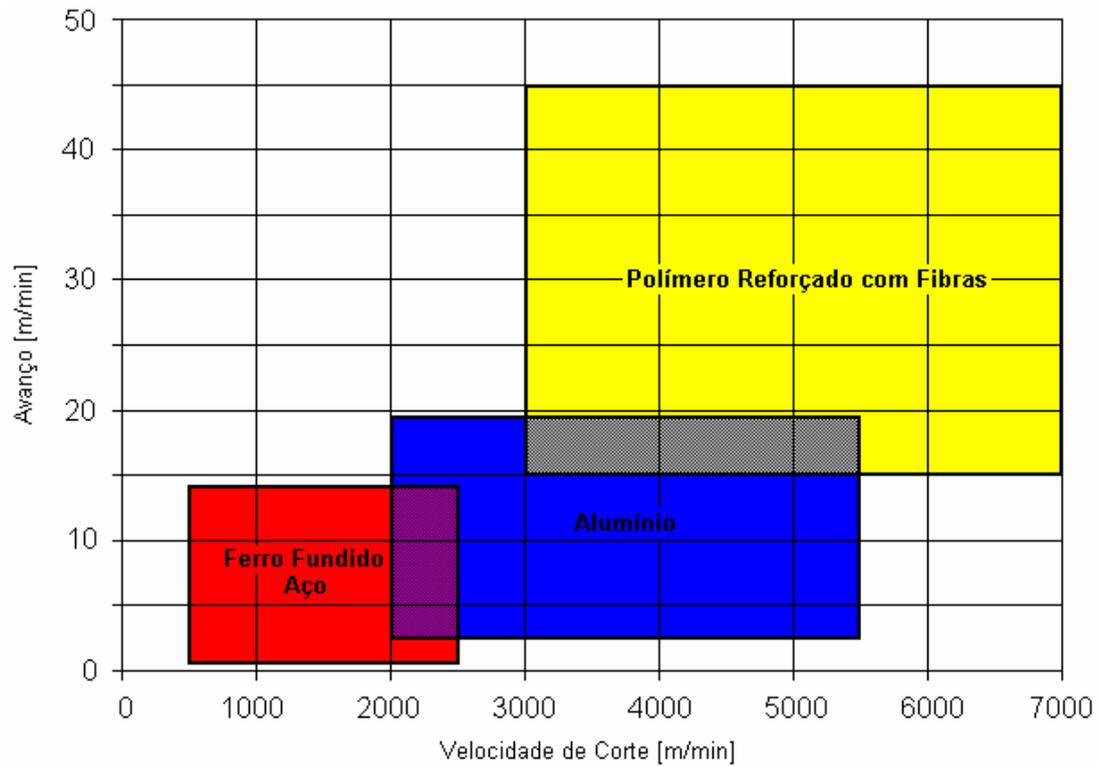


Figura 4: Conjuntos de aplicações otimizadas para usinagem com altíssima velocidade de corte

Analisando de maneira global a condição atual da disponibilidade e da utilização econômica de máquinas genéricas para processos de fabricação, é possível construir um diagrama com os conjuntos isolados dos tipos de sistemas de fabricação em relação a sua flexibilidade e produtividade, conforme apresentado a seguir.

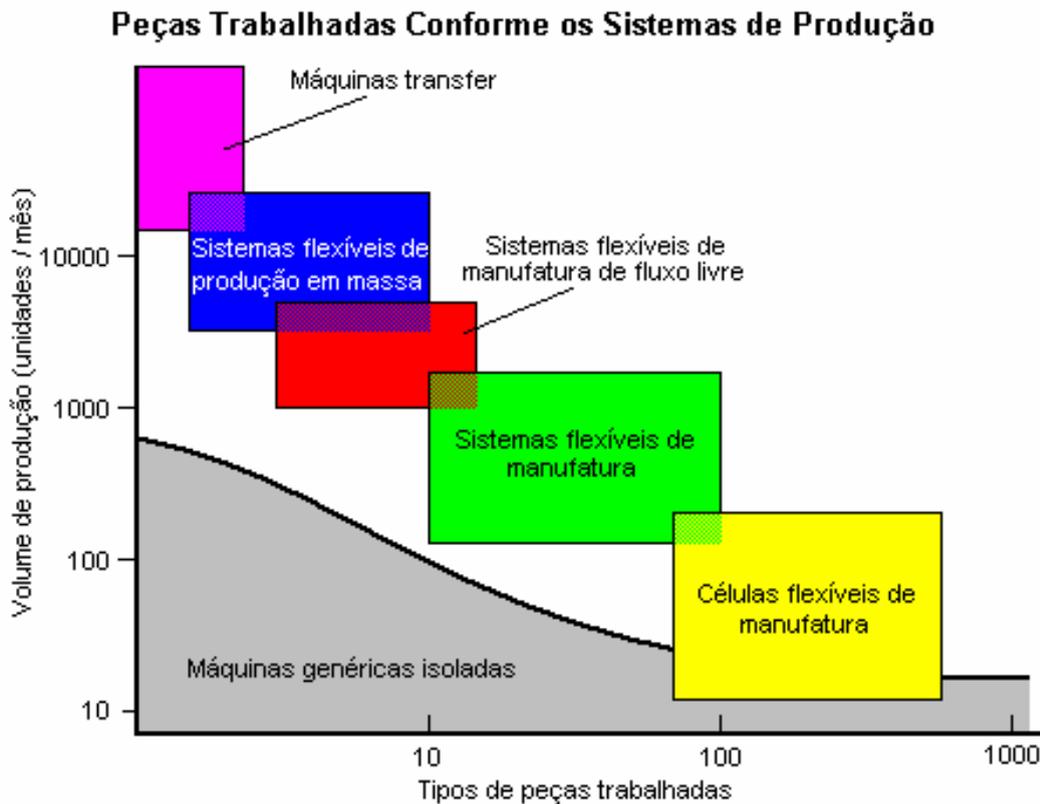


Figura 5: Diagrama de tipos de peças diferentes em relação a produtividade.

Desta maneira, uma vez que não existem máquinas para aplicações universais com HSM, a utilização e inserção de máquinas que permitam usinagens com altíssima velocidade de corte, conforme vão sendo definidas suas condições de utilização otimizadas, viriam somente a expandir as fronteiras destes conjuntos de sistemas de fabricação, se tanto. Não é possível, no momento atual do desenvolvimento tecnológico, de se criar um sistema de fabricação que fosse totalmente flexível (máximo de tipos diferentes de peças) ao mesmo tempo que seria maximamente produtivo (maior quantidade de peças produzidas por unidade de tempo).

7. Ferramentas para HSM

O conceito de ferramental para usinagem é extenso, independente do tipo de aplicação que seja estudada. Toda a gama de diferentes itens envolvidos na composição do ferramental (pastilhas, porta-ferramentas), assim como suas variantes (material, geometria) tornam este assunto vasto, e conseqüentemente sujeito a estudos e textos mais elaborados. Dentro deste escopo de ferramental, este capítulo pode ser compreendido em três grandes grupos. O primeiro será o projeto de ferramentas de

usinagem para altíssima velocidade de corte (contendo referências aos materiais envolvidos na composição e geometria de corte), seguido por projeto de porta-ferramentas. O terceiro grupo, por fim, conterà a revisão de alguns conceitos de desgaste de ferramentas e seus parâmetros de corte recomendados.

Em relação ao projeto de ferramentas, pode-se imediatamente afirmar que as ferramentas para aplicações em usinagem com altíssima velocidade de corte geralmente fogem do trivial aço rápido, por diversas razões. Pode-se citar ausência de rigidez e baixa dureza e estabilidade sob altas temperaturas como os principais motivos para tal. Restam então, todas as outras classes de materiais de ferramentas utilizadas para outras usinagens. Materiais como metal duro (com ou sem revestimento), cermet, cerâmicas, nitreto cúbico de boro e diamante encontram uso em diversas alternativas para este tipo de usinagem, com vantagens e desvantagens características e muito sutis, conforme a configuração de sua aplicação.

Quanto à geometria de corte de pastilhas de usinagem, as regras se tornam menos genéricas ao se variar o material trabalhado. Ângulos de corte de 12° a 15° podem ter um efeito otimizado ao se usinar alumínio, porém deve-se optar por ângulos maiores na usinagem com altíssima velocidade de corte para ligas de alumínio fundido. Outras geometrias devem ser aplicadas para aço e ferro fundido, com ângulos de corte mais reduzidos, próximos de zero. Polímeros reforçados com fibras demandam ferramentas com ângulos de corte acima de 20° . Os ângulos de folga para aço e ferro fundido devem ser os maiores possíveis, de modo a reduzir a área de contato com a superfície de folga da ferramenta, aumentando assim sua vida útil. Um valor ótimo está relacionado com a rotação e a taxa de avanço, para compor o ângulo efetivo de folga.

Para o projeto construtivo do porta-ferramenta, algumas diretrizes para construção considerando a sujeição à alta rotação são:

- utilização de materiais dúcteis;
- minimizar o efeito de entalhamento (dependente do espaço necessário para escoamento do cavaco);
- minimizar o efeito de entalhamento (dependente do projeto da aresta cortante);
- providenciar conexões para encaixe de formas;
- manter massas reduzidas para todos os componentes utilizados;
- dispor o centro de mais dentro de raios pequenos.

Quanto aos conceitos de desgaste de ferramentas e seus parâmetros de corte recomendados, esta é a parte disponível de literatura mais extensa de todas as pesquisadas. Embora de grande utilidade e perfeitamente aplicável para fins industriais, muitas das conclusões obtidas nos trabalhos revisados são de pouca valia ao se variar as condições de ensaio descritas, uma vez que a variabilidade dos ensaios de usinagem é grande. Não obstante, de uma maneira geral, pode-se dizer que para operações com aço e ferro fundido, o nitreto cúbico de boro foi o material de ferramenta de corte com menor desgaste. Contudo, não se deve de maneira alguma entender isso como uma regra geral para aplicações deste caso. Pode-se dizer que a única regra geral sobre o desgaste de ferramentas sob HSM é que as otimizações da vida útil das ferramentas ocorrem em intervalos estreitos, como pode ser observado no exemplo a seguir.

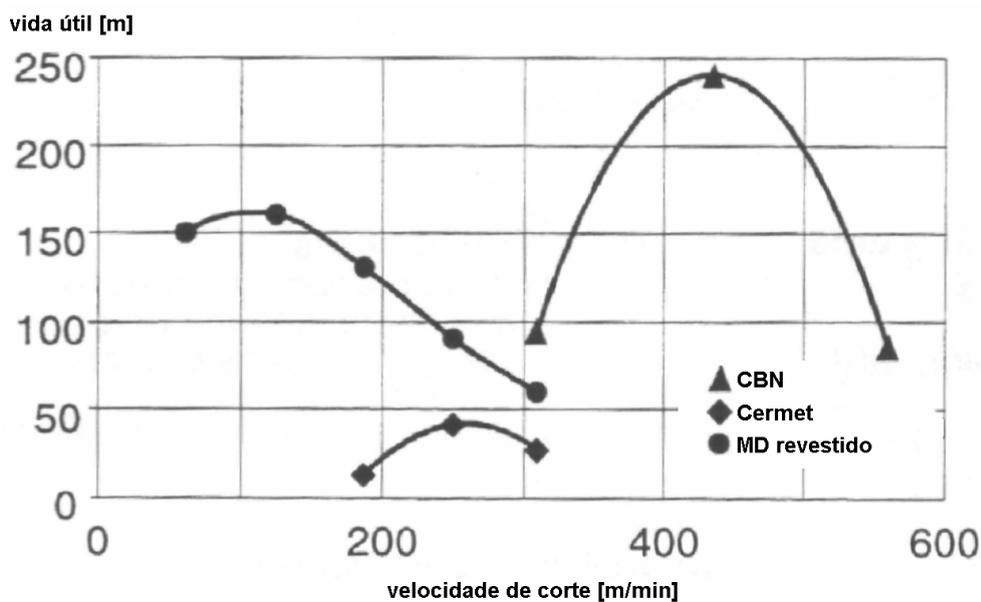


Figura 6: Exemplo de desempenho em relação ao desgaste de diferentes materiais

Este caso exposto compara ferramentas idênticas, com exceção do material, usinando um mesmo aço. Os parâmetros de avanço e critérios de desgaste também são os mesmos.

8. Referências Bibliográficas

CSELLE, T. , 1999, 10 Gebote der trockenen Hochgeschwindigkeits-bearbeitung, Praxis der Trockenbearbeitung - Düsseldorf, p.105 - 117.

DAGILOKE, I.F. et al., 1995, High-speed machining: an approach to process analysis, **Journal of Materials Processing Technology**, n. 54, p. 82 - 87.

DAMARITÜRK, H., 1990, Wirkmechanismen und Temperaturen beim Hochgeschwindigkeitsfräsen von Stahl, **Dissertation PTW TH Darmstadt**.

DEWES, R. C. & Aspinwall, D. K., 1997, A review of ultra high speed milling of hardened steels, **Journal of Materials Processing Technology** n. 69, p. 1 - 17.

DEWES, R.C. et al., 1999, Temperature measurement when high speed machining hardened mould/die steel, **Journal of Materials Processing Technology** vol. 92-93, p. 293 - 301.

FALLBÖHMER, P. et al., 2000, High-speed machining of cast iron and alloy steels for die and mold manufacturing, **Journal of Materials Processing Technology** n. 98, p. 104 - 115.

GÜHRING, J. et al., 1995, Bohren - trocken oder bei Hochgeschwindigkeit?, **Werkstatt und Betrieb**, n. 128, p. 538 - 542.

HAMANN, J. C. et al., 1994, Selective Transfer Built-up Layer Displacement in High-Speed Machining - Consequences on Tool Wear and Cutting Forces, **Annals of the CIRP**, Vol. 43/1, p. 69 - 72.

HEISEL, U. et al., 1999, Dynamic Influence on Workpiece Quality in High Speed Milling, **Annals of the CIRP**, Vol. 48/1, p. 321 - 324.

JAISSLE, H., 1996, HSC in hochproduktiven Anlagen, **Werkstatt und Betrieb**, 129, p. 476 - 482

KITAGAWA, T., et al., 1997, Temperature and wear of cutting tools in high-speed machining of Inconel 719 and Ti-6Al-6V-2Sn, **Wear** 202, p. 142 - 148.

KÖNIG, W. et al., 1987, Alternative Processes For Cost Reduction, **Annals of the CIRP**, Vol. 36/2, p. 443 - 444.

KÖNIG, W. et al., 1990, Machining Hard Materials with Geometrically Defined Cutting Edges - Field of Applications and Limitations, **Annals of the CIRP**, Vol. 39/1, p. 61 - 64.

KÜMMEL, D., 1990, Wirkmechanismen beim Hochgeschwindigkeitsfräsen von Gußeisen, **Dissertation PTW TH Darmstadt**.

MARUSICH, T. D. & Ortiz M., 1995, Finite element study of chip formation in high-speed machining, **Manufacturing Science and Engineering** 2, p. 245 - 258.

McGEE, F. J., 1979, High-speed machining study: methods for aluminium workpieces, **American Machinist** 123, p. 121 - 126.

POULACHON, G. & Moisan, A., 1998, Contribution to the study of the cutting mechanisms during high speed machining of hardened steel, **CIRP Annals of Manufacturing Technology** 47, p. 73 - 86.

SCHULZ, H., 1996, **Hochgeschwindigkeitsbearbeitung**, Carl Hanser Verlag München Wien.

SHAW, M., 1986, **Metal Cutting Principles**, Clarendon Press Oxford.

TÖNSHOFF, H. K. et al., 1999, Chip formation in high speed cutting (HSC), **Society of Manufacturing Engineers**, 253, p. 1 - 12.

TÖNSHOFF, H. K. et al., 2000, Cutting of Hardened Steel, **Annals of the CIRP**, Vol. 49/2, p. 547 - 566.

RELAÇÃO ENTRE OS PARÂMETROS DE CORTE E A RUGOSIDADE DA SUPERFÍCIE USINADA NUMA OPERAÇÃO DE FRESAMENTO DE TOPO ¹

Guilherme Cruz Rossi²

Alexandre de Albuquerque Kanenobu²

Gilmar Ferreira Batalha³

Resumo: *Atualmente, a concorrência existente entre os processos produtivos é muito elevada, sendo que as indústrias vêm procurando reduzir custos de fabricação em todas as atividades que desenvolve. Neste contexto também se enquadram os processos de manufatura mecânica, em especial os processos de usinagem. Este trabalho teve como objetivo encontrar as relações existentes entre alguns parâmetros de corte e a rugosidade média da superfície usinada, utilizando para isso o Método da Regressão Linear Múltipla. Os resultados encontrados podem ser utilizados para uma melhor seleção dos parâmetros de corte a serem utilizados em determinadas situações, para que se encontre a melhor relação custo-benefício de cada processo.*

Palavras-Chave: Fresamento de Topo; Otimização; Rugosidade; Parâmetros de Corte.

Abstract: *Nowadays, the competition between production processes is very big, so the industries have been looking for production costs reduction in all of the activities that they develop. One of these processes is the mechanical manufacturing process, specially the cut processes. This work has the objectives of finding the relations between some cut parameters and the machine-made surface average roughness, using the Multiple Linear Regression Method. The results can be used to better select the cut parameters to be used in some situations, so the best cost-benefit for each process can be found.*

Key-Words: End Milling; Optimization; Roughness; Cut Parameters.

¹ Contribuição para o I Workshop Novos Desenvolvimentos em Engenharia de Fabricação – 30/11/2004 - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo – Laboratório de Engenharia de Fabricação.

² – Mestrando - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo – Laboratório de Engenharia de Fabricação – Dept. Engenharia Mecatronica e de Sistemas Mecânicos.

³ – Professor , Escola Politécnica da Universidade de São Paulo – Laboratório de Engenharia de Fabricação. Dept. Engenharia Mecatronica e de Sistemas Mecânicos