

2.5 Máquinas para Altíssima Velocidade de Corte

Confirmando o que foi proposto nas Definições de Usinagem com Altíssima Velocidade de Corte, 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. Schulz (1992) ilustra este exemplo através da Figura 12.

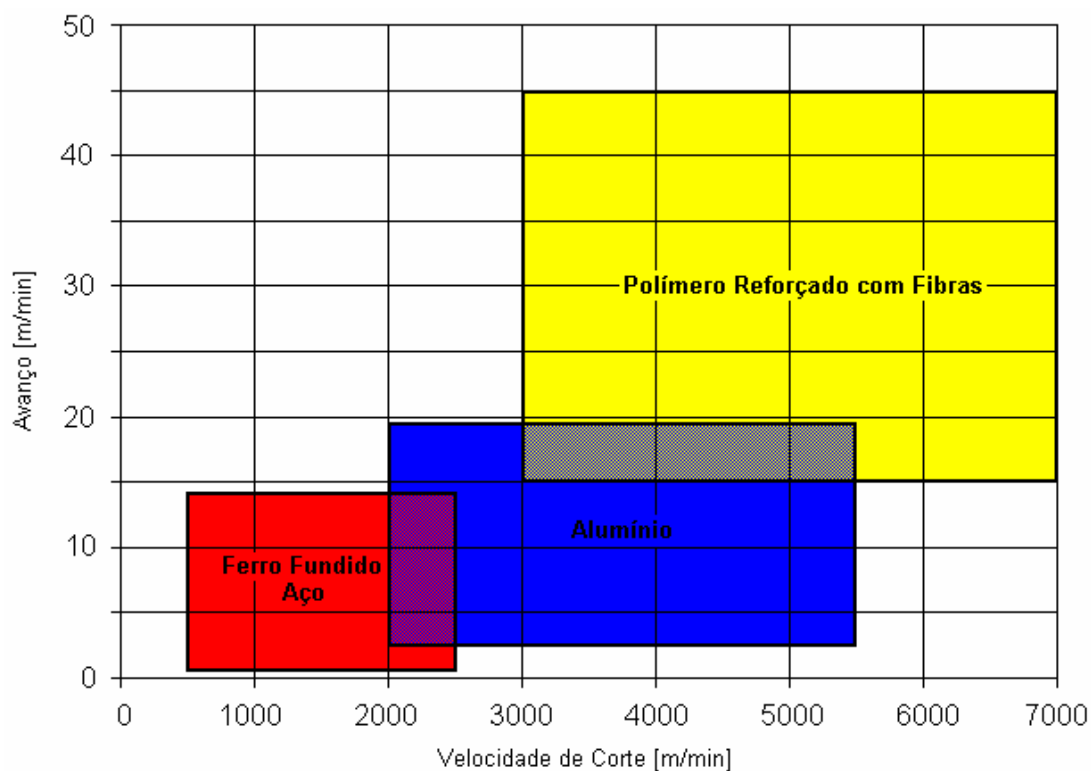


Figura 12: Conjuntos de aplicações otimizadas para usinagem com altíssima velocidade de corte (Schulz & Moriwaki, 1992).

Quanto a concepção da máquina em si, as opiniões divergem quando autores como Dewes & Aspinwall (1997) afirmam que máquinas de usinagem convencionais podem ser adaptadas para aplicações com HSM, sendo necessário somente a substituição de seu fuso principal, enquanto que outros autores, principalmente de universidades alemãs, afirmam que a legítima usinagem com altíssima velocidade de corte é necessariamente proveniente de uma máquina construída para tal, com características construtivas que vão além do fuso principal, e portanto não se encaixariam em condições de adaptação de máquinas convencionais.

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 na Figura 13.

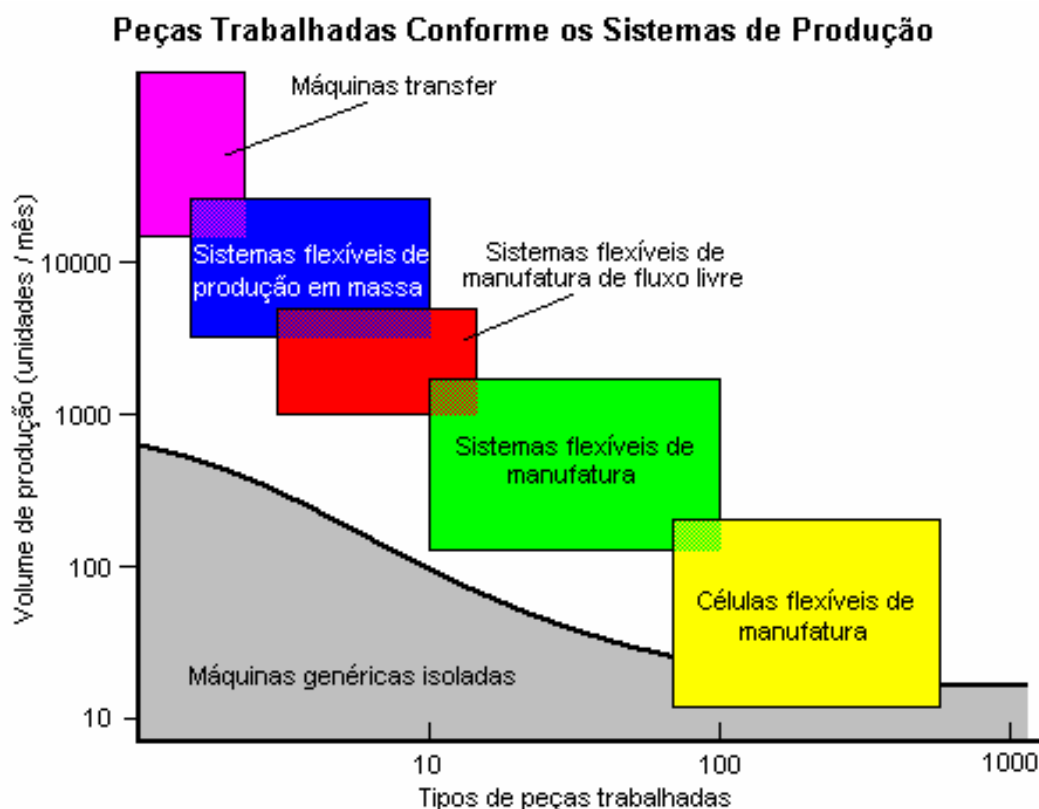


Figura 13: Diagrama de tipos de peças diferentes em relação a produtividade.

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).

No que se refere a construção das máquinas capacitadas a exercerem usinagens com altíssimas velocidades de corte, existe um certo consenso entre os autores e os poucos fabricantes de máquinas que conhecem esta tecnologia. Atenções especiais devem ser prestadas aos aspectos construtivos e dinâmicos do equipamento em questão.

Pode-se estipular 3 grandes grupos de pesquisa ou de especialidade construtiva dos elementos destas máquinas. São eles: fusos (principais e secundários), seleção de materiais para estruturas de máquinas e CNC.

Fusos: O projeto e construção de fusos para trabalho em HSM é certamente o mais oneroso e difícil de ser concebido. Suas características de operação necessitam condições únicas, que encarecem o maquinário e podem até reduzir sua flexibilização. Conforme Dewes & Aspinwall (1997), uma vez que a velocidade de rotação mínima de um fuso corresponde a 10% de sua rotação máxima, pode neste caso ocorrer uma limitação da parte do fuso principal ao se solicitar trabalhos em velocidades altas e baixas (mas ainda dentro da gama de HSM).

O fuso principal para uma máquina deste tipo, conforme diversos autores, é recomendado ter um motor integrado, entre os mancais. Desta forma é possível ter uma disposição mais curta e rígida, situando a massa rotativa em frequências críticas mais elevadas.

Além da vantagem econômica desta configuração (por eliminar pelo menos uma transmissão do motor para o fuso), há a desvantagem de se transmitir calor ao eixo do fuso, que aquece o anel interno dos rolamentos, decrescendo o limite de velocidade destes.

Quanto ao eixo, o ideal seria aquele que apresentasse um curto tempo para atingir a velocidade desejada e ao mesmo tempo com uma rigidez alta. Estas características podem ser contraditórias, por estarem ligadas a massa e ao material utilizado, porém novos materiais (como fibras de carbono e cerâmicas) podem auxiliar neste desenvolvimento.

Três diferentes tipos de rolamentos para estes fusos são recomendados: magnéticos, aerostático e de esferas de contato angular. Estes últimos constantemente de uma modalidade híbrida, com anéis de aço e esferas cerâmicas.

Atualmente estes rolamentos híbridos são mais populares. Contudo, diversos problemas são encontrados referentes a sua refrigeração durante altas rotações.

Weck & Tüllman (1999) sugerem três tipos de lubrificação para estes rolamentos híbridos: lubrificação contínua de graxa, mínima lubrificação de óleo (pulverização de óleo com ar comprimido) e lubrificação contínua de óleo. Todos têm vantagens e desvantagens, econômicas e construtivas. A lubrificação contínua de óleo e mínima lubrificação de óleo permitem rotações maiores nos mancais que a lubrificação contínua de graxa.

O motivo principal de se utilizar a esfera cerâmica é a baixa afinidade com o material que entra em contato nos anéis, o aço: o par aço-cerâmica garante um menor atrito em relação ao par aço-aço. As esferas de cerâmica ainda reduzem o peso dos mancais, quando comparadas às esferas de aço.

Por fim, em relação aos mancais dos fusos principais das máquinas para HSM, deve-se optar por esferas de tamanho reduzido, ainda no caso dos rolamentos híbridos. Não somente por redução do peso, mas também por redução da força centrífuga e do ângulo de pressão dos anéis de rolamento.

Quanto aos fusos secundários das máquinas para HSM, ou os fusos que garantem o movimento linear da mesa ou do cabeçote da máquina, outras atenções devem ser levadas em conta, porém não tão severas como as apresentadas para a construção do fuso principal.

Schmitt (in Apostila do Seminário..., 1996) defende que somente dois princípios de construção de sistemas de avanço são viáveis para máquinas de HSM: guias lineares com servos eletromecânicos e motores lineares.

As guias lineares com servos eletromecânicos, utilizadas na maioria dos casos atuais, consiste de um fuso de esferas com servo digital, guias anti-atrito (com revestimentos como TiAlN, WC, CrN e outros que apresentam bons resultados

tribológicos) e um sistema direto de medição de posicionamento. Estas guias permitem avanços de até aproximadamente 40m/min.

O máximo das acelerações atingíveis com estes sistemas é da ordem de 10m/s^2 . A precisão de posicionamento estático fica entre 5 e $15\mu\text{m}$.

Já o conceito de motores lineares para sistemas de avanço supera as limitações dos sistemas eletromecânicos descritos anteriormente. Simplesmente pela eliminação dos elementos de transmissão cinemática, atinge avanços da ordem de 100m/min, acelerações de até 30m/s^2 e níveis de precisão muito melhores.

Seleção de materiais para estruturas de máquinas: Esta etapa da elaboração do projeto de uma máquina para HSM parte de um princípio contraditório. Segundo o citado por Dewes & Aspinwall (1997), é necessário que as partes da máquina (principalmente as móveis) apresentem um valor de massa e de inércia baixos, ao mesmo tempo que consigam obter altos índices de rigidez e altas propriedades de absorção dinâmica.

Weck et al. (1995) sugerem que, dentro dos materiais de engenharia atualmente disponíveis, os mais indicados para esta tarefa seriam os polímeros reforçados com fibra, dada sua elevada rigidez e resistência, aliadas a baixa densidade e baixo coeficiente de dilatação térmica.

Outros materiais também encontram possibilidades de aplicação, tais como o Alumínio, Titânio e cerâmicas. Soluções econômicas muitas vezes devem ser aplicadas na determinação do uso de um material ao invés do outro, uma vez que o custo de produto acabado destes materiais pode ser muito elevado.

A figura 14 ilustra a disposição destes diferentes materiais conforme sua resistência a tração e módulo de elasticidade. Fica evidente a vantagem, sem se considerar o aspecto econômico, dos polímeros reforçados com fibra de carbono.

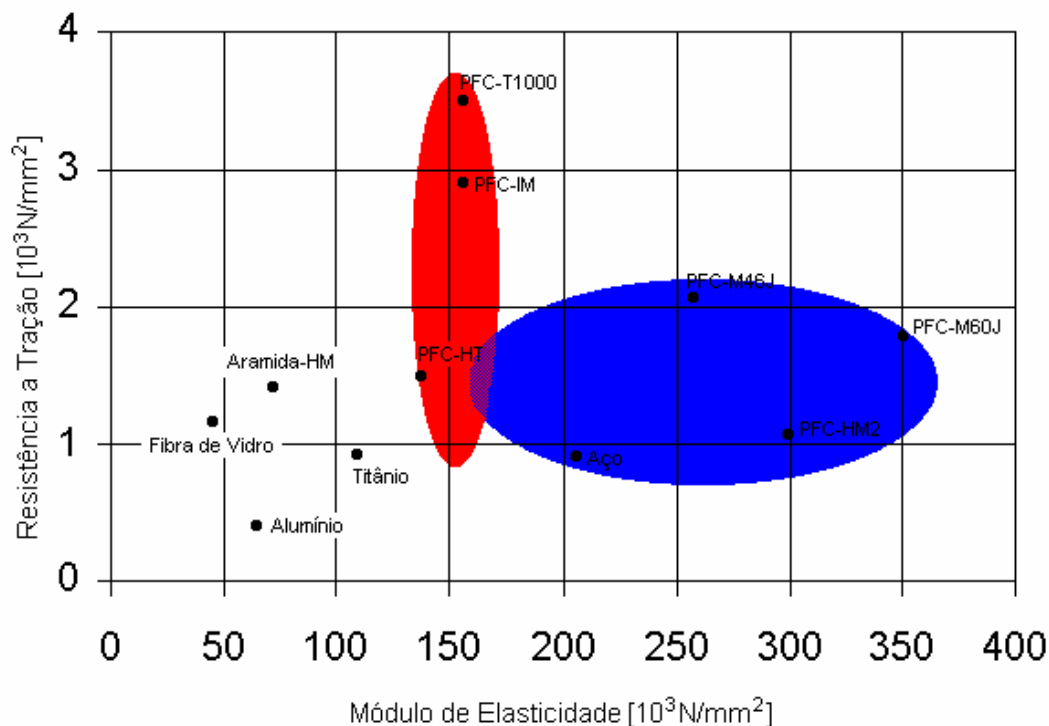


Figura 14: Diagrama de alguns materiais de engenharia (adaptado de Weck et al., 1995).

Em uma tentativa de se resumir as características desejadas em materiais de construção de engenharia, pode-se relacioná-las da seguinte forma condicionada, em uma tabela:

Tabela 2: Características construtivas dependentes do material (adaptado de Weck et al., 1995).

Características do material	Características construtivas
Alta rigidez e resistência específica	<ul style="list-style-type: none"> - Peso reduzido - Baixa força de desbalanceamento e força centrífuga - Momento de inércia reduzido - Altas acelerações de translação e rotação - Alta frequência natural
Mínima dilatação térmica no sentido das fibras	<ul style="list-style-type: none"> - Alta constante geométrica durante o funcionamento - Dilatação térmica adaptável
Alto amortecimento do material	<ul style="list-style-type: none"> - Bom comportamento vibratório (flexão, torção) - Baixas resposta e transmissões de ruído

Observando-se estes dois últimos diagramas, pode-se ressaltar que, ao se substituir o grupo de materiais de construção de metais (comum a construção de máquinas operatrizes em geral) para polímeros reforçados, assume-se todo um novo conceito construtivo de máquinas, tanto na construção das peças bem como a montagem das estruturas.

Além da oportunidade gerada pela utilização destes novos materiais na construção de máquinas para HSM, a modelagem por elementos finitos de estruturas e bases de máquinas também permite otimizações na rigidez, na massa e no comportamento sob variações térmicas destes elementos.

Weck et al. (1995), em uma tentativa de ilustrar esta mudança da utilização de materiais de engenharia para construção de máquinas para HSM, apresentam um exemplo comparativo de duas estruturas, uma convencional e outra com polímeros reforçados com fibra de carbono, para uma mesma máquina. A redução pode chegar a cerca de 50%.

Tabela 3: Exemplo comparativo dos aspectos construtivos (adaptado de Weck et al., 1995).

Característica	Versão com vigas de Aço e Alumínio	Versão com vigas de PFC	Relação (PFC / Aço e Alumínio)
Massa	1500 kg	700 kg	47 %
Viga transversal (X)	920 kg	375 kg	40 %
Carro (Y)	220 kg	100 kg	45 %
Viga de elevação (Z)	140 kg	65 kg	46 %
Eixo de rotação	120 kg	60 kg	50 %
Área de operação X x Y	2,8 x 1,5 m ²	3,5 x 1,8 m ²	125 %
Velocidade permissível	75 m/min	112 m/min	150 %
Aceleração permissível	3 m/s ²	10 m/s ²	300 %

Outra consideração relevante a ser feita, quanto ao aspecto construtivo destas máquinas, é a disposição de seus elementos em instalações de alta produtividade, tais

como estações para HSM em linhas transfer. Deve-se procurar reduzir o volume também dos dispositivos de fixação pelos mesmos motivos descritos para os outros elementos construtivos, buscando maior área livre para movimentação do cabeçote e escoamento do cavaco.

Ainda para instalações de alta produtividade (linhas transfer), prevalece a opção de se dispor vários fusos paralelos para operações simultâneas do que cabeçotes múltiplos (Jaissle, 1996).

CNC: A programação e seleção de sistemas computadorizados para máquinas de HSM é um assunto extremamente vasto. De modo a não estender desnecessariamente sobre o tema, algumas breves considerações serão citadas.

No fresamento de topo, principalmente, a exigência de sistemas numéricos capazes de execução de perfis complexos não é exclusiva da HSM. Entretanto a solicitação dos sistemas de CNC nestas condições são extremas, por diversas razões. Uma delas é devido aos altos avanços envolvidos, gerando uma demanda por processamentos internos mais rápidos.

Muitos dos sistemas CNC disponíveis são inaplicáveis para muitas usinagens com altíssima velocidade de corte, pois o tempo de processamento das sentenças de comando do programa é maior que o tempo estipulado dos pontos de caminho de usinagem.

Assim, diversos sistemas CNC adaptados para esta operação apresentam, além de maior espaço de memória para rotinas com mais pontos de caminho (processamento mais rápido), três outras soluções encontradas para tal obstáculo:

1. Utilização de linhas de programação mais curtas;
2. Utilização de interpolações com "spline";
3. A função "look-ahead", ou "olhar adiante".

Originalmente, a maioria dos sistemas de CAD/CAM utilizavam a spline do tipo B, por permitir uma maior facilidade de interface com o sistema CNC. Diferentes tipos de splines estão disponíveis para diversos tipos de requisitos tecnológicos:

- Spline tipo A: A spline de Akima conecta as transições de bloco tangente contínuas. O caminho descrito cruza os pontos de interpolação de maneira exata. Sua maior vantagem reside no fato desta spline não oscilar mesmo se os pontos interpolados estão em posição desfavorável.
- Spline tipo B: A spline de Bezier corre sobre tangentes contínuas e curvaturas contínuas. Desta forma, as posições de eixo programadas não são atingidas, porém aproximadas dentro de uma faixa de tolerância. Esta spline pode ser programada como quadrática ou cúbica.
- Spline tipo C: Combina a continuidade tangente com continuidade de curvaturas. Passa precisamente sobre os pontos programados, mas tende a oscilação se os pontos de interpolação estão em posição desfavorável.
- Programação polinomial com transferência de coeficientes de spline: Para a programação de caminhos complexos, os coeficientes de spline dos sistemas CAM podem ser executados diretamente no programa CNC em tempo real.
- NURBS (Splines tipo B Racionais Não-Uniformes): Esta é a solução utilizada para as aplicações mais exigentes em HSM. Trata-se de um interpolador universal capaz de qualquer interpolação, seja ela composta de pontos medidos, superfícies de forma livre ou qualquer curva matematicamente descritível. Sua interpolação não é limitada aos dados geométricos de qualquer número de eixos.

Com a utilização de splines na programação de CNCs, além de reduzir o volume de blocos de descrição de trajeto (reduzindo o volume de memória), é possível manejar as transições de blocos contínuos (tangentes ou de curvaturas) necessárias para a usinagem com altíssima velocidade.

Além disso, o "look-ahead" vem como uma alternativa para gerenciamento da aceleração e frenagem dos eixos em HSM. Sua função atinge velocidades de

usinagem otimizadas por permitir uma previsão de um número configurável de blocos de transição. Ou seja, o programa "lê" etapas seguintes de sua programação para caminho da usinagem, para que possa situar as variações de aceleração da maneira mais coerente possível, sem perda desnecessária de velocidade e com possibilidade de frenagens bruscas para cantos vivos.

Por fim, muitas usinagens de topo com fresa de ponta esférica necessitam de mais um eixo, para evitar que a velocidade no centro da fresa, que é nula, interfira no processo de usinagem. Assim, mais uma consideração ao CNC deve ser ressaltada, para que sempre a usinagem nestas condições seja efetuada com velocidades tangenciais compatíveis.

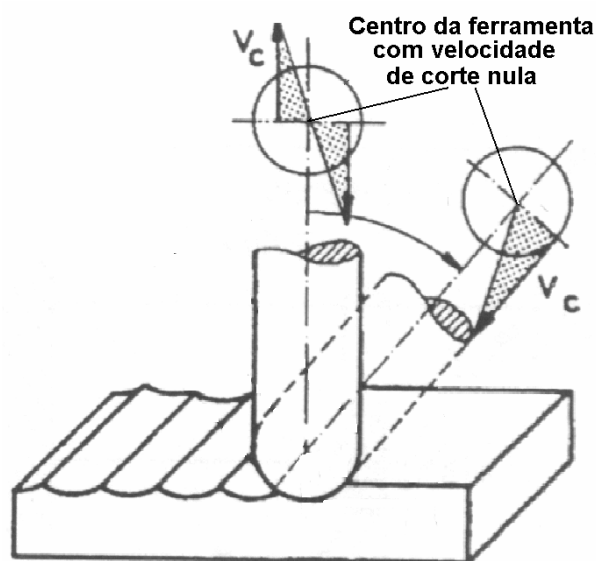


Figura 15: Utilização de um eixo para evitar interferência do centro da ferramenta.