

2.7 Ferramentas para Usinagem com Altíssima Velocidade de Corte

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 da revisão da literatura pesquisada pode ser compreendido em quatro 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 será destinado ao estudo do comportamento dinâmico do conjunto ferramenta e porta-ferramenta (compreendendo referências à rigidez deste conjunto e ao seu balanceamento). Por fim, o quarto grupo revisará 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.

Dewes & Aspinwall (1997) sugerem, para trabalhos com HSM para aços endurecidos, ferramentas de corte de metal duro revestidas com granulação menor

que $1\mu\text{m}$, por garantirem alta dureza e resistência ao desgaste e maior resistência a ruptura transversal que outros metais duros "convencionais". Segundo estes autores, bons revestimentos para este tipo de material são nitretos de titânio (TiN), de titânio e alumínio (TiAlN) e de titânio combinados com carbono (TiCN), aplicados sobre a matriz de carbetto de tungstênio (WC) por deposição química ou física de vapor.

Schulz & Moriwaki (1992) comentam ainda que, para ferramentas de corte de metal duro, revestimentos de carbetto de titânio (TiC) garantem uma maior resistência ao desgaste de aresta de corte, enquanto que revestimentos de nitreto de titânio (TiN) ajudam a reduzir o desgaste por crateras. Revestimentos cerâmicos, como Al_2O_3 , permitem maior estabilidade em temperaturas mais altas.

Inúmeros outros revestimentos podem ser adequados às ferramentas de metal duro para operações com HSM. Oliveira & Marcondes (1998) comentam que revestimentos com nitreto cúbico de boro apresentam bons resultados para operações de usinagem com altíssima velocidade de corte de aços endurecidos.

Cermets (ferramentas cuja matriz é composta por TiC, TiCN e ou TiN com uma fase ligante de níquel-cobalto) apresentam outras vantagens para aplicações em HSM. Podem ser ressaltadas a elevada dureza, mesmo sob altas temperaturas, assim como sua baixa suscetibilidade à formação de aresta postiça. Sua desvantagem em relação ao metal duro é a baixa resistência a fratura.

Ferramentas cerâmicas, que incluem aquelas compostas de alumina (mista ou não, com ou sem reforço de fibras) ou nitreto de silício, permitem vantagens semelhantes às citadas para cermets, além de geralmente apresentarem baixa solubilidade com os materiais usinados, outra boa característica. Também apresentam baixa resistência a fratura, bem como custo elevado dada a certas dificuldades de fabricação.

O nitreto cúbico de boro apresenta boas qualidades para usinagem com altíssima velocidade de corte, essencialmente por manter características desejáveis, como

elevada rigidez e dureza, mesmo em temperaturas de corte extremamente elevadas. Todavia seu alto custo muitas vezes torna proibitivo o uso em maior escala.

Usinagens com altíssima velocidade de corte com ferramentas de diamante são viáveis para materiais não-ferrosos. Excluem-se os materiais ferrosos por sua alta afinidade com o diamante, além daquelas operações em que atinjam temperaturas em que a reversão do diamante para o grafite ocorra (cerca de 750° C).

Para usinagens que não permitem a utilização de pastilhas de corte, como alargamento, também é aconselhável a utilização de ferramentas inteiriças de metal duro, com ou sem os revestimentos indicados. Os outros materiais (cermets, nitreto cúbico de boro, diamante) também encontram aplicação, seguindo orientações semelhantes às feitas para pastilhas de usinagem.

Ainda para ferramentas de furação ou de alargamento, uma maior atenção deve ser dada à geometria da ferramenta. Ferramentas como brocas e alargadores com uma afiação de ponta com ângulos mais agudos facilitam operações com HSM por ajudarem a reduzir a temperatura e o escoamento do cavaco. Afiações específicas para determinados casos, como chanfro na ponta de brocas e alargadores são bastante pesquisados e garantem vantagens em casos como de HSM a seco (Cselle, 1999; Vig, 1996).

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° (Schulz & Moriwaki, 1992).

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 (Deonísio et al., 2001).

Para o projeto construtivo do porta-ferramenta, Schulz & Moriwaki (1992) sugerem algumas diretrizes para construção considerando a sujeição à alta rotação:

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

Estas considerações propostas são fruto de experiência e de cálculos de elementos finitos, que demonstram a influência da força de fixação dos insertos e da região de saída do cavaco.

Há uma consideração relevante a ser feita neste sentido, conforme apontada por Hogan (1999), com relação a corpos de fresa feitos de alumínio. A ação destrutiva de cavacos de aço ou ferro fundido sob HSM pode ser extremamente importante, sendo necessário muitas vezes outros materiais para tal, como titânio.

Considerando-se porta-ferramentas padronizados, a operação com HSM exige, além de características comuns a usinagens produtivas, tais como rapidez de troca de ferramentas e preparo, também elevada precisão em repetibilidade e troca de ferramental, além de baixos erros de balanceamento, alta concentricidade, alta tolerância de batimento e alta precisão de posicionamento. Estas características ficam em evidência uma vez que, sob elevados efeitos centrífugos causados pela alta

rotação, há uma expansão desigual na interface do fuso e do porta-ferramenta, como pode ser observado na figura abaixo:

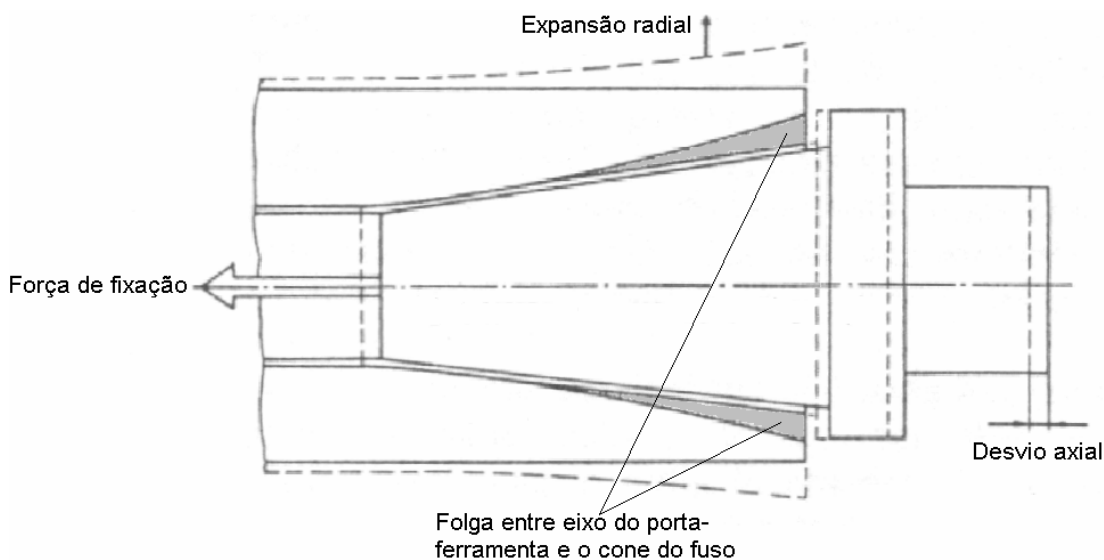


Figura 22: Deformações no acoplamento causadas por forças centrífugas.

Como dessa forma ocorre uma redução da força de fixação por redução das superfícies de contato, ocorre também uma redução do torque transmitido à ferramenta, bem como a centralização desta ficar comprometida.

Sugerem-se então configurações de porta-ferramentas que distanciam-se dos cones convencionais, conforme as solicitações de esforços na rotação são mais exigentes. Um exemplo muito utilizado atualmente é o modelo alemão HSK, que permite operações em rotações superiores, por utilizar conexões de fixação hidráulica, e tende-se a tornar um modelo padronizado para grande parte das operações com HSM.

A interface de fixação do HSK é feita de dentro para fora, comprimindo o cone da ferramenta ao cone do fuso, utilizando então a força centrífuga ao seu favor. Existem diversas faixas de operação e diferentes variantes do modelo, conforme sua aplicação.

Além desta interface entre o fuso da máquina e o porta-ferramenta, há também o problema da interface porta-ferramenta e ferramenta de corte: as altas rotações exigem níveis de concentricidade mais elevados, e portanto também muitas vezes incompatíveis com os sistemas de pinças convencionais, para ferramentas cilíndricas. Atualmente existem dois sistemas utilizados: baseados em fixação mecânico-hidráulica e por contração térmica.

Os sistemas de fixação mecânico-hidráulica funcionam através de uma bucha de dilatação cilíndrica, em forma de camisa. Com uma bomba hidráulica externa, a bucha externa do mandril é deslocada para cima, sobre a superfície cônica, quando a ferramenta é fixada e para baixo quando ela é liberada. Trata-se de um sistema auto-travante, permitindo que a pressão hidráulica seja liberada após a fixação da ferramenta.

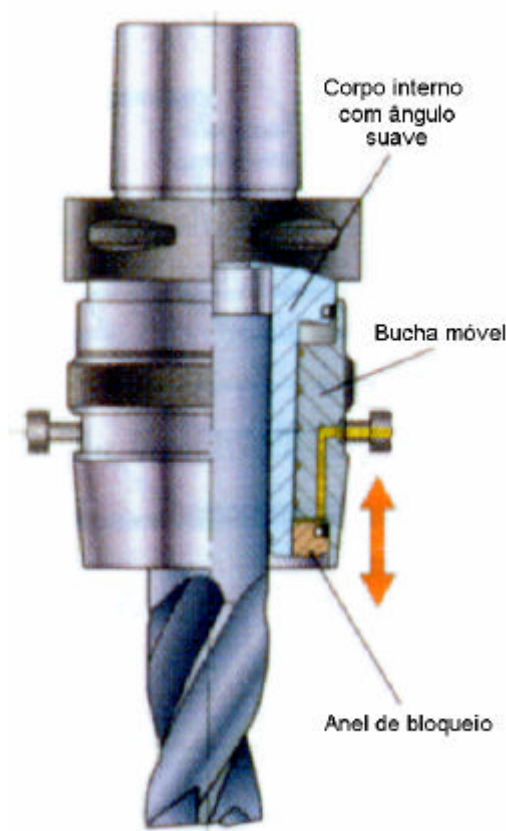


Figura 23: Corte esquemático do sistema de acionamento de um mandril do tipo mecânico-hidráulico.

Este sistema tem a vantagem de ser razoavelmente prático, podendo ser utilizado para praticamente qualquer diâmetro de ferramenta de corte cilíndrica. Tem a desvantagem de exigir um balanceamento posterior a montagem, dada sua assimetria dos canais para circulação de óleo.

Já os sistemas de contração térmica são de construção mais simplificada, e garantem rigidez muito maior que os porta-ferramentas de princípio mecânico-hidráulico. Resumidamente podem ser considerados como uma única peça construída com uma furação para alojamento da ferramenta executada com medida menor. Aquece-se o mandril para dilatação do furo e para possibilitar o encaixe da ferramenta cilíndrica.

Após resfriado, o conjunto apresenta concentricidade menor que $3\mu\text{m}$ e também menores problemas de balanceamento, por se tratar de uma estrutura simétrica. Têm as desvantagens de baixa praticidade (é necessário um equipamento específico para aquecimento por indução ou por ar quente) e de só ser viável para ferramentas cilíndricas acima de um certo diâmetro (Fiedler & Würz, 2001; Kelch, 2000).

Levando-se em conta a interface porta-ferramenta com pastilhas de corte, a possibilidade do cisalhamento do sistema de fixação da pastilha deve ser revista, já que a ferramenta fica submetida a elevadas rotações e não raro ocorrem acidentes graves devido ao desprendimento da ferramenta.

Schulz & Becker (1996) e Schulz et al. (1995) propõem padronizações para utilização de discos de fresas, conforme seu diâmetro, aplicação e velocidade de trabalho. Comprovam que a qualificação de trabalho específica para os discos de fresas e todos os seus componentes é um fator de extrema relevância ao se tratar de operações com HSM.

Ao se estudar o comportamento dinâmico do conjunto ferramenta e porta-ferramenta, muitos autores e usuários em relação a usinagem com altíssima velocidade de corte se baseiam em condições não razoáveis para um balanceamento.

Por exemplo, ao se solicitar um grau de balanceamento G1 para uma ferramenta submetida a uma rotação de 10000 min^{-1} , isto significaria que apenas $1 \text{ }\mu\text{m}$ é permitido entre o centro do eixo de rotação e o centro do eixo do conjunto da ferramenta. Ou, conforme o caso, o desbalanceamento causado pela etiqueta fixada na ferramenta após seu balanceamento.

Assim, o balanceamento em operações com HSM é de suma importância, todavia não se pode deixar levar por condições impraticáveis. Schulz & Würz (1997) defendem que a norma técnica de balanceamento ISO 1940 se tornou insuficiente para garantir a estabilidade necessária para processos que utilizem HSM.

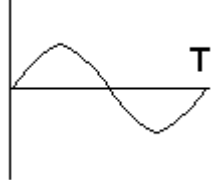
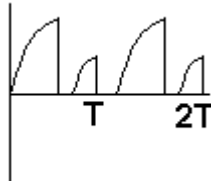
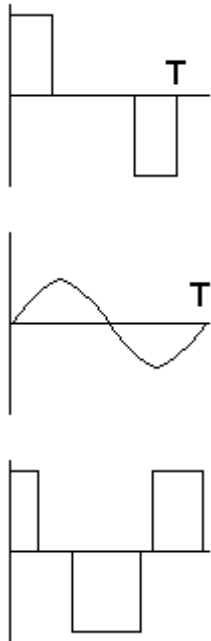
Para tal, sugerem que outros critérios sejam levados em conta. Por exemplo, citam que a dependência entre desbalanceamento do conjunto da ferramenta e a qualidade superficial não são necessariamente corretos, assim como a dependência entre desbalanceamento e desgaste nem sempre é verificada.

Sugerem, baseados que as condições de desbalanceamento provenham mais do fuso da máquina que do conjunto montado da ferramenta com o porta-ferramenta, a seguinte expressão para obtenção da excentricidade residual permissível:

$$e \leq K_1 \cdot \frac{1 - \left(\frac{\Omega}{w}\right)^2}{\left(\frac{\Omega}{w}\right)^2} \cdot \frac{m^*}{m} \cdot \frac{V_{MAX}}{f} \quad (5)$$

Heisel & Feinauer (1999) buscaram outros tipos de compreensão para o problema do balanceamento de ferramentas em usinagens com altíssima velocidade de corte. Realizando experimentos com modelos numéricos de respostas de frequências, utilizaram as seguintes condições para excitação durante a usinagem (é interessante notar a relevância dada não somente a vibrações causadas por desbalanceamentos, mas também por contato dos dentes da ferramenta e tipos de aceleração aplicadas às partes móveis):

Tabela 4: Modelos de excitação para vibrações em usinagem com altíssima velocidade de corte
(adaptado de Heisel & Feinauer, 1999).

Causa da vibração	Amplitude e frequência da vibração	Considerações
Desbalanceamentos <ul style="list-style-type: none"> • Excentricidades de massa • Tolerâncias de montagem 		<ul style="list-style-type: none"> • Tipo senoidal • Conformidade com a rotação
Contato do dente da ferramenta <ul style="list-style-type: none"> • Força de corte • Sobreposição do dente sobre o ângulo de hélice da ferramenta 		<ul style="list-style-type: none"> • Elevada parcela estática • Excitação dominante correspondente à frequência de rotação
Tipos de aceleração <ul style="list-style-type: none"> • Aceleração de avanço direto • Aceleração em trajetórias curvas • Movimentos de posicionamento 		<ul style="list-style-type: none"> • Excitação harmônica no caso de fresamento de topo (efeito de pêndulo) • Fases de aceleração são consideradas separadamente • Quase estática • Excitação com banda larga

Fiedler & Würz (2001) sugerem, por fim, para questões dinâmicas do ferramental em HSM, sistemas para balanceamento em processo. Tratam-se de caros e complexos sistemas de compensação de desbalanceamento por torção eletromagnética de dois discos com massas de compensação.

Pouco estudados e não aplicáveis para todas as condições de usinagem desejadas, estes sistemas automáticos de balanceamento em geral lidam com apenas uma magnitude da vibração na ferramenta, podendo aumentar as cargas sobre os mancais posteriores do fuso principal da máquina.

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 da Figura 24.

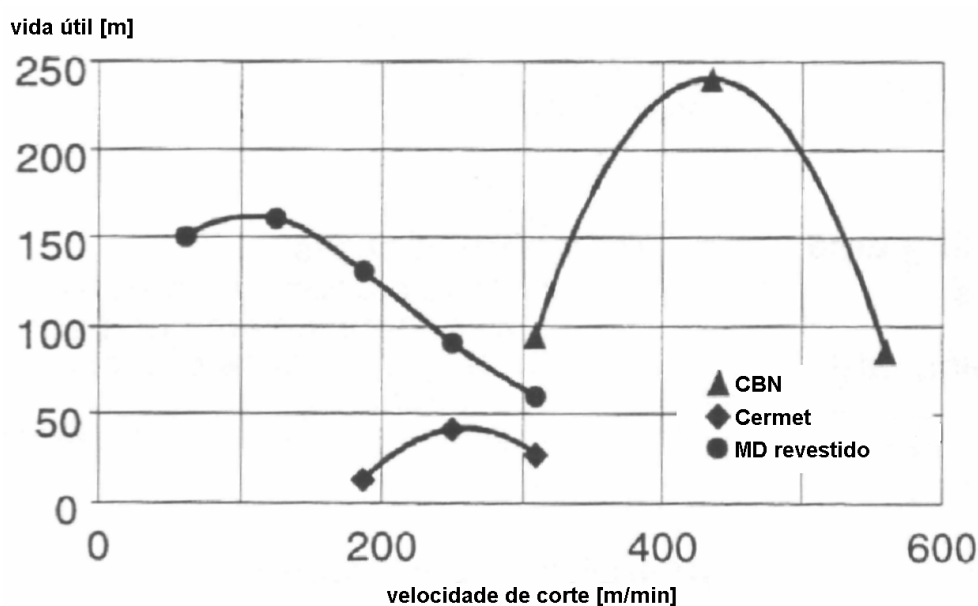


Figura 24: Exemplo de desempenho em relação ao desgaste de diferentes materiais (adaptado da Apostila do 2º Seminário..., 1997).

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.

Os tipos de desgaste mais comuns que podem ocorrer durante a usinagem com altíssima velocidade de corte são os seguintes:

1. Desgaste abrasivo - ocorre quando a peça usinada contém constituintes que são significativamente mais duros que o material da ferramenta de corte;
2. Desgaste por difusão - quando a temperatura de interface entre peça e ferramenta é elevada o bastante, ocorre a difusão de material, tanto da ferramenta para os cavacos como da peça para a ferramenta;
3. Desgaste por adesão - comum em baixas velocidades de escoamento do cavaco, ocorrer a formação de uma aresta postiça por adesão em baixas temperaturas e elevadas pressões, que quando é removida arranca a aresta da ferramenta;
4. Desgaste por deslizamento - ocorre em áreas onde há um contato intermitente entre a ferramenta e a peça, permitindo que ocorra oxidação e entalhes nocivos;
5. Fadigas térmica e mecânica - cortes intermitentes na aresta cortante que sujeitem a ferramenta a ciclos térmicos e de tensão podem iniciar e propagar trincas, que eventualmente quebram a ferramenta;
6. Fraturas grosseiras - quando a ferramenta apresenta rigidez insuficiente para as condições de corte podem ocorrer quebras na aresta cortante, assim como o lascamento da ferramenta.

Alguns trabalhos merecem ressalvas por sua característica ímpar. Silva et al. (1998), por exemplo, modelam o desgaste por difusão de ferramentas cerâmicas compostas por nitreto de silício (Si_3N_4) usinando com altíssima velocidade de corte aços ferramenta, aços carbono e ferro fundido cinzento.

Ao ser submetido a altas velocidades, a cerâmica estudada apresentou um crescimento quase exponencial das taxas de desgaste por difusão, ao usinar aços. Esta interdifusão, somada aos efeitos da solubilidade do material da ferramenta e à formação de novas fases químicas conduzem finalmente a um severo desgaste por crateração, além de enfraquecer a estrutura do material até descolar a superfície da ferramenta.

Curiosamente, para torneamentos em duro de ferro fundido este mesmo material apresenta um desempenho excelente. Uma possível justificativa dada pelos autores seria a necessidade de processo de formação de cavaco contínuo (como a de aços) que regeriam este modo de desgaste por difusão de maneira dominante.

Relativamente a usinagem de outros materiais, como ligas de titânio, Vigneau (1997) propõe que, sob um ponto de vista de viabilidade econômica e não somente de desgaste de ferramenta de corte, o material indicado são as cerâmicas reforçadas com fibras. Todavia, esta vantagem de custo só transparece em operações com grande volume de material a ser removido, e durante o fresamento: para o torneamento deste tipo de ligas recomenda-se ferramentas de metal duro, devido a alta reatividade química do titânio com cerâmicas. O nitreto cúbico de boro demonstrou elevada eficiência, porém seu preço na época não o tornava vantajoso para estas operações.

Ao se pesquisar o efeito de desgaste de ferramentas nas velocidades de corte situadas na transição da usinagem convencional para a HSM, Silva & Novaski (2001) concluíram que ferramentas de metal duro e cermets, ao fresarem aços para moldes, sofrem pesadas conseqüências de desgaste devido à adesão. Reportam ainda que, não raro ocorrem lascamentos generalizados, independente do tipo de material de pastilha utilizado.

Em relação a fresamentos a seco com altíssima velocidade de corte, em 2001 Braghini Jr. et al. realizaram experimentos envolvendo peças de ferro fundido cinzento. Concluíram que pastilhas de nitreto cúbico de boro policristalino são a

melhor opção nestes casos, quando comparadas a outras de cerâmica, cerâmica reforçada com fibras e metal duro com revestimento de nitreto de titânio, levando-se em conta o desgaste na aresta e a qualidade superficial obtida.

Também para usinagens com altíssima velocidade de corte para ferro fundido, mas em torneamento, em 2001 Coelho et al. reportaram que ferramentas cerâmicas mistas (Al_2O_3 -TiC) apresentam um menor desgaste que ferramentas de metal duro revestidas, além dos mecanismos de desgaste predominantes serem por abrasão e delaminação por interação química (difusão).

Schulz & Shu (1996) registraram a análise da usinagem de cerâmicas a base de óxido de alumínio com fresas de diamante policristalino sob altíssimas velocidades de corte e concluíram que, devido aos altos níveis de desgaste registrados, esta operação não é viável para cerâmicas sinterizadas, mas somente para cerâmicas incompletas, ou seja, antes do estágio final de sinterização.

Finalmente, Gühring & Cselle (1995), analisando a vida útil de brocas em operações com HSM, propõem que a melhor eficiência, para furações em peças de aço, ferro fundido e alumínio, é obtida com brocas inteiriças de metal duro com revestimento cerâmico. Esta eficiência pode ser ainda melhorada quando modifica-se a geometria da ponta da broca para ângulos mais agudos.