

2.3 Processos de Usinagem com Altíssima Velocidade de Corte

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 (McGee, 1979; Kitagawa et al., 1997). 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 áreas de aplicação deste processo de fabricação com HSM são:

Peças e componentes de pequeno lote produtivo: essencialmente característica da indústria aeroespacial, diversos produtos são obtidos por fresamento de topo diretamente aplicado a peça bruta (fundida ou forjada), geralmente em uma única fixação (McGee, 1979; Kitagawa et al., 1997). Torna-se interessante esta alternativa devido ao alto custo final destes produtos acabados, além de sua pequena quantidade. Semelhantes características também tornam interessante esta aplicação para fabricação de protótipos na indústria elétrica, eletrônica e médica.

Moldes para fundição: uma vez que a maioria dos moldes para fundição é fabricada em aços-ferramenta de difícil usinagem e possuem tamanho médio ou pequeno, é cada vez maior a aplicação deste conceito de fabricação com HSM. Além do alto custo de peça acabada característico destes moldes, outras vantagens permitem sua viabilidade, tais como redução ou unificação de set-ups, maior precisão geométrica (que consequentemente reduz o trabalho manual e tempos de try-out) e aumento da eficiência de ferramentarias (através de sistemas CAD/CAPP/CAM).

Matrizes para forjamento: a fabricação destes produtos tem características que justificam a utilização de fresamento de topo com HSM. São peças com pouca

profundidade (consequentemente, não exigem ferramentas longas, reduzindo a deflexão, de acordo com Schock et al. (1996)) e elevada dureza (exigindo maior esforço de corte e máquinas mais robustas, caso se optasse por uma usinagem convencional, ou ainda a eletro-erosão).

Moldes de injeção e moldes de sopro: como são destinados, em sua maior parte, para a fabricação de artigos de consumo e de larga escala de produção (por exemplo, telefones celulares, solas de tênis, garrafas de plástico e brinquedos), muitas vezes são de tamanho reduzido e exigem reconfigurações rápidas de seu projeto, além de uma rápida renovação de estilos e desenhos, o fresamento de topo com altíssima velocidade de corte é largamente utilizado em sua confecção. Constantemente estes moldes necessitam de usinagens para cavidades profundas, mas atualmente já existem soluções neste sentido, seja através da seleção de parâmetros de corte ou de ferramentas mais longas e leves (Zehe, 1996).

Eletrodos em grafite e cobre para a eletro-erosão: há excelente emprego para este tipo de peças, entretanto sua utilização é cada vez mais reduzida, pois o processo de eletro-erosão tende, atualmente, a ser substituído pelo fresamento de topo com HSM. A utilização de eletro-erosão era principalmente vantajosa em materiais tratados termicamente (portanto com dureza mais elevada), mas com as ferramentas hoje em dia disponíveis para fresamento com HSM, esta vantagem não chega a ser expressiva.

Aplicações para usinagem de paredes finas: diversos trabalhos relatam a validade deste processo para a construção de paredes finas em diversos materiais (Sandvik, 1999; Dewes & Aspinwall, 1997; Zehe, 1996). Uma vez que os esforços para a remoção do material são reduzidos com a HSM, paredes de até 0,2mm são obtidas com fresamento de topo utilizando esta técnica (Sandvik, 1999). Diversas aplicações podem ser contempladas com esta característica, como aletas (Zehe, K., 1996), palhetas para turbinas (Tlusty, J., 1993) e estruturas para aeronaves.

Aplicações com necessidade de redução de rebarbas laterais após a usinagem: a partir do modelo de formação de rebarbas após a usinagem apresentado por Nakayama et al. (1987), a usinagem com altíssima velocidade de corte comprova-se como sendo viável na eliminação ou redução de rebarbas em diversos materiais. Isso porque o processo de fabricação com HSM (não somente o de fresamento de topo) apresenta alta velocidade de corte e constantemente utilização de ferramentas com ângulo de ataque (cunha) elevado, duas das características sugeridas para redução da tensão de cisalhamento a que o cavaco é submetido durante sua formação, e que é diretamente responsável pela altura da rebarba lateral após o corte.

Nakayama et al. (1987), ainda cita que rebarbas formadas por fluxos de material em outros sentidos que não o lateral (são elas, rebarbas dianteiras, traseiras e inclinadas, respectivamente *forward*, *backward* e *leaned*) também podem ser minimizadas por estas características que a HSM apresenta, porém são muito mais dependentes do material da peça usinada. A Figura 5 ilustra os tipos de rebarbas estudados por estes autores.

Dois sistemas para classificação de rebarbas de usinagem	
	Símbolo
(1) Referência direta à aresta cortante	
Aresta de corte principal	M
Aresta de corte secundária ou canto	C
(2) Modo e direção de formação	
Fluxo traseiro (Rebarba traseira ou de entrada)	B
Fluxo lateral (Rebarba lateral)	S
Fluxo dianteiro (Rebarba dianteira ou de saída)	F
Direção inclinada ao avanço (Rebarba inclinada)	L

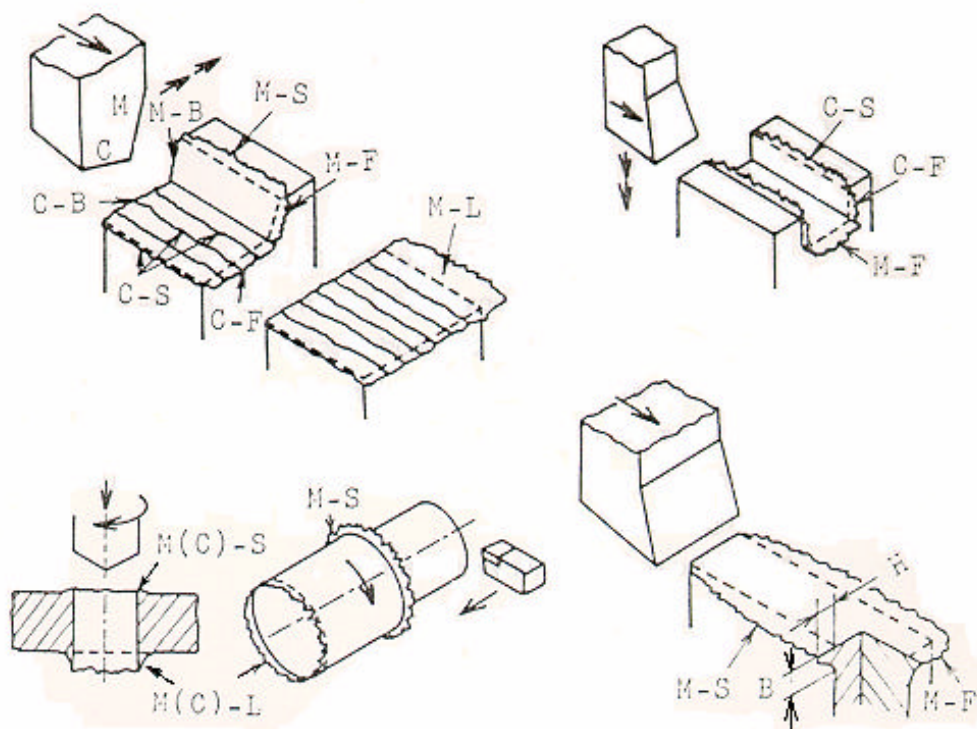


Figura 5: Classificação do tipo de rebarbas causadas por usinagem (Nakayama et al., 1987).

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 (Apostila do Seminário..., 1996; Apostila do 2º Seminário..., 1997).

O torneamento com altíssima velocidade de corte é, em sua maioria, destinado a componentes de ligas leves e ligas de titânio. É interessante notar que as primeiras aplicações de usinagem com altíssima velocidade de corte foram sob a forma de torneamento vertical, conforme notado em McGee, (1979). 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.

Semelhante ao torneamento em duro, que possibilita atingir rugosidades equivalentes a da retificação cilíndrica, Koch apresenta, conforme citado em

Tönshoff et al. (2000), um comparativo entre os processos de usinagem através de retificação cilíndrica e torneamento em duro, conforme apresentado na Tabela 1.

Tabela 1: Comparação entre os processos de usinagem de retificação cilíndrica com torneamento em duro (Koch, citado em Tönshoff, 2000).

		Torneamento em Duro	Retificação Cilíndrica
Aspectos econômicos	Tempo de processamento	😊/😞*	😊/😞*
	Taxa de remoção	😊	😞
	Custo de aquisição	😞/😊**	😞/😞**
	Custo do ferramental	😞	😊
Flexibilidade	Usinagem multi-face	😊	😞
	Usinagem de perfis	😊	😞/😊
Aspectos ecológicos	Exigência de energia	😊	😞
	Líquido refrigerante	😊	😞
	Reciclagem de cavaco	😊	😞
Qualidade	Qualidade da peça acabada	?	😊
	Confiabilidade do processo	?	😊
	Integridade da superfície	?	😊

Legenda:

😊 : Avaliação positiva

😞 : Avaliação neutra

😞 : Avaliação negativa

? : Avaliação não possível

Comentários:

* Dependendo da aplicação, uma relação de 1:10 até 10:1 é possível

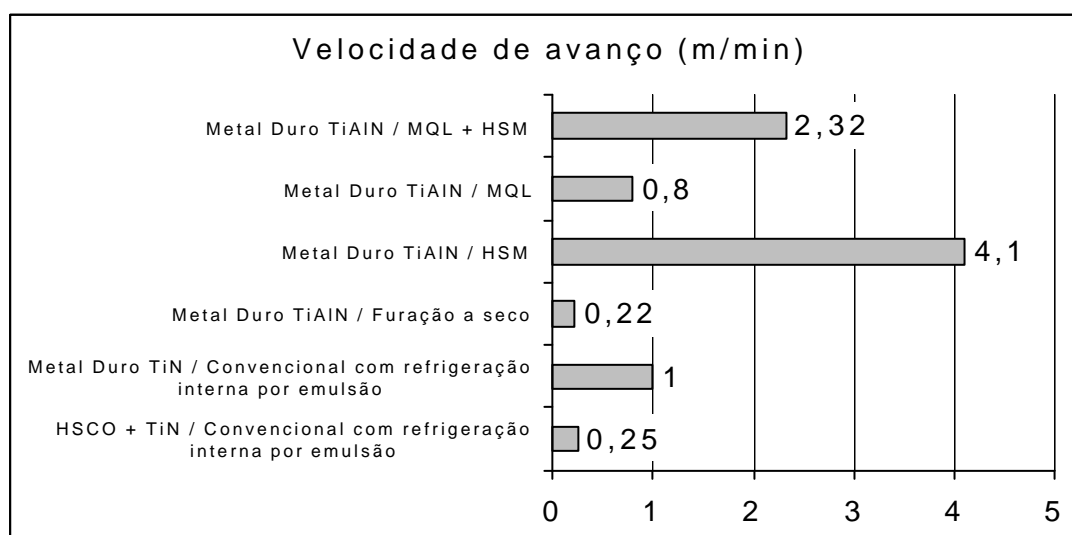
** Máquinas especiais ou centros de retificação são frequentemente necessários

Através deste comparativo, todo torneamento com HSM pode ser analisado, a princípio, como uma variação do torneamento em duro, no que se refere as vantagens e desvantagens em relação a retificação cilíndrica.

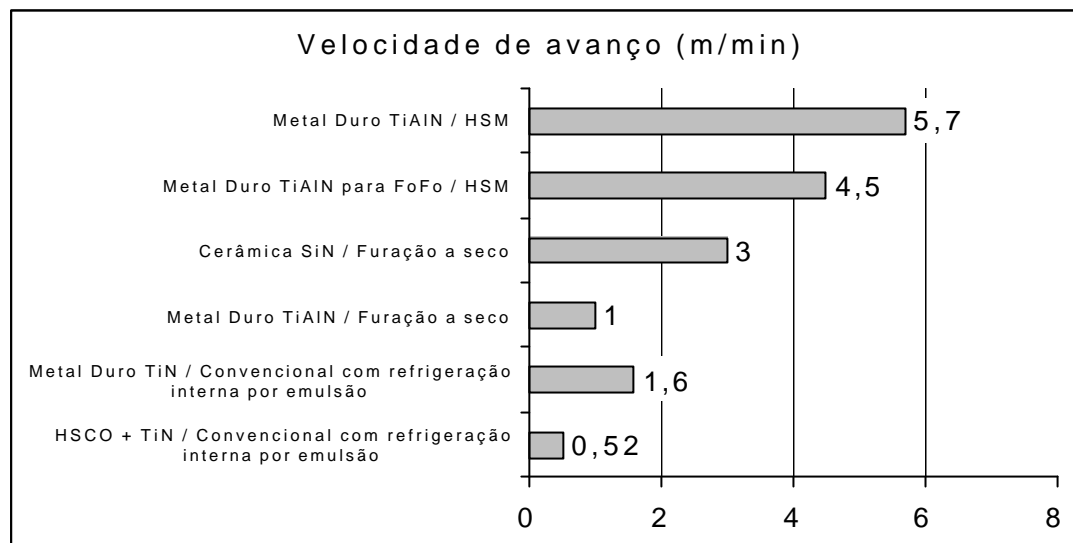
Enfim, muitas das considerações feitas ao fresamento de topo com HSM podem ser aplicadas ao torneamento com altíssima velocidade de corte: aplicações em

materiais endurecidos ou de alta rigidez, eliminação ou redução de rebarbas após a usinagem, usinagem de eletrodos; e também algumas das considerações voltadas ao torneamento em duro são válidas: 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).

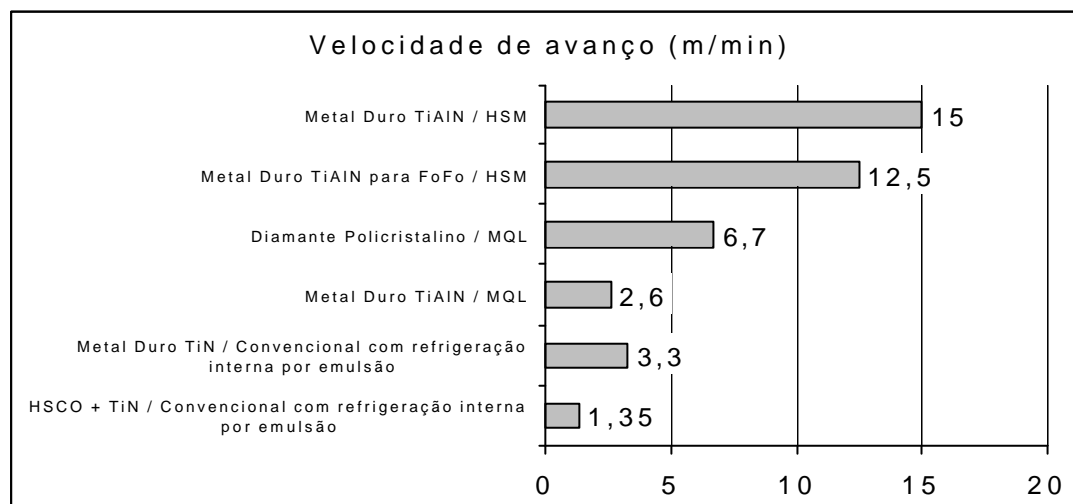
Furação: A aplicação de HSM para furações tem suas aplicações restritas, de uma maneira muito mais incisiva, ao material da ferramenta, do que as outras aplicações com HSM. A validade da lubrificação do corte ainda é discutida, seja por mínimas quantidades de lubrificante (MQL, em que se pulveriza um 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). Gühring et al. (1995), realizaram um trabalho comparativo de diferentes processos de furação em relação a velocidade de avanço obtida, para aço, ferro fundido e alumínio, conforme pode ser observado na figura 6.



(a)



(b)



(c)

Figura 6: Comparação das velocidades de avanço para um dado comprimento de corte comum em relação a vida útil das brocas em peças de (a) aço, (b) ferro fundido e (c) alumínio (Gühring et al., 1995).

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. É necessário estabelecer

também que o sistema de fixação da ferramenta, no caso da furação com HSM, sempre tem que ser através de um sistema apropriado para tal uso (tal como contração térmica (Kelch, 1999), híbrido mecânico-hidráulico (Sandvik, 1999) ou um HSK, quando se deseja refrigeração interna), e muitas vezes esta premissa encarece ainda mais a aplicação (fato que nem sempre pode ser observado em outros tipos de usinagem, que em determinados casos permitem fixações não tão diferentes das convencionais, tais como torneamento e alguns casos de fresamento).

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.

Conforme pode ser observado na Figura 7, o alargamento de furos com alargadores é sujeito a forças radiais mais uniformes quando comparado ao mandrilhamento de um mesmo furo. É possível obter assim maiores precisões dimensionais e melhores índices de rugosidade.

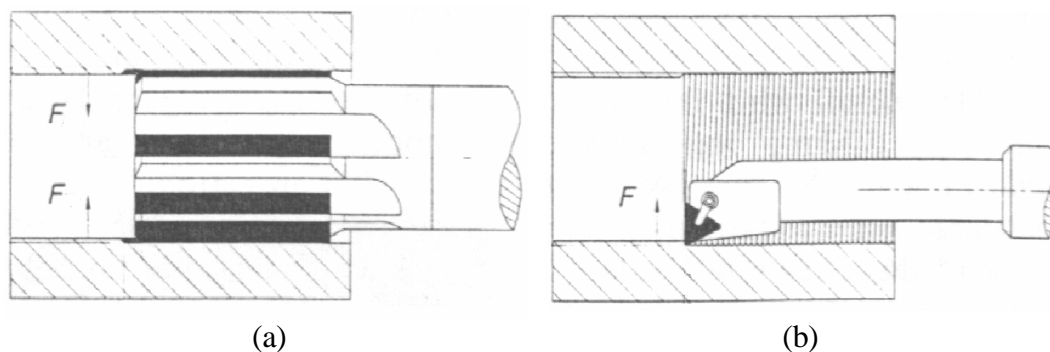


Figura 7: Contraste da distribuição de esforços durante o acabamento de furos com: (a) alargamento e (b) mandrilhamento (adaptado de Vig, 1996).

Outra vantagem que deriva desta condição de equilíbrio de forças é a maior rigidez da ferramenta durante a usinagem, que possibilita o alargamento de furos mais profundos e de diâmetro mais reduzido. Contudo, o alargamento de furos através de mandrilhamento com HSM é mais flexível relativamente ao ferramental (os alargadores para HSM são quase todos inteiriços, alguns poucos podem ser regulados para uma pequena faixa de diâmetros).

A grande desvantagem do alargamento, tanto com altíssima velocidade de corte como na usinagem convencional, é a de não poder corrigir erros de posicionamento do furo existente, ao contrário do mandrilhamento (Vig, 1996).

Ainda sobre o mandrilhamento com altíssima velocidade de corte, suas aplicações são, incontestavelmente, uma garantia de qualidade, porém ainda o consumo de energia para aplicações em grande escala tornam sua utilização questionável (Jaissle, 1996).

Em operações de acabamento de perfis de alumínio para fabricação de esquadrias, Boetz (1996) relata que é possível 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.

Jaissle (1996) relata que aplicações de processo de usinagem com altíssima velocidade de corte em produção de larga escala são viáveis. Ressalta 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.

Ainda neste mesmo estudo, o autor aponta que, estas aplicações de alta produtividade atualmente justificam-se apenas para peças muito pequenas, seja com altíssimas velocidades de corte, ou com altos avanços, ou ambos. Contudo, afirma que a regra prática de acréscimo do número de fusos paralelos utilizada na elaboração de processos de fabricação quando se deseja aumentar a produtividade ainda é válida para HSM, mas deve ser ponderada com mais cuidado devido ao custo destes fusos.

Também nesta direção de aplicações de processos com HSM para alta produtividade, Beck H. (in Apostila do Seminário..., 1996), demonstra usos de faceamento com discos de fresas de diâmetro elevado para alumínio. Grandes considerações quanto a segurança devem ser feitas neste tipo de operação, tais como elevados coeficientes de segurança na construção do corpo destas fresas. Schulz et al. (1995) também ressaltam esta condição para fresamentos com HSM mais seguros: não é incomum que estilhaços literalmente voem de encontro à proteção da máquina devido as altas forças centrífugas aplicadas nestas ferramentas.

Desta maneira, os autores propõem otimizações nos processos de usinagem que levem em alta consideração o aspecto de segurança, principalmente no desenvolvimento de ferramentas para estas aplicações.

Por fim, Correa et al. (2001) desenvolveram um belo trabalho de análise 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.

Investigações com corpos de prova conduziram a níveis de rugosidade bastante reduzidos, melhores que de processos de retificação equivalentes. A tecnologia do processo ainda necessita de um melhor entendimento referente ao espectro de forças que compõe esta usinagem, além de estudos semelhantes para outros materiais.

O potencial deste tipo de processo de fabricação é amplo, bastando considerar as vantagens de flexibilidade e de redução de custos (econômicos e ecológicos) referentes a utilização de fluidos refrigerantes e ferramentas ao compará-lo com uma retificação.

Vale a pena ainda citar que muitos autores adotam uma definição de usinagem por retificação com altíssimas velocidades de corte, em sua maioria para denominar utilizações de rebolos com nitreto cúbico de boro de diâmetro reduzido e velocidades periféricas acima das convencionais, aplicadas a rebolos com óxido de alumínio por exemplo. Este conceito não será abordado nesta dissertação, por situar-se fora do escopo proposto de estudo, dada a completa diferenciação dos processos de usinagem por arestas cortantes.