

FRESAMENTO DE ACABAMENTO EM ALTAS VELOCIDADES PARA ELETRODOS DE GRAFITA INDUSTRIAL

Dr. Eng. Rolf Bertrand Schroeter

e-mail: rolf@lmp.ufsc.br

M. Eng. Mec. Rafael Kratochvil

e-mail: rkratochvil@brturbo.com.br

Laboratório de Mecânica de Precisão - LMP
Universidade Federal de Santa Catarina - UFSC
Departamento de Engenharia Mecânica – EMC
Campus Universitário – Trindade
Caixa Postal 476
CEP: 88010-970
Florianópolis, SC, Brasil

Dr. Eng. Jefferson de Oliveira Gomes

e-mail: gomes@ita.br

Instituto Tecnológico da Aeronáutica - ITA
Divisão de Engenharia Mecânica Aeronáutica
Praça Marechal Eduardo Gomes, 50 – Vila das Acácias
CEP: 12228-900
São José dos Campos, SP, Brasil

***Resumo.** A produção de moldes e matrizes de injeção em aços endurecidos é uma das tarefas de usinagem de maior grau de dificuldade, principalmente no que diz respeito à obtenção de boa precisão dimensional e qualidade superficial. Normalmente, utilizam-se para este tipo de operação os processos de fresamento e de eletroerosão. A partir deste conceito, um melhor entendimento e análise do processo de fabricação de eletrodos de Grafita é de absoluta importância para a indústria de ferramentaria, onde a usinagem de cavidades profundas ou de forma complexa é usual. Neste trabalho foram realizados ensaios de usinabilidade da Grafita, avaliando-se o desgaste sofrido pela ferramenta e qualidade superficial gerada, em direções de corte concordante e discordante e concluindo-se sobre as melhores técnicas e parâmetros para a usinagem deste material. As informações tecnológicas advindas deste trabalho são de grande interesse para pequena e média indústria de ferramentaria, por permitirem, através de um melhor entendimento do processo de corte da Grafita, uma maior produtividade na fabricação dos eletrodos.*

Palavras-chave: Usinagem, fresamento, grafita.

1. INTRODUÇÃO

Provavelmente o mais versátil e amplamente utilizado material para eletrodos em EDM seja a grafita. Entretanto, as ferramentas de corte e técnicas utilizadas para usinar grafita são diferentes das utilizadas na usinagem de metais. Diferenças em dureza, resistência, microestrutura e características de atrito requerem um enfoque modificado para a seleção das geometrias de ferramentas, material de ferramenta e parâmetros de corte [4]. A vantagem de se conseguir uma alta produtividade no processo

de eletroerosão, uma baixa taxa de desgaste do eletrodo em eletroerosão de desbaste e também o seu baixo peso, foram características para que este material fosse primeiramente utilizado para a fabricação de matrizes de forjamento, onde formas de grande volume predominam e existem baixas exigências de superfície para serem cumpridas [2].

Devido à sua baixa resistência mecânica, a Grafita é considerada fácil de usinar. Contudo, existem complicações no corte devido ao problema da estrutura cristalina em camadas do material e, especialmente, devido ao seu comportamento extremamente abrasivo, o que conduz a um fim antecipado da vida da ferramenta para materiais de corte sem revestimento. O princípio predominante de desgaste na ferramenta de corte é de natureza abrasiva e é proporcional a velocidade de corte e geometria da ferramenta utilizada.

O objetivo deste trabalho é demonstrar que a usinagem de grafita, utilizando parâmetros de corte habituais e estratégias triviais de corte e movimento de ferramenta, torna-se viável e sem grandes complicações. Informações e resultados serão analisados e concluídos para o estudo em questão através de ensaios realizados com diferentes parâmetros de corte, e também sob condições de fresamento específicas da usinagem de formas livres.

As matérias-primas mais frequentemente utilizadas na fabricação da grafita são vários tipos de coque, negro de fumo e grafitas naturais que começam por serem moídas, peneiradas e adicionadas a um ligante. A pasta assim obtida é homogeneizada e adicionada em moldes ou passada por feiras, bastante compactada. O material é então cozido lentamente, sob a proteção de pó de coque, até uma temperatura de pelo menos 1.000°C para completa eliminação das partículas voláteis do ligante, e para transformação em coque das restantes [1].

Grafitas para EDM são normalmente classificadas pelo tamanho do grão. O tamanho do grão é utilizado como critério porque a maioria das outras propriedades e características da grafita estão relacionadas direta ou indiretamente ao tamanho do grão e sua orientação. Atualmente, o mercado oferece classes de grafita de tamanho médio de grão inferior a 1 μm até grãos com 20 μm de tamanho médio. A escolha do tamanho médio de grão depende, grosso modo, do regime de trabalho ao qual o eletrodo estará sujeito, ou seja, desbaste, semi-acabamento ou acabamento, bem como da geometria do eletrodo [3]. Normalmente, classes de grafita com tamanho médio de partícula inferior a 1 μm são desenvolvidas especialmente para trabalho de acabamento fino no processo de EDM, pois a rugosidade da peça está diretamente relacionada ao tamanho da partícula do material.

Além de policristalina, a grafita é um material frágil, e apresenta uma fratura frágil como principal característica quando submetida à maioria dos processos de usinagem. Este comportamento é revelado quando, sob uma tensão de tração, torção ou compressão axial, ocorre uma fratura antes que seja possível verificar qualquer deformação plástica. Esta característica se deve à necessidade de menor energia para a formação e propagação de trincas do que para ocorrer deformação plástica. Assim, a grafita é usinada por um processo de fratura da estrutura policristalina ao invés de deformação plástica. No processo de corte da grafita praticamente não existem altas temperaturas nem forças de corte.

As condições de usinagem no corte da grafita modificam-se com a variação do ângulo de saída (γ) (figura 1). Segundo König (1997), com ângulos de saída bem negativos há um aumento significativo da tensão de compressão, enfraquecendo e facilitando a quebra do material. Como consequência disto, há um aumento na quantidade de fragmentos (pó) gerados, porém ao mesmo tempo uma diminuição no tamanho máximo das partículas. Com ângulos de saída positivos a geração de fragmentos tem uma tendência diferente, onde estes são de dimensões maiores e a tensão de compressão imposta é menor.

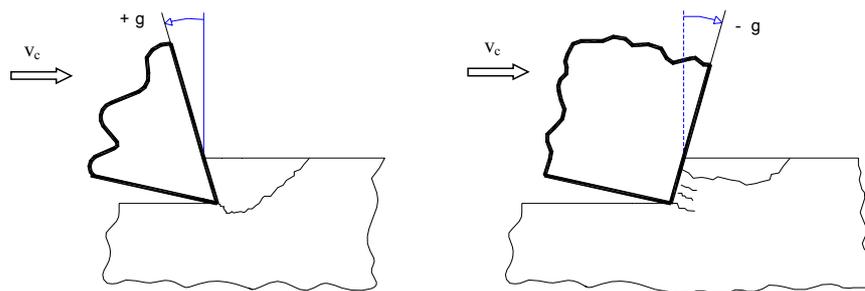


Figura 1. Condições de corte para diferentes ângulos de saída de cavaco.

A geração de pó de grafita, e a impregnação deste nos pontos mais imprevisíveis da máquina-ferramenta, é um dos problemas advindos da usinagem da mesma. O pó usinado da grafita penetra nas pequenas brechas e aberturas da máquina-ferramenta. Além disto, o pó deposita-se sobre o barramento e rolamentos, o que acarreta danos aos parafusos de fixação e mancais de deslizamento.

Também vale salientar que a grafita é eletricamente condutora e, quando partículas destas penetram nos computadores e gabinetes de controle do motor, podem provocar curtos elétricos intermitentes que levam à destruição na parte eletrônica. Esta dificuldade é, de certa maneira, contornável com a utilização de equipamentos de aspiração eficientes.

2. MATERIAIS, MÉTODOS E EQUIPAMENTOS

Neste trabalho foram realizados ensaios de vida de ferramenta e acabamento superficial, em diferentes velocidades de corte, utilizando ferramentas de metal-duro revestido com TiAlN, em corpos de prova de grafita industrial especial para confecção de eletrodos-ferramenta, com tamanho médio de grão de 8 μm , densidade média de 1,84 g/cm^3 e porosidade média de 7%.

Os ensaios foram realizados em uma fresadora de 3 eixos, com mesa horizontal, da marca *Hermle*, modelo C800U, com rotação máxima de 16.000 rpm, potência de 15 kW e avanço máximo de 20 m/min. Utilizou-se também, para a correta e segura coleta dos resíduos de grafita, ou seja, pó de grafita, um aspirador industrial com potência de 7,5 HP.

2.1. Ensaios de Vida de Ferramenta

Os ensaios para determinação do comportamento do desgaste foram realizados na forma de ensaios de vida de ferramenta, segundo a Norma ISO 8688-2, e adequados às necessidades deste estudo. Os ensaios, segundo a Norma, foram do tipo fresamento de topo, onde é utilizada predominantemente a periferia da ferramenta.

A escolha do critério de fim de vida para a análise proposta foi de $VB_m = 0,1$ mm, evitando testes de longa duração, pois a tendência do mecanismo de abrasão atuante é causar uma marca de desgaste constante uniforme [5].

As medições de desgaste das ferramentas foram realizadas a cada comprimento regular de usinagem. A primeira medição foi realizada com 4 m de comprimento usinado, a segunda com 8 m, a terceira com 10 m, e as subseqüentes a cada 1 m usinado. Este intervalo menor entre as medições, após 10 m usinados, promoveu mais segurança às medições, pois para algumas condições o desgaste estava próximo ao máximo atribuído. Cada condição de ensaio foi repetida uma vez, e em caso de discordância de resultados houve uma repetição extra.

Os ensaios V01, V02, V03 e V04 (tabela 1) foram realizados com ferramentas de topo reto de metal-duro inteiriças, classe K10, com diâmetro 8 mm, comprimento de 63 mm, revestidas com TiAlN

por processo PVD. Estas ferramentas tinham 2 (dois) dentes de corte, e foram fixadas no mesmo mandril com mesmo comprimento em balanço (33,9 mm).

Tabela 1. Condições de corte adotadas nos ensaios de vida de ferramenta

Ensaio	v_c [m/min]	Direção de corte	f_z [mm/dente]
V01	400	Concordante	0,05
V02	400	Discordante	0,05
V03	200	Concordante	0,05
V04	200	Discordante	0,05

Para que os testes com velocidades de corte mais elevadas fossem realizados, houve o planejamento de ensaios com um segundo tipo de ferramenta, de maior diâmetro. A ferramenta utilizada para este ensaio era de topo reto com diâmetro 16 mm, com quatro gumes de corte, inteiriça de metal-duro, revestida com TiAlN. O valor do parâmetro de corte avanço por dente (f_z) manteve-se em 0,05 mm, para que a característica de fresamento de acabamento do estudo fosse mantida, e houve a variação na direção de corte, conforme tabela 2.

Tabela 2 - Condições de corte para ensaio de vida de ferramenta com alta velocidade de corte.

Ensaio	Direção	v_c [m/min]	f_z [mm/dente]	a_p [mm]	a_e [mm]
SV01	Concordante	800	0,05	4	2
SV02	Discordante	800	0,05	4	2

2.2. Ensaios de Características de Contato Ferramenta-Material sobre a Integridade Superficial de Peças

Os problemas de fraturas e quebras nas bordas laterais e de saída da ferramenta na peça foram observados durante os ensaios de vida de ferramenta. A partir destes, houve o planejamento de quais pontos específicos deveriam ser analisados, para o estudo destas quebras de material.

O ensaio foi realizado em fresamento frontal de acabamento, com o uso de ferramentas de topo reto de diâmetro 8 mm, 4 dentes, inteiriças de metal-duro, revestidas com TiAlN. Houve a variação da direção de corte e da profundidade de corte radial, pois este é o parâmetro que tende a ser maximizado na produção, conforme a tabela 3. Com isto, pode-se determinar a influência da variação deste parâmetro em relação à qualidade de forma da peça, ou seja, se esta sofre quebra nas bordas, ou alguma outra fratura.

Tabela 3. Variáveis aplicadas para cada ensaio de fresamento frontal.

Ensaio	Direção de corte	v_c [m/min]	f_z [mm/dente]	v_f [mm/min]	a_p [mm]	a_e [mm]
ESF1	Concordante	400	0,05	3200	1,0	3,0
ESF2	Concordante	400	0,05	3200	1,0	4,0
ESF3	Concordante	400	0,05	3200	1,0	7,0
ESF4	Discordante	400	0,05	3200	1,0	3,0
ESF5	Discordante	400	0,05	3200	1,0	4,0
ESF6	Discordante	400	0,05	3200	1,0	7,0

A utilização de três valores diferentes de profundidade de corte radial teve o propósito de analisar a diferença nos valores de arco de contato, ou ângulo de contato, na integridade das superfícies usinadas

em ambas as direções de corte. Estes valores refletem três casos típicos: $a_e < D$, $a_e = D$, $a_e > D$. Em fresamento frontal, totalizam-se seis ensaios diferentes, com duas repetições para cada um.

3. APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

3.1. Ensaios de Vida de Ferramenta

Os testes tiveram por objetivo o acompanhamento da vida da ferramenta, observando o seu desempenho em direções e velocidades de corte diferentes, para acabamento. Os resultados, mostrados nas figuras 4, 5 e 7, foram expressos em função da direção de corte, velocidade de rotação e avanço por dente utilizados.

Em velocidade de corte mais baixa, 200 m/min, a marca de desgaste mostra uma evolução semelhante entre as diferentes direções de corte, concordante e discordante (figura 4).

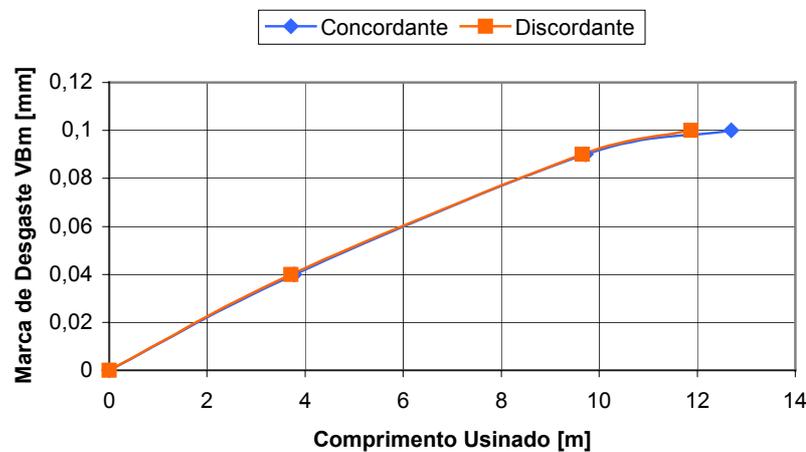


Figura 4. Evolução da marca de desgaste de flanco, para $v_c = 200$ m/min.

Nos ensaios com velocidade de corte de 400m/min, observou-se um melhor desempenho, ou seja, rendimento de corte, em direção discordante (figura 5). Nesta condição de corte verifica-se uma estabilização na evolução do desgaste, onde a ferramenta corta quase 10 m desgastando-se apenas 0,03 mm. Isto ocorre entre as marcas de desgaste de 0,06 e 0,09 mm. Já para o corte em direção concordante, com mesma velocidade de corte, este fenômeno não foi observado.

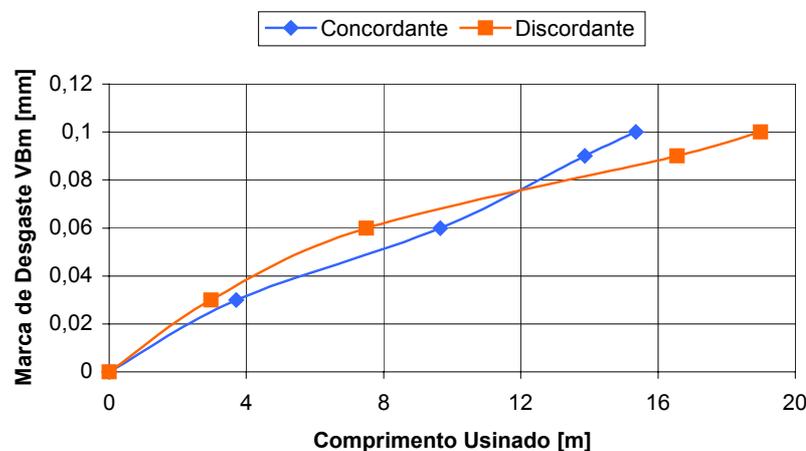


Figura 5. Evolução da marca de desgaste de flanco, para $v_c = 400$ m/min.

Em ambos os testes, para velocidades de 400 e 200 m/min, e direções de corte concordante e discordante, o fenômeno de desgaste foi semelhante. A partir das fotos realizadas no microscópio e segundo a norma ISO 8688-2, classificou-se o desgaste de flanco da ferramenta como “fenômeno de deterioração uniforme do flanco”. É a região com espessura constante de desgaste, e estende-se por toda a porção do flanco da ferramenta, adjacente ao inteiro comprimento ativo do gume de corte. Na figura 6 a seguir são mostrados exemplos do desgaste sofrido pelas ferramentas no teste.

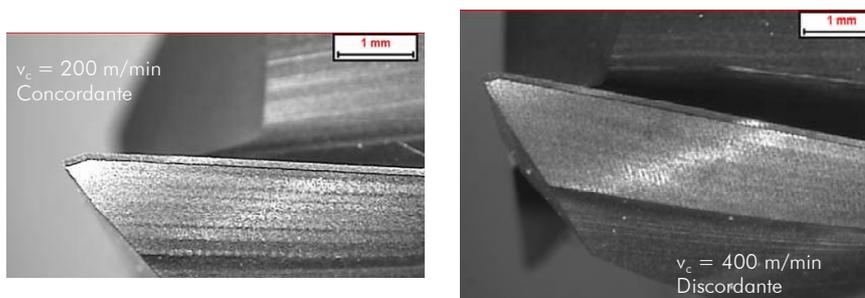


Figura 6. Desgaste de flanco uniforme para VB = 0,1 mm.

Para uma análise mais abrangente realizaram-se ensaios com velocidades de corte de 800 m/min, buscando-se com isso confirmar a influência inversamente proporcional da velocidade de corte sobre a vida da ferramenta, no corte da grafita. O avanço por dente manteve-se constante em 0,05 mm/dente ($v_f = 3200$ mm/min), como nos ensaios com v_c de 400 m/min e 200 m/min.

Conforme a figura 7, verifica-se um comprimento usinado em direção de corte discordante na ordem de 15% maior que em direção de corte concordante, para uma marca de desgaste de flanco médio de 0,1 mm. Esta característica de atingir-se um maior vida de ferramenta em direções de corte discordante também ficou evidenciada no ensaio com $v_c = 400$ m/min.

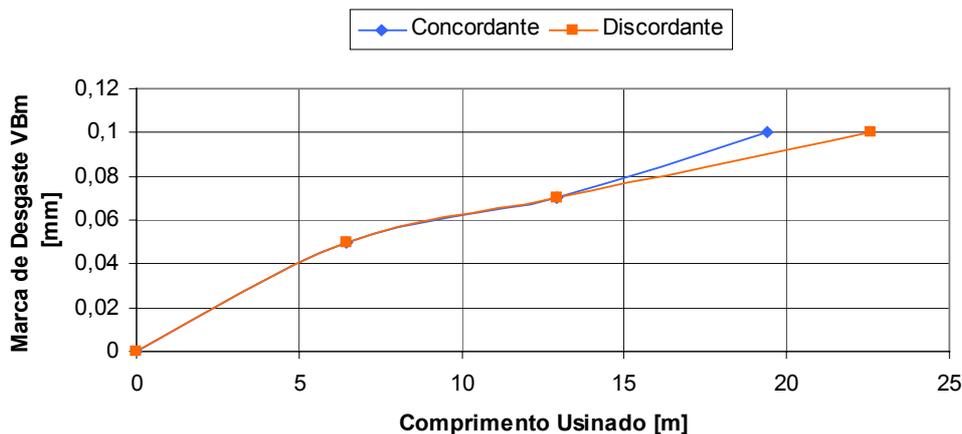


Figura 7. Evolução da marca de desgaste de flanco médio em função da direção de corte, para $v_c = 800$ m/min.

Através destes resultados pode-se verificar que na usinagem de grafita, ao contrário da usinagem de materiais ferrosos, endurecidos ou não, o aumento da velocidade de corte não causa uma diminuição da vida da ferramenta. Assim, com o uso da HSC na usinagem de grafita, entre todas as vantagens e benefícios existentes, também pode diminuir os custos com ferramental de corte.

3.2. Ensaios de Características de Contato Ferramenta-Material

A característica de contato no movimento de entrada da ferramenta, com o uso de todas as profundidades de corte radiais e em qualquer direção de corte ensaiada, não geraram consequências indesejáveis sobre a superfície de entrada da ferramenta no material, como quebras e arrancamento de material (figura 8).

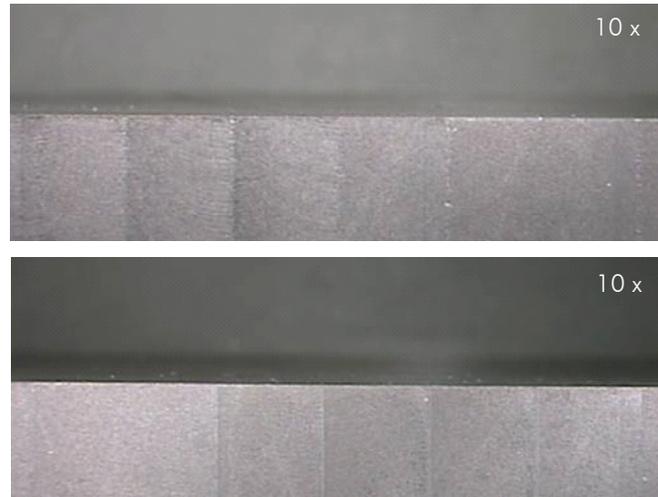


Figura 8. Bordas onde houve a entrada da ferramenta, em direção de corte discordante e concordante, respectivamente.

Na superfície frontal de saída, as direções e profundidades radiais de corte utilizadas originaram superfícies com características diferentes. Para direção de corte concordante, com $a_e = 3$ mm e $a_e = 4$ mm, e em fresamento combinado com $a_e = 7$ mm (entrada em discordante com $h \approx \text{máx}$, e saída em concordante com $h = 0$), observaram-se micro fraturas nas bordas de saída (figura 9). Estas são de dimensão desprezível, podendo ser desconsideradas como falha ou até mesmo como irregularidade de processo.

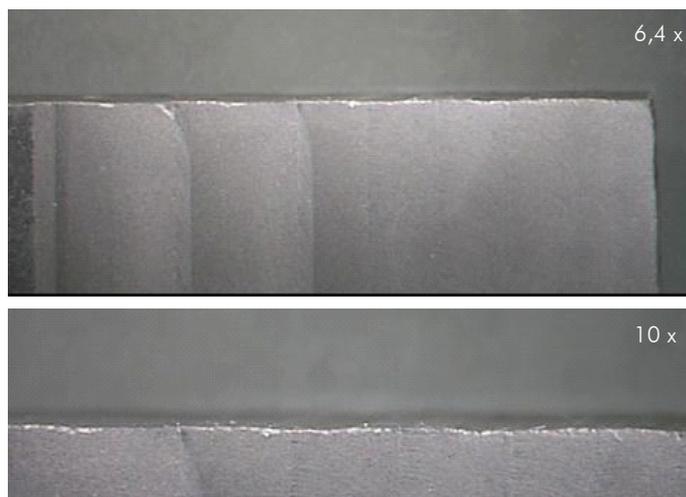


Figura 9. Borda de saída para corte em direção concordante e combinado, entrada em discordante ($h \approx \text{máx}$) e saída em corte concordante ($h = 0$).

Já para movimentos de corte em direção discordante, surgem fraturas na borda de saída da peça para profundidades radiais de corte acima de 3 mm, ou seja, $a_e = 3$ mm e $a_e = 4$ mm. O tamanho destas é proporcional à profundidade de corte utilizada (figura 10). Com $a_e = 3$ mm são constatadas apenas micro fraturas, porém já localizadas na parte da peça onde há o último contato entre gume da ferramenta e material, fato não ocorrido nas micro fraturas geradas no corte em direção concordante, presentes ao longo de toda a borda da peça.

Com uma profundidade radial de corte maior, $a_e = 7$ mm, onde o processo de fresamento torna-se combinado (com a entrada da ferramenta em corte discordante com $h = 0$, e saída em corte concordante com $h \approx \text{máx}$) as fraturas são de dimensões maiores e estendem-se por quase toda a borda, ou seja, ao longo dos 7 mm usinados pelo passe.

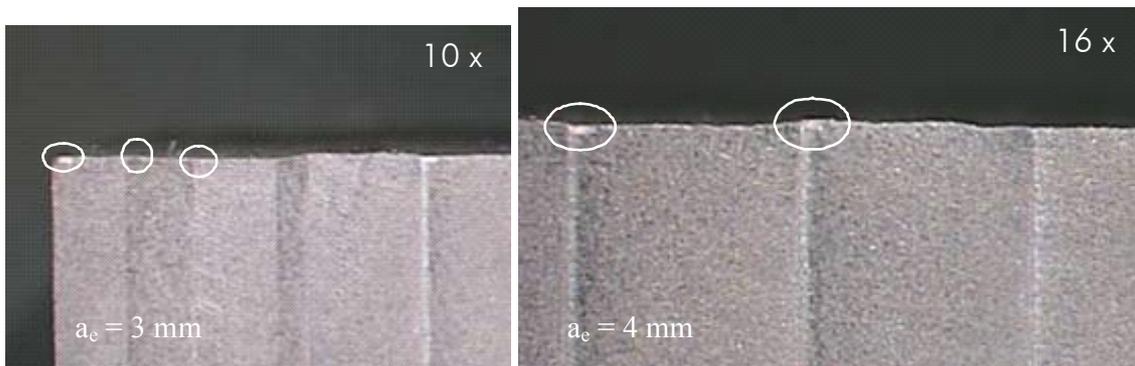


Figura 10. Fraturas nas bordas de saída para o corte em direção discordante.

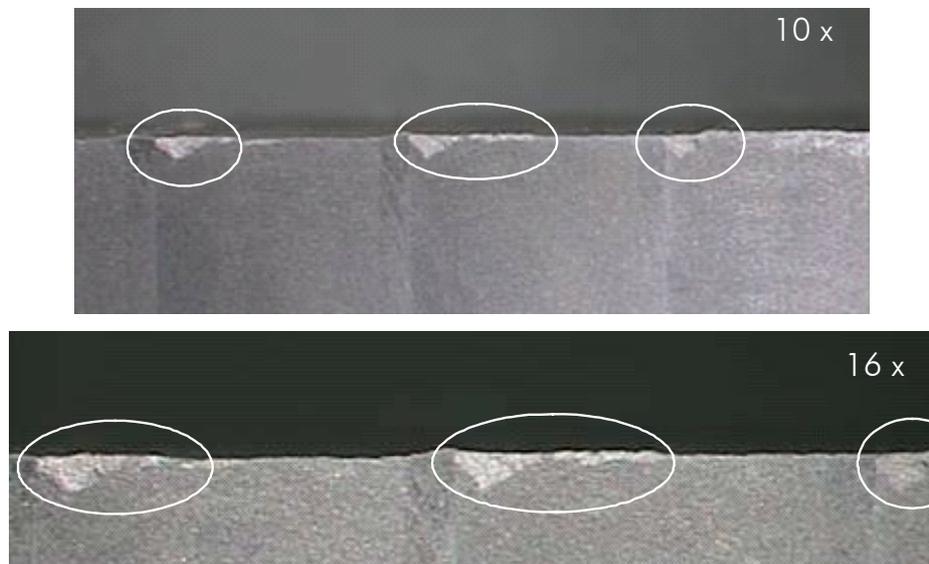


Figura 11. Borda de saída para corte combinado com $a_e = 7$ mm, entrando discordante ($h = 0$) e saindo concordante ($h \approx \text{máx}$).

Também através deste ensaio, os resultados comprovam a teoria proposta por König (1997), onde o fenômeno de quebra das bordas e cantos de saída da ferramenta da peça é também entendido através da análise da direção do vetor da força de corte (Figura 12). As quebras ocorrem quando este vetor está

direcionado para fora da peça. E mais, esta quebra é excitada conforme a quantidade de material que há para ser arrancada pela força atuante. Com profundidades de corte maiores, acima de $D/2$, a condição para que ocorram as fraturas é mais favorável.

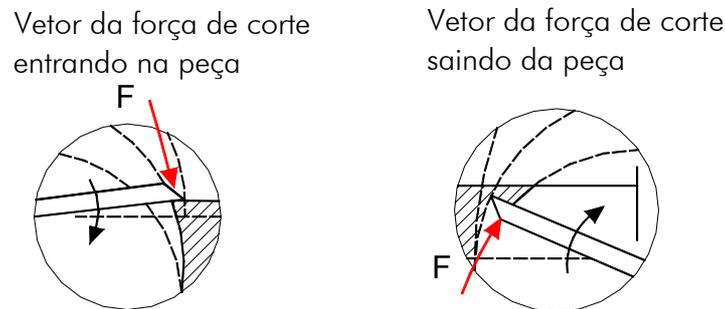


Figura 12. Orientação dos vetores da força de corte na saída da peça, para direções de corte concordante e discordante, respectivamente.

Assim, para se obter uma superfície de boa qualidade, na saída da ferramenta da peça, o corte em direção concordante fornece os melhores resultados, para profundidades de corte radial $a_e = D/2$.

4. CONCLUSÕES

Conforme os ensaios realizados de vida de ferramenta, pode-se concluir que o corte em direção discordante fornece os melhores resultados, onde a ferramenta atinge maior vida. Esta característica ficou mais evidenciada com o uso de velocidades de corte mais elevadas.

Com relação aos ensaios de integridade superficial, os resultados demonstram que a programação das estratégias de movimento da ferramenta no corte, para fabricação de eletrodos de forma livre, deve respeitar certas peculiaridades. A saída da peça em corte de direção discordante provoca quebra na borda da peça, de tamanho proporcional a profundidade de corte radial utilizada. A saída da ferramenta da peça, executada em direção de corte concordante, provoca micro fraturas, independente da profundidade de corte radial programada.

5. AGRADECIMENTOS

Este trabalho não seria executado em sua totalidade sem a cooperação e apoio técnico do CIMATEC – SENAI de Salvador, BA. Agradecimentos a todos os profissionais da área de ferramentaria e aos diretores desta instituição. Agradecimentos especiais também à empresa CARBOMECH Ind. de Produtos Eletromecânicos Ltda, na pessoa do Sr. Kiyoshi Tome, pela ajuda na obtenção da matéria-prima para o trabalho.

6. REFERÊNCIAS

- [1] **Materiais Condutores**. Disponível em: <www.labspot.ufsc.br/~jackie/cap3_new.pdf>. Acesso em: 10 outubro 2002.
- [2] KÖNIG, W.; KLOCKE, F.; KÖNIG, M. **Hochleistungserspannung von Graphit. Produktion und Management**. n. 85. Berlin: Springer Verlag, 1995. 21 p.
- [3] **Properties and characteristics of graphite**, Chapter 5. Disponível em: <www.poco.com/Library/edm/SG%20GERMAN.pdf>. Acesso em: 02 outubro 2002.
- [4] NIEMINEN, I.; PARO, J.; KAUPPINEN, V. High-speed milling of advanced materials. **Journal of Materials Processing Technology**, n. 56, p. 24-36, 1996.

- [5] KÖNIG, M. **Fräsbearbeitung von Graphitelektroden**. 1997. 134f.. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) - Rheinisch-Westfälischen Technischen Hochschule Aachen, Aachen, Alemanha, 1997.

HIGH SPEED MILLING OF GRAPHITE ELECTRODES

Dr. Eng. Rolf Bertrand Schroeter

e-mail: rolf@lmp.ufsc.br

M. Eng. Mec. Rafael Kratochvil

e-mail: rkratochvil@brturbo.com.br

Laboratory of Precision Mechanics – LMP
Federal University of Santa Catarina - UFSC
Department of Mechanical Engineering – EMC
Campus Universitário – Trindade
Caixa Postal 476
Florianópolis, SC, Brasil
CEP 88010-970

Dr. Eng. Jefferson de Oliveira Gomes

e-mail: gomes@ita.br

Technological Institut of Aeronautic- ITA
Mechanical Aeronautic Engineering Division
Praça Marechal Eduardo Gomes, 50 – Vila das Acácias
CEP: 12228-900
São José dos Campos, SP, Brasil

***Abstract.** The molds and dies production in hard steel is one of the machining tasks that have a great degree of difficulty, mainly in the cases to attempt good dimensional precision and superficial quality. Normally, the electrodischarge machining and milling processes are used for molds and dies manufacture. From this concept, a better agreement and analysis of the manufacture process of graphite electrodes is absolutely important for the tool makers, where the machining of deep cavities and complex forms is usual. In this Study, had been made machinability assays of graphite, with posterior analysis of tool wear and superficial quality generated, in down and up milling. The results allowed the conclusion about some good machining strategies and parameters for makers allowing them to choose though a better agreement of the cutting process of graphite and a bigger productivity in electrodes manufacturing.*

Keyword: Machining, milling, graphite