

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

**FRESAMENTO DE ACABAMENTO EM ALTAS VELOCIDADES DE
CORTE PARA ELETRODOS DE GRAFITA INDUSTRIAL**

Rafael Kratochvil

DISSERTAÇÃO SUBMETIDA À UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA
CATARINA PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE EM ENGENHARIA
MECÂNICA

FLORIANÓPOLIS, MARÇO DE 2004

FRESAMENTO DE ACABAMENTO EM ALTAS VELOCIDADES DE CORTE PARA ELETRODOS DE GRAFITA INDUSTRIAL

Rafael Kratochvil

Esta Dissertação foi julgada adequada para a obtenção do título de

Mestre em Engenharia

Especialidade Engenharia Mecânica, Área de Concentração Fabricação e aprovada em sua forma final pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica

Prof. Rolf Bertrand Schroeter, Dr. Eng.
Orientador

Prof. Jefferson de Oliveira Gomes, Dr. Eng.
Co-orientador

Prof. José Antônio Bellini da Cunha Neto, Dr.
Coordenador do Programa

Banca Examinadora

Prof. Walter Lindolfo Weingärtner, Dr.-Ing. – Presidente

Prof. Carlos Henrique Ahrens, Dr. Eng.

Prof. João Carlos Espíndola Ferreira, Ph.D.

À minha família: Edith, Werner e Juli

Agradecimentos

À minha família pelo apoio e confiança proporcionados durante toda a caminhada, iniciada a mais de dois anos, que possibilitou a conclusão deste trabalho.

Ao Prof. Jefferson de Oliveira Gomes ("Jeff") por sempre acreditar em meu potencial, pelos ensinamentos repassados, pela receptividade de sua família em momentos necessários e por proporcionar as condições para que este trabalho alcançasse os objetivos propostos.

Ao Prof. Rolf pela orientação neste trabalho, e também pelo voto de confiança dado quando ainda iniciava no mundo da pesquisa tecnológica, proporcionando a oportunidade de conhecimento de novas tecnologias, e pessoas.

Ao POSMEC por acreditar, e à CAPES por financiar a bolsa de estudo para o trabalho.

Ao LMP, por toda a estrutura e material disponibilizados, pelo pessoal que apoiou e incentivou, pelos colegas e amigos eu ficarei para sempre na lembrança (Helton, Satoshi, Daniel Campos, "Pedal", Polli, Miltinho, Marco Paulo, Sunada, Cleyzer, Eduardo, Leonardo, Borille, Castillo, Vincenzo, Jonas, Tiago, David, Ana, Elis, Livia, Eliene, enfim todos). Especialmente ao Bruno e Gustavo que sempre auxiliaram quando necessário, de maneira prestativa.

Ao Senai-Cimatec de Salvador e também à FAPESB, por proporcionar toda sua estrutura, e assim condições para que este trabalho fosse conduzido e realizado. Ao pessoal do Cimatec que me recebeu de forma excelente, Leoni, Marcão, Soquinho, Aginaldo, "Topo Gigio", Alexandre Barros, Alexandre Paes, Paulo Guedes, Quito, Guilherme, Mário e a todos outros não nominados aqui.

A minha namorada Larissa pela compreensão e calma nas dificuldades e pelo companheirismo e apoio em todos os momentos.

A empresa CARBOMEC Ltda, na pessoa do Sr. Kiyoshi Tome, pela doação da grafita Toyo Tanso ISEM-8[®].

A empresa G C Ltda, na pessoa da Sra. Filomena Arcos, pela doação da grafita Poco EDM 2[®].

A todos que de uma forma ou de outra me ajudaram, meu sincero e eterno agradecimento.

"A mente que se abre a uma nova idéia jamais voltará ao seu tamanho original."

Albert Einstein

"O rio atinge seu objetivo, porque aprendeu a contornar obstáculos." *Quo Vadis*

"Feliz aquele que consegue conhecer as causas das coisas." *Virgilio*

"O que sabemos é uma gota, o que ignoramos é um oceano." *Isaac Newton*

"Tudo posso naquele que me fortalece." *Filipenses 4:13*

Sumário

| | |
|---|----|
| LISTA DE FIGURAS | 8 |
| LISTA DE TABELAS | 11 |
| SIMBOLOGIA..... | 12 |
| RESUMO | 14 |
| ABSTRACT | 15 |
| 1 INTRODUÇÃO..... | 16 |
| 2 ESTADO DA ARTE..... | 20 |
| 2.1 Grafita como Material de Engenharia..... | 20 |
| 2.1.1 Propriedades e Características da Grafita Industrial | 21 |
| 2.1.2 Obtenção da Grafita | 22 |
| 2.1.3 Tipos de Grafita | 24 |
| 2.2 Fundamentos do Processo de Usinagem | 26 |
| 2.2.1 Processo de Usinagem com Ferramenta de Geometria Definida | 26 |
| 2.2.2 Geometria da Parte Cortante da Ferramenta de Corte | 27 |
| 2.2.3 O Processo de Formação de Cavaco no Corte | 29 |
| 2.2.4 Solicitações Impostas sobre a Ferramenta no Processo de Usinagem..... | 32 |
| 2.2.5 Avarias e Desgastes de Ferramentas de Corte | 35 |
| 2.2.6 Mecanismos de Desgaste em Ferramentas de Corte..... | 37 |
| 2.2.7 Vida de Ferramenta | 39 |
| 2.3 Usinagem por Fresamento..... | 40 |
| 2.3.1 Processo de Fresamento | 40 |
| 2.3.2 Fresamento de Topo..... | 42 |
| 2.3.3 Fresamento HSC | 44 |
| 2.4 Fresamento de Grafita..... | 46 |
| 2.4.1 Problemas Gerados na Usinagem de Grafita..... | 47 |
| 2.4.2 Formação de Cavaco no Fresamento de Grafita | 48 |
| 2.4.3 Influência da Geometria da Ferramenta de Corte..... | 50 |
| 2.4.4 Estratégias de Movimento de Corte para Fresamento de Acabamento..... | 52 |
| 2.4.5 Materiais de Ferramentas de Corte para Usinagem de Grafita | 53 |
| 2.4.6 Mecanismos de Desgaste na Usinagem de Grafita | 56 |

| | | |
|-------|---|-----|
| 2.4.7 | Revestimentos para Ferramentas de Corte na Usinagem de Grafita..... | 59 |
| 3 | MATERIAIS E MÉTODOS..... | 62 |
| 3.1 | Material de Ensaio..... | 62 |
| 3.2 | Máquina-ferramenta..... | 62 |
| 3.3 | Equipamentos Auxiliares..... | 63 |
| 3.4 | Metodologia Aplicada aos Ensaios..... | 65 |
| 3.4.1 | Procedimento de Ensaios para Acabamento Superficial..... | 65 |
| 3.4.2 | Procedimentos para Ensaio de Características de Contato Ferramenta- Material sobre a Integridade Superficial de Peças..... | 71 |
| 3.4.3 | Procedimentos para Ensaio de Vida de Ferramenta..... | 74 |
| 4 | ANÁLISE DOS RESULTADOS..... | 77 |
| 4.1 | Análise dos Resultados dos Ensaios de Acabamento Superficial..... | 77 |
| 4.1.1 | Ensaios de Fresamento Frontal e Periférico..... | 77 |
| 4.1.2 | Ensaio em Planos Inclinados..... | 81 |
| 4.2 | Análise dos Resultados sobre as Características de Contato Ferramenta-Material. | 83 |
| 4.3 | Ensaios de Vida de Ferramenta..... | 92 |
| 5 | ESTUDO DE CASOS..... | 99 |
| 5.1 | Eletrodo 01 (Eletrodo fêmea)..... | 99 |
| 5.2 | Eletrodo 02 (Eletrodo-canal macho). | 102 |
| 5.3 | Eletrodo 03 (Eletrodo parede fina, canal macho)..... | 104 |
| 5.4 | Eletrodos Torre..... | 107 |
| 6 | CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS..... | 110 |
| 7 | REFERÊNCIAS..... | 113 |
| | ANEXO..... | 120 |

Lista de Figuras

| | |
|--|----|
| Figura 1.1 - Comparação na utilização da grafita e do cobre, em processo EDM [8]. . | 18 |
| Figura 2.1 - Etapas de fabricação de grafita industrial [48]. | 24 |
| Figura 2.2 - Esquema representativo de uma ferramenta com geometria definida (DIN 6581). | 27 |
| Figura 2.3 - Principais ângulos e raios da ferramenta de corte [44]. | 28 |
| Figura 2.4 - Regiões importantes da raiz do cavaco na usinagem (Shaw <i>apud</i> Markus [44]). | 30 |
| Figura 2.5 - Mecanismo de formação de cavaco [16]. | 30 |
| Figura 2.6 - Forças de usinagem e suas componentes para o torneamento [16]. | 32 |
| Figura 2.7 - Posição geométrica da quina e suas grandezas em relação ao eixo de rotação da peça [41]. | 33 |
| Figura 2.8 - Dependência das componentes das forças de usinagem em relação às variáveis mais importantes [16]. | 34 |
| Figura 2.9 - Tipos de avarias e desgaste nas ferramentas de corte (Sandvik <i>apud</i> Markus [44]). | 35 |
| Figura 2.10 - Formas de desgastes e grandezas a serem medidas na cunha de corte [16]. | 37 |
| Figura 2.11 - Causas do desgaste na usinagem [16]. | 38 |
| Figura 2.12 - Condição de contato no fresamento. | 41 |
| Figura 2.13 - Fresamento discordante, concordante e combinado [20]. | 42 |
| Figura 2.14 - Tipos de fresas de topo [18]. | 43 |
| Figura 2.15 - Fatores influentes sobre a tecnologia de corte HSC. | 46 |
| Figura 2.16 - Exemplos de aspiração com bicos instalados na mesa da máquina. | 48 |
| Figura 2.17 - Mecanismo de formação de cavaco. | 49 |
| Figura 2.18 - Resultante de forças na formação de cavaco. | 50 |
| Figura 2.19 - Condições de corte para diferentes ângulos de saída de cavaco. | 51 |
| Figura 2.20 - Relação entre a dureza e a tenacidade para diversos materiais de ferramentas de corte [16]. | 54 |
| Figura 2.21 - Constituintes presentes na estrutura do metal duro [21]. | 54 |
| Figura 2.22 - Mecanismos de desgaste na face e no flanco da ferramenta [19]. | 58 |

| | |
|--|----|
| Figura 2.23 - Comparação entre diferentes ferramentas de corte e revestimentos [29]. | 61 |
| Figura 3.1 - Fresadora <i>HERMLE</i> utilizada nos ensaios. | 63 |
| Figura 3.2 - Microscópio de bancada utilizado para análise de desgaste de ferramenta e integridade de superfície nos corpos de prova. | 64 |
| Figura 3.3 - Rugosímetro utilizado para análise de superfície. | 64 |
| Figura 3.4 - Aspirador de pó industrial utilizado nos ensaios. | 65 |
| Figura 3.5 - Cápsula de papelão com bocais fixados, e cobertura em plástico já montada. | 67 |
| Figura 3.6 - (A) Disposição dos tubos de aspiração na máquina-ferramenta. (B) Corpo de prova montado sob a fixação, e bocal direcionado a zona de corte. | 67 |
| Figura 3.7 - Aspecto do corpo de prova com ângulos de inclinação das superfícies fresadas. | 68 |
| Figura 3.8 - Movimentação da ferramenta em direção longitudinal sobre a superfície. | 69 |
| Figura 3.9 - Numeração atribuída aos planos inclinados. | 70 |
| Figura 3.10 - Inclinação das superfícies e movimentos executados nos ensaios. | 70 |
| Figura 3.11 - Detalhamento do movimento da ferramenta e das superfícies analisados no ensaio de contato ferramenta-material. | 74 |
| Figura 3.12 - Ferramenta de diâmetro 8 mm e 2 dentes, utilizada nos ensaios de vida com $v_c = 200$ m/min e $v_c = 400$ m/min. | 76 |
| Figura 3.13 - Ferramenta de diâmetro 16 mm e 4 dentes, utilizada nos ensaios de vida com alta velocidade de corte ($v_c = 800$ m/min). | 76 |
| Figura 4.1 - Influência da velocidade de rotação e avanço por dente na qualidade superficial no fresamento periférico. | 78 |
| Figura 4.2 - Influência da velocidade de rotação e avanço por dente na qualidade superficial no fresamento frontal. | 80 |
| Figura 4.3 - Fresamento em plano inclinado de 45° . | 82 |
| Figura 4.4 - Fresamento em plano inclinado de 75° . | 82 |
| Figura 4.5 - Corpo de prova após ensaios de superfície inclinada. | 83 |
| Figura 4.6 - Características de contato da ferramenta no corte. | 84 |
| Figura 4.7 - Borda sem fratura, corte combinado com saída concordante ($h = 0$). | 85 |
| Figura 4.8 - Detalhamento do corte para as condições onde ocorre a fratura da borda, e onde não ocorre a mesma. | 86 |

| | |
|--|-----|
| Figura 4.9 - Borda com fraturas, corte combinado com saída concordante ($h \approx \text{máx}$).. | 87 |
| Figura 4.10 - Bordas onde houve a entrada da ferramenta, em direção de corte discordante e concordante, respectivamente..... | 87 |
| Figura 4.11 - Borda de saída para corte em direção concordante e combinado, entrada em discordante ($h \sim \text{máx}$) e saída em corte concordante ($h = 0$). | 89 |
| Figura 4.12 - Fraturas nas bordas de saída para o corte em direção discordante. | 90 |
| Figura 4.13 - Borda de saída para corte combinado com $a_e = 7\text{mm}$, entrando discordante ($h = 0$) e saindo concordante ($h \sim \text{máx}$). | 90 |
| Figura 4.14 - Orientação dos vetores da força de corte na saída da peça, para direções de corte concordante e discordante, respectivamente. | 91 |
| Figura 4.15 - Detalhamento das situações de saída de ferramenta para profundidades radiais de corte $a_e = D/2$ | 91 |
| Figura 4.16 - Evolução da marca de desgaste de flanco, para $v_c = 400\text{ m/min}$ | 93 |
| Figura 4.17 - Evolução da marca de desgaste de flanco, para $v_c = 200\text{ m/min}$ | 93 |
| Figura 4.18 - Desgaste de flanco uniforme para $VB = 0,1\text{ mm}$ | 94 |
| Figura 4.19 - Comparação entre os gumes da ferramenta para marcas de desgaste de flanco de $0,05\text{ mm}$ e $0,1\text{ mm}$ | 95 |
| Figura 4.20 - Análise qualitativa da composição química média da parte desgastada da ferramenta. | 96 |
| Figura 4.21 - Evolução da marca de desgaste de flanco médio em função da direção de corte, para $v_c = 800\text{ m/min}$ | 97 |
| Figura 5.1 - Aspecto do eletrodo-ferramenta após acabamento 01..... | 100 |
| Figura 5.2 - Simulação do movimento de corte no acabamento 01, gerado pelo software <i>SurfCam</i> | 102 |
| Figura 5.3 - Aspecto final do eletrodo. | 102 |
| Figura 5.4 - Eletrodo-ferramenta para erosão de canal. | 103 |
| Figura 5.5 – Detalhe das dimensões da micro-parede superior. | 106 |
| Figura 5.6 - Eletrodo 03, com detalhe da micro-parede. | 106 |
| Figura 5.7 - Eletrodos-torre fresados para análise de trajetórias de corte. | 107 |
| Figura 5.8 - Localização da quebra da borda na execução da estratégia, e trajetória do movimento em arco na saída de cada percurso. | 108 |

Lista de Tabelas

| | |
|---|----|
| Tabela 3.1 - Propriedades das grafitas utilizadas nos ensaios | 62 |
| Tabela 3.2 - Ensaio realizados nas oito superfícies inclinadas. | 71 |
| Tabela 3.3 - Variáveis aplicadas para cada ensaio de fresamento frontal..... | 72 |
| Tabela 3.4 - Variáveis aplicadas para cada ensaio de fresamento periférico, para análise da integridade na entrada e saída da ferramenta na peça..... | 73 |
| Tabela 3.5 - Condições de corte adotadas nos ensaios de vida de ferramenta..... | 75 |
| Tabela 3.6 - Condições de corte para ensaio de vida de ferramenta com alta velocidade de corte..... | 76 |
| Tabela 4.1 - Análise quantitativa dos componentes existentes na parte desgastada da ferramenta. | 96 |

Simbologia

| | | |
|--------------------|----------------------|--|
| h | [mm] | Espessura de cavaco |
| h_m | [mm] | Espessura média de cavaco |
| φ | [°] | Ângulo de contato |
| φ_{ef} | [°] | Ângulo de contato efetivo de corte |
| φ_e | [°] | Ângulo de contato na entrada da ferramenta |
| φ_a | [°] | Ângulo de contato na saída da ferramenta |
| χ | [°] | Ângulo de direção ou de posição do gume |
| γ | [°] | Ângulo de saída |
| α | [°] | Ângulo de incidência do gume |
| ε | [°] | Ângulo de quina da ferramenta |
| β | [°] | Ângulo de cunha |
| λ | [°] | Ângulo de inclinação do gume |
| r_ε | [mm] | Raio da quina da ferramenta |
| ρ | [μm] | Raio do gume da ferramenta |
| a_p | [mm] | Profundidade axial de corte |
| a_e | [mm] | Profundidade radial de corte |
| b | [mm] | Largura de usinagem |
| F | [N] | Força de usinagem |
| F_c | [N] | Força de corte |
| F_f | [N] | Força de avanço |
| F_p | [N] | Força passiva |
| $k_{c1.1}$ | [N/mm ²] | Força específica de corte |
| $1 - m_c$ | - | Expoente de Kienzle para a força de corte |
| v_c | [m/min] | Velocidade de corte |
| v_f | [mm] | Velocidade de avanço |
| f_z | [mm] | Avanço por dente |
| VB_m | [mm] | Marca de desgaste de flanco médio |
| $VB_{m\acute{a}x}$ | [mm] | Marca de desgaste de flanco máximo |

| | | |
|-------------|-------------------|---|
| R_a | [μm] | Desvio médio aritmético de rugosidade |
| R_z | [μm] | Profundidade média de rugosidade |
| λ_c | [mm] | Comprimento de onda limite (<i>cut off</i>) |

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. Uma parcela considerável da precisão de peças eletroerodidas depende da precisão de fabricação dos eletrodos utilizados. 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. 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 à velocidade de corte e geometria da ferramenta utilizada. Atualmente, os fabricantes, bem como os especialistas em eletrodos para eletroerosão, usinam a grafita a partir de recomendações passadas por operadores mais experientes, com formação técnica em usinagem de materiais metálicos, somente. Neste trabalho foram realizados ensaios de usinabilidade da grafita, com posterior análise do desgaste sofrido pela ferramenta e qualidade superficial gerada, em direções de corte concordante e discordante. Os resultados permitiram a conclusão sobre algumas boas 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.

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. One considerable part of electrodischarged products precision depends on the electrodes manufacture precision. 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. Due to its low mechanical strength, graphite is considered an "easy to machine" material. However, machine complications due the problem of material crystalline layers structure, especially which had exist to its extremely abrasive behavior, what it leads to an anticipated end of the tool life for tool materials without covering. The predominant tool wear principle is from abrasive mechanism and is proportional to the cutting speed and tool geometry. Currently, the manufacturers, as well as the electrodischarge machining electrodes specialists, cut graphite from experienced operators' recommendations and instructions, with technical education in metallic materials machining only. 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 had allowed the conclusion about some good techniques and machining parameters of this material. The technological informations of this work are of great interest for the small tool makers, for allowing, through a better agreement of the cutting process of graphite, a bigger productivity in electrodes manufacturing.

1 Introdução

A produção de moldes e matrizes de aço para fabricação seriada de peças injetadas e conformadas representa uma das tarefas de usinagem mais exigentes, principalmente no que diz respeito à precisão e à qualidade das superfícies usinadas. Normalmente, os moldes e matrizes são produzidos através dos processos de fresamento e de eletroerosão por descargas elétricas (EDM – *Electrical Discharge Machining*) [1].

A produtividade do fresamento costuma ser maior em comparação com a EDM, embora existam fortes limitações quanto ao fresamento. Os materiais de usinagem difícil ainda são quase que exclusivamente processados por EDM na produção de ferramentas, matrizes e moldes, como por exemplo os aços de alta liga para trabalho a quente [1].

A eletroerosão por descargas elétricas (EDM) é preponderantemente um processo térmico de remoção [1,2,4,6,7]. Durante o processo, sucessivas descargas elétricas são geradas por curtos intervalos de tempo entre dois materiais condutores de eletricidade (eletrodo-ferramenta e eletrodo-peça), removendo pequenas quantidades de material evaporado e fundido. Em decorrência disto, as propriedades termofísicas do material do eletrodo-ferramenta, como por exemplo temperaturas de fusão e de vaporização influenciam consideravelmente no rendimento do processo de EDM [27].

Uma influência também considerável sobre o comportamento da eletroerosão (EDM) além dos parâmetros de controle, é exercida pelos materiais empregados para o eletrodo-ferramenta e eletrodo-peça. A erodibilidade de um material é independente de suas propriedades mecânicas, porém a composição química e, com isto, as propriedades físicas, têm influência sobre o processo [7].

Variações na composição do material e na geometria da eletrodo-ferramenta fabricado pode proporcionar diferenças nas taxas de remoção de material (TRM) e na relação de desgaste, o que torna a seleção do material e o projeto da ferramenta importantes para o bom desempenho do processo. Ao se utilizar uma ferramenta que se desgasta demasiadamente, a geometria da superfície da cavidade não terá a exatidão desejada, quando se exigem ótima precisão dimensional e detalhes filigranos.

A usinagem da grafita traz alguns inconvenientes durante o processo, como geração de pó fino de grafita (altamente prejudicial às partes eletrônicas da máquina-

ferramenta), problemas de integridade e qualidade de superfície usinada, problemas de desgaste de ferramental de corte. Todas estas dificuldades tornam-se ainda maiores pois praticamente não existem profissionais e técnicos em usinagem de grafita especificamente, e as informações pertinentes a este processo são ainda reduzidas, tornando assim a usinagem deste material desmotivante. Além destas problemáticas, existem poucas máquinas-ferramenta dedicadas a usinagem de grafita. Assim, a usinagem de grafita em máquinas convencionais ou automáticas não-dedicadas necessita adaptações para o trabalho com este tipo de material, e estas muitas vezes não são realizadas, causando falhas e a deterioração das máquinas em pouco tempo de uso.

Em princípio é possível empregar todos os materiais condutores de eletricidade como material para eletrodos-ferramenta em EDM. A maior frequência de utilização é encontrada na grafita e no cobre eletrolítico [7].

O desgaste relativo do eletrodo-ferramenta de cobre na eletroerosão de aços aumenta com o aumento da corrente de descarga. Na utilização da grafita observa-se um comportamento contrário. Este comportamento antagônico ainda não está suficientemente explicado, porém admite-se que a grafita, em decorrência de sua estrutura e porosidade, é mais receptiva às partículas de carbono existentes no canal de descarga, que se depositam no eletrodo-ferramenta ou difundem para dentro dele (Schumacher *apud* König [7]). Em decorrência disto, a grafita é mais adequada para trabalhos de desbaste com alta corrente de descargas e tempos de erosão longos, ao passo que o cobre é mais adequado para o trabalho de acabamento (tempo de descarga curto, corrente de descarga pequena) [7].

A Figura 1.1, mostra que com a utilização da grafita em condições de desbaste, alcança-se tempo mais reduzido de fabricação em relação ao emprego de eletrodo de cobre eletrolítico. Este fato sugere que a grafita deva sempre ser empregada como eletrodo-ferramenta em processos de desbaste na eletroerosão por descargas elétricas. Porém outros fatores devem ser levados em consideração na escolha do material, como o custo de fabricação do eletrodo e adaptações à erosão do mesmo no processo de eletroerosão.

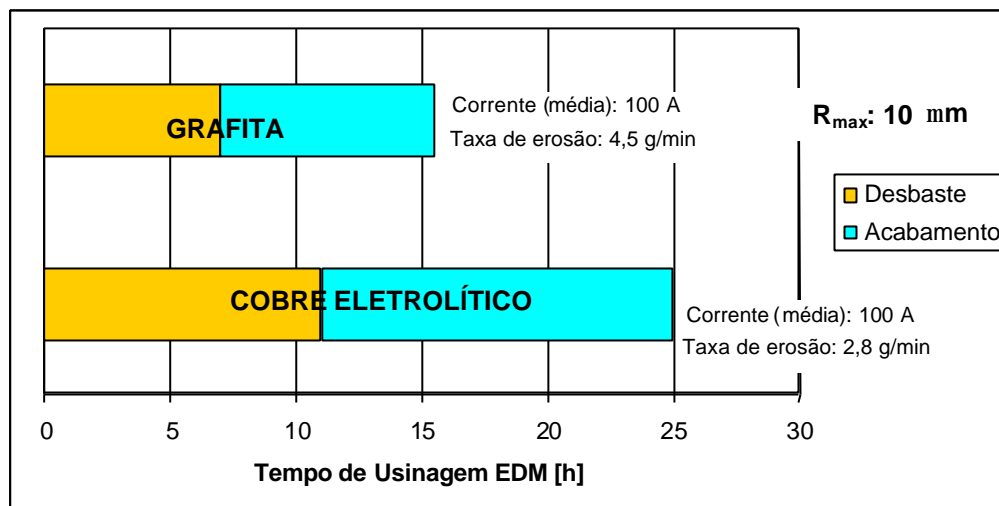


Figura 1.1 - Comparação na utilização da grafita e do cobre, em processo EDM [8].

O material deve ser forte, resistente para resistir a danos pelo manuseio e pelo próprio processo de EDM. O tamanho de partícula é importante para que se possam atingir raios mínimos em cantos e manter tolerâncias estreitas. A dureza da grafita é um fator importante na usinabilidade, já que quanto mais duro o eletrodo, mais predisposição o material terá de lascas, de sobremodo em grafitas com tamanho de grão grande [8].

Devido a dificuldade e falta de informações sobre o processo de usinagem de grafita, o estudo de algumas características do fresamento deste material foi realizado.

Como caminho para a compreensão das características da grafita no seu processo de corte, juntamente com um estado da arte sobre a grafita e suas características e aplicações, foram realizados diferentes ensaios de usinagem. Através dos resultados destes ensaios e demais observações sobre o processo, como geração de pó de grafita e coleta destes resíduos, obteve-se informações significativas e importantes para o fresamento da grafita.

A grafita estudada neste trabalho, quando da sua usinagem em altas velocidades de corte, é a grafita industrial empregada especialmente para a confecção de eletrodos-ferramentas para EDM. A obtenção de informações sobre o comportamento deste material em processos de fresamento de acabamento como direções de corte preferenciais em situações diferentes, informações sobre coleta de pó de grafita, vida de

ferramenta, qualidade de superfície gerada, parâmetros de processo, é o objetivo geral deste trabalho.

Este estudo foi planejado para que os resultados obtidos pudessem ser revertidos em informações técnicas práticas e relevantes para quem trabalha com este tipo de material, e também melhor fundamentar o entendimento do processo.

Este trabalho foi desenvolvido em uma parceria entre LMP (Laboratório de Mecânica de Precisão) da UFSC e o Centro Integrado de Manufatura e Tecnologia (SENAI-CIMATEC), órgão localizado na cidade de Salvador, Bahia. Foi um trabalho de cooperação tecnológica onde a tecnologia em equipamentos do CIMATEC e o conhecimento e experiência no estudo da usinagem do LMP trabalharam juntos. Realizou-se este trabalho também com o objetivo de incentivar e impulsionar o uso da grafita como eletrodo-ferramenta nas ferramentarias em geral, mostrando que a usinagem deste material é viável quando se conhecem os mecanismos envolvidos na sua formação de cavaco.

2 Estado da Arte

2.1 Grafita como Material de Engenharia

Talvez 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 [11].

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 a sua baixa densidade (em média de $1,80 \text{ g/cm}^3$), 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. Atualmente, confeccionam-se também pequenos eletrodos de geometrias reduzidas, onde com a estabilidade a altas temperaturas das novas grafitas com granulometria mais fina leva a um crescente interesse pelo uso do material para eletroerodir pequenas cavidades [4].

Por estas e outras razões baseiam-se novos desenvolvimentos e tendências na área de EDM por penetração com emprego de grafita, e com isso vai crescendo seu crédito como “o material para eletrodo do futuro” [4].

A estrutura da grafita consiste de lâminas de átomos de carbono híbridos do tipo sp^2 , cada lâmina juntando-se às demais por fracas forças de London (antigamente chamadas coletivamente de Forças de *Van der Waals*). Devido à conjugação das duplas ligações através das lâminas, em planos hexagonais separados entre si por aproximadamente $0,335 \text{ nm}$, a grafita é um condutor de eletricidade, muito utilizado como eletrodo inerte em celas galvânicas. As propriedades particularmente favoráveis destes materiais como componentes mecânicos resultam da estrutura da grafita [9, 31]. A grafita é muito mais densa, melhor condutora de eletricidade, um tanto oleosa e menos sensível aos agentes químicos que os carbonos amorfos, por exemplo [2].

Em aplicações como eletrodo de arco para fundição e eletrodo de faísca para eletroerosão, algumas características físico-químicas são desejáveis na grafita [9]:

- 1- Estabilidade e resistência a altas temperaturas (em torno de 2.500°C em atmosferas não-oxidantes);
- 2- Alta resistência a choques térmicos;
- 3- Alta condutividade térmica de sólido;
- 4- Baixo coeficiente de expansão térmica;
- 5- Alta emissividade de radiação;
- 6- Boa condutividade elétrica;
- 7- Alta resistência à compressão;
- 8- Baixa resistência à flexão (em média de 60 MPa);
- 9- Rigidez de sólido, flexibilidade de filamento;
- 10- Alta resistência à erosão;
- 11- Boa usinabilidade em relação às forças de usinagem;
- 12- Baixo atrito, auto-lubrificação;
- 13- Alta resistência a ataque químico e corrosão;
- 14- Alta absorção de gases e vapores;

2.1.1 Propriedades e Características da Grafita Industrial

No Brasil e na Europa são tradicionalmente utilizados eletrodos-ferramenta de cobre eletrolítico, enquanto a grafita é o material preferido nos Estados Unidos para a mesma aplicação. Atualmente, existe uma tendência crescente de utilização de grafita em todo o mundo, pelo fato deste material apresentar certas vantagens em relação ao cobre. Além disso, os fabricantes têm oferecido classes de grafita cada vez melhores e a preços competitivos, o que possibilita a eletroerosão sob regime de acabamento em condições de baixo nível de energia. Entretanto, as indústrias de ferramentaria brasileiras possuem pouco conhecimento sobre a utilização deste material como eletrodo-ferramenta [27].

Algumas considerações podem ser feitas para efeito de comparação entre o cobre e a grafita, como materiais para eletrodo-ferramenta:

- ✓ A grafita tem menor dilatação térmica que o cobre, apresentando deformação mínima durante o processo de eletroerosão. Esta característica tem especial relevância na eletroerosão de cavidades profundas sob condições de desbaste, onde o cobre sofre dilatação térmica volumétrica alta, comprometendo as condições de lavagem das partículas eletroerodidas [46].
- ✓ A baixa densidade da grafita (em torno de $1,8 \text{ g/cm}^3$) permite a confecção de eletrodos de grande porte bem mais leves que aqueles em cobre, o que torna mais fácil o manuseio da ferramenta no chão-de-fábrica. Muitas ferramentarias utilizam a estratégia de não mais segmentar eletrodos de grande porte em vários pequenos eletrodos. Em vez disso, com a utilização de sistemas de CAD/CAM tem sido possível o projeto de um único eletrodo de grande porte, o que em consequência possibilita a redução do tempo de fabricação da ferramenta [47].
- ✓ A grafita é processada por torneamento, fresamento, furação e retificação, contudo apresenta o inconveniente de gerar bastante pó durante o processo de usinagem.
- ✓ O cobre em geral apresenta a vantagem de ter a capacidade de polimento, exigido em algumas superfícies.

Sobre o comportamento da grafita na eletroerosão propriamente dita, algumas características técnicas como tamanho de partícula, consistência microestrutural do material, densidade, resistividade elétrica, dureza e resistência mecânica, influem na escolha da grafita ideal para o objetivo requerido.

2.1.2 Obtenção da Grafita

Existem dois tipos de grafita, as grafitas naturais e as sintéticas. A grafita natural contém habitualmente impurezas que devem ser liberadas. Os carvões amorfos apresentam-se habitualmente sob uma forma dividida e porosa, sendo que sua utilização para fins elétricos exige um trabalho de aglomeração [2].

A grafita sintética é um material inerte e que não contém componentes voláteis. As matérias-primas mais frequentemente utilizadas para a obtenção de grafita sintética 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 fieiras e 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 [2].

Os grãos de carbono encontram-se ligados por coque, e por força de retração que se verifica, obtém-se um carvão homogêneo, compacto e bom condutor de eletricidade [2]. Este carvão é então transformado em grafita (grafitizado) por subsequente tratamento térmico em temperaturas altas (acima de 1.000°C) [8]. Todas as etapas de fabricação e obtenção de grafita industrial estão expostas na Figura 2.1.

Muitos fabricantes oferecem atualmente alguns tratamentos posteriores a fabricação da grafita, para melhorar o desempenho do produto sob certas condições específicas. Estes tratamentos compreendem a impregnação com resinas, inibidores de corrosão ou metais, e também revestimentos para impermeabilização da superfície e prevenção de desgastes.

A densificação também é um dos tratamentos muito utilizados, e consiste no preenchimento dos poros existentes no material com carbono puro, reduzindo assim o tamanho médio de grão e a porosidade aberta e aumentando a densidade.

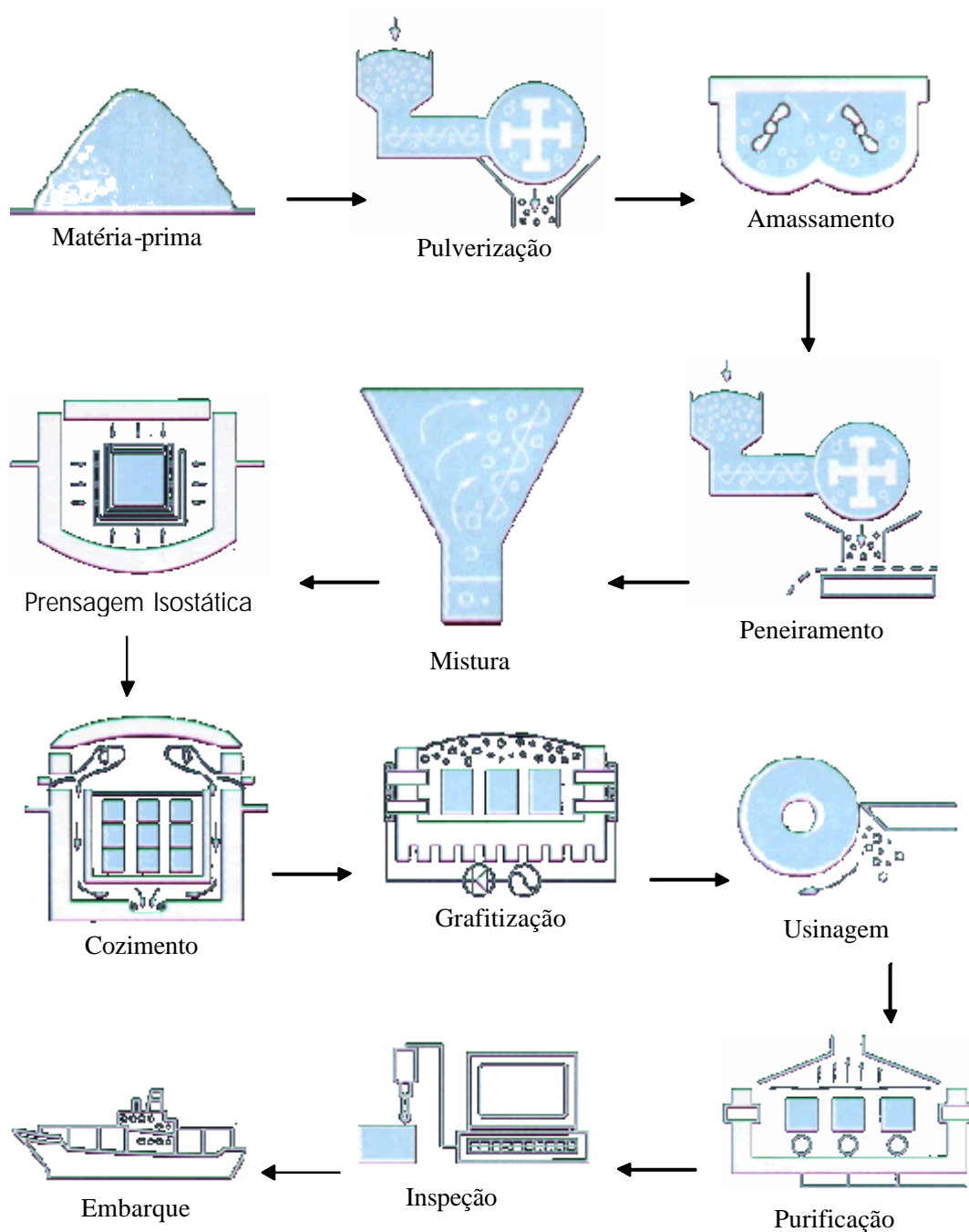


Figura 2.1 - Etapas de fabricação de grafita industrial [48].

2.1.3 Tipos de Grafita

O processo de EDM com eletrodos de grafita tem muitas variáveis envolvidas. Como resultado, classes de grafita de diferentes companhias, até mesmo dentro do mesmo grupo, não são absolutamente idênticas e podem não ter o mesmo desempenho.

A seleção apropriada e o subsequente processamento dos variados materiais ingredientes determinam as propriedades físicas dos materiais de carbono. Quanto ao processamento do material, geralmente o tamanho do lote de material determina a escolha da tecnologia utilizada no processo. Lotes grandes de produto são usualmente moldados em uma matriz, na dimensão requerida, e lotes pequenos são usinados a partir de grandes blocos e tarugos [31].

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 [8].

Atualmente, o mercado oferece classes de grafita com tamanho médio de grão de 20 μm até granulometrias inferiores a 1 μm . O regime de trabalho ao qual o eletrodo estará sujeito no processo de eletroerosão ou seja, desbaste, semi-acabamento ou acabamento, bem como sua geometria, definem a escolha do tamanho médio de grão da grafita.

Grafitas para EDM são classificadas em cinco grupos [8]:

- ✓ Nanofinas (submicrométricas): tem um tamanho típico de grão $< 1 \mu\text{m}$.
- ✓ Ultrafinas: tem um tamanho típico de grão entre 1-5 μm .
- ✓ Superfinas: tem um tamanho típico de grão entre 6-10 μm .
- ✓ Finas: tem um tamanho típico de grão entre 11-20 μm .
- ✓ Médias: grafitas com grãos de tamanho entre 21 e 100 μm .

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 produzida está diretamente relacionada ao tamanho da partícula do material do eletrodo-ferramenta. O preço desta classe de material é elevado, tornando assim os eletrodos confeccionados em grafita mais caros. Classes de grafita com tamanho médio de grão entre 10 e 20 μm normalmente são utilizadas em regime de desbaste, pois quanto maior a classe da grafita, maior a velocidade de erosão. Os preços de mercado são mais acessíveis para estas classes de grafita.

2.2 Fundamentos do Processo de Usinagem

2.2.1 Processo de Usinagem com Ferramenta de Geometria Definida

Quando se inicia o processo de corte, o gume da cunha da ferramenta penetra no material da peça, que se deforma elástica e plasticamente. Após ultrapassar a tensão de cisalhamento máxima do material, este começa a escoar. Em dependência da geometria da cunha de corte, o material deformado passa a formar um cavaco que desliza sobre a face da cunha de corte da ferramenta [16].

A formação do cavaco no processo de usinagem envolve elevadas taxas de deformação e temperatura. O fluxo plástico de material gera tensões locais nas ferramentas, distribuições de temperaturas na interface cavaco-ferramenta e determina as condições do material da peça após a remoção do cavaco. Estas quantidades locais determinam as forças globais na estrutura da máquina-ferramenta, que por sua vez resultam nas suas deformações estáticas e dinâmicas. Além disso, elas determinam a taxa de vários fenômenos físico-químicos que comandam desgaste de ferramenta, como as reações químicas, desgaste abrasivo e difusão. Elas também determinam a potência que deve ser disponibilizada para efeito de remoção de material e, portanto influenciam a quantidade de calor produzida por vários componentes influentes do sistema (Davies *apud* Polli [49]).

Os termos, a denominação e a designação da geometria da cunha, são normalizadas pelas normas DIN 6581 e ISO 3002/1. Na Figura 2.2 é mostrada uma ferramenta de torneamento explicitando superfícies, gumes, chanfros e quinas.

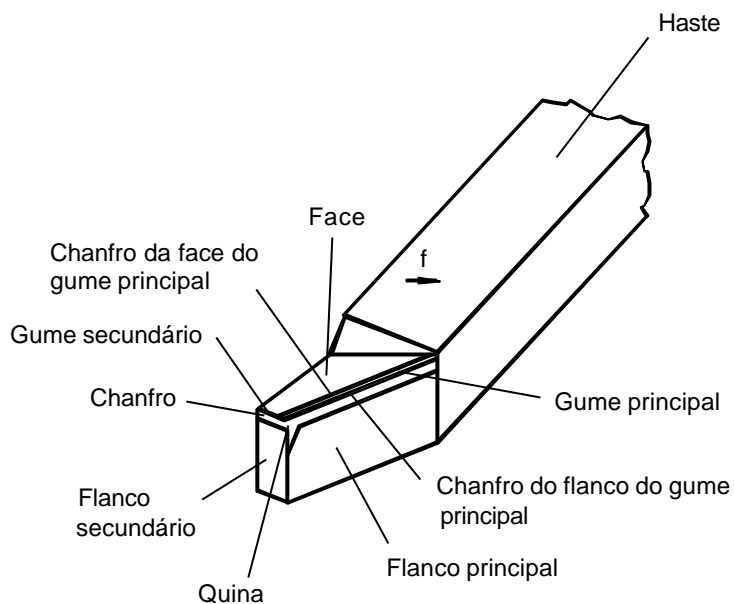


Figura 2.2 - Esquema representativo de uma ferramenta com geometria definida (DIN 6581).

Em todos os processos de usinagem com remoção de cavaco, características do processo como formação de cavaco, saída do cavaco, força de corte, desgaste da ferramenta e o resultado do trabalho são influenciados consideravelmente pela geometria da ferramenta. Em decorrência deste fato é que a geometria da ferramenta deve ser adaptada ao material da peça, ao material da ferramenta e às condições específicas do processo [13, 16].

2.2.2 Geometria da Parte Cortante da Ferramenta de Corte

A parte cortante da ferramenta de corte é descrita por ângulos e raios, conforme mostrado na Figura 2.3:

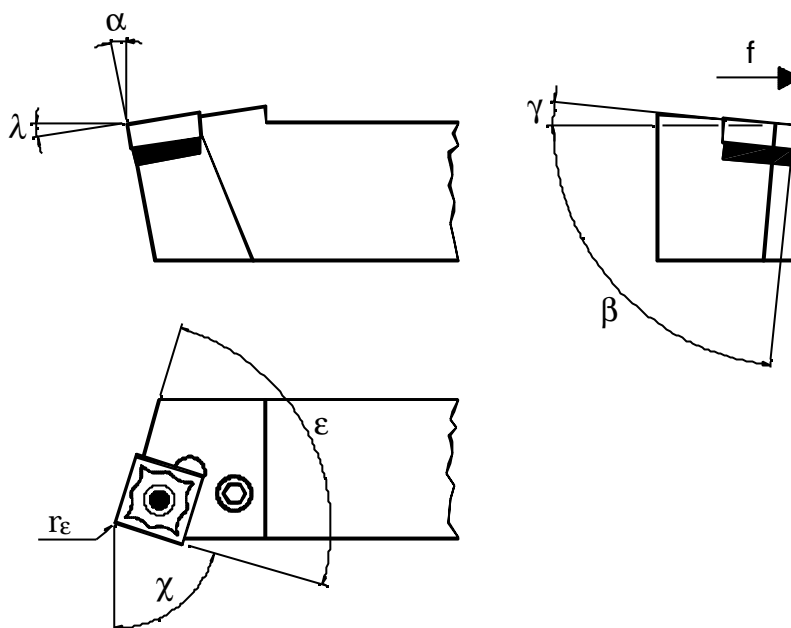


Figura 2.3 - Principais ângulos e raios da ferramenta de corte [44].

Os ângulos da parte cortante servem para determinar a posição e forma do gume, da face e dos flancos [14]. Os ângulos na parte cortante são o de incidência α , cunha β , saída γ , direção do gume ou de posição χ , inclinação lateral λ e de quina ϵ entre outros. Os raios são raio de quina r_ϵ e raio do gume ρ [44].

O ângulo de direção do gume χ é o ângulo entre a superfície de corte e a superfície de trabalho, medido na superfície de referência. Com a variação deste ângulo, tem-se uma maior ou menor largura de usinagem, que por sua vez influencia diretamente na dissipação do calor no gume da ferramenta. A alteração deste ângulo também provoca alterações principalmente nas forças de corte e passiva, esta última causando ainda problemas de vibrações regenerativas sobre a superfície da peça [16].

O ângulo de quina ϵ é o ângulo entre a superfície do gume principal e do gume secundário, medido na superfície de referência. Serve para garantir uma boa estabilidade da ferramenta. Principalmente quando se trata de uma solicitação pesada, este deve ser escolhido o tão grande quanto possível [16].

O ângulo de inclinação lateral λ é o ângulo entre o gume e a superfície de referência, medidos na superfície de corte. Este ângulo possui as funções de controlar a direção de saída do cavaco, proteger a quina da ferramenta contra impactos e atenuar

vibrações. Quanto mais negativo for este ângulo, maiores serão os valores da força passiva [16].

O ângulo de cunha β é o ângulo entre o flanco principal e a face, medido na superfície de medição da cunha. A soma dos ângulos de incidência e de saída diminuído de 90° resulta no ângulo de cunha β . Com a variação deste ângulo, tem-se uma variação na estabilidade da ferramenta [16].

O ângulo de incidência α é o ângulo entre o flanco e a superfície de corte, medido na superfície de medição da cunha. A função do ângulo de incidência é evitar o atrito entre a superfície transitória da peça e o flanco da ferramenta e permitir que o gume penetre no material e corte livremente. Este ângulo também influencia consideravelmente a estabilidade da cunha [13, 14].

O ângulo de saída γ é o ângulo entre a face e a superfície de referência, medido na superfície da cunha. Ele pode ser tanto positivo como negativo. O ângulo de saída é responsável pelo corte do material em questão. O ângulo γ influencia consideravelmente a estabilidade da cunha. Ferramentas demasiadamente positivas podem quebrar devido ao enfraquecimento da cunha. Como vantagens de um ângulo de saída positivo tem-se a diminuição da força de corte e força de avanço, bem como uma considerável melhora na qualidade da superfície da peça [16].

O raio de quina r_ϵ é localizado na interseção do gume principal e secundário. Em conjunto com o avanço ele define a rugosidade cinemática do componente usinado. Este também influencia nas vibrações, estabilidade do gume e forças passivas. O raio de gume ρ define a capacidade de corte e a espessura mínima de usinagem [16].

2.2.3 O Processo de Formação de Cavaco no Corte

A deformação plástica contínua, que se mostra na região de formação de cavaco, pode ser dividida em três regiões, conforme Figura 2.4:

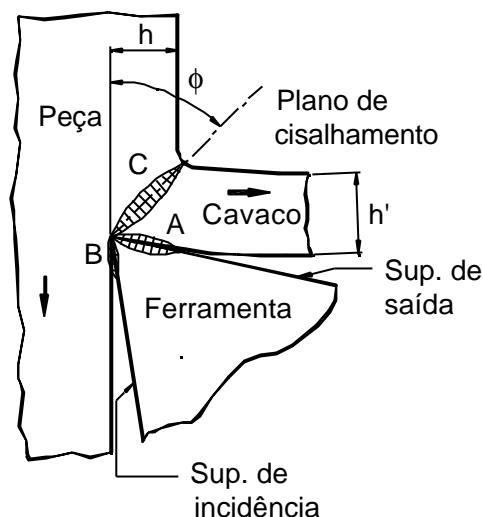


Figura 2.4 - Regiões importantes da raiz do cavaco na usinagem (Shaw *apud* Markus [44]).

A área C estende-se ao longo do plano de cisalhamento e é a região entre o material deformado e o material indeformado. A área A inclui a interface entre o cavaco e a face da ferramenta, enquanto que a área B inclui a superfície acabada ou usinada e a superfície adjacente da ferramenta (flanco). Na primeira região tem-se a maior transformação de energia, enquanto que na segunda tem-se a maior temperatura e na terceira define a rugosidade característica da peça (Kronenberg e Shaw *apud* Markus [44]). A Figura 2.5 mostra a representação esquemática do mecanismo de formação de cavaco.

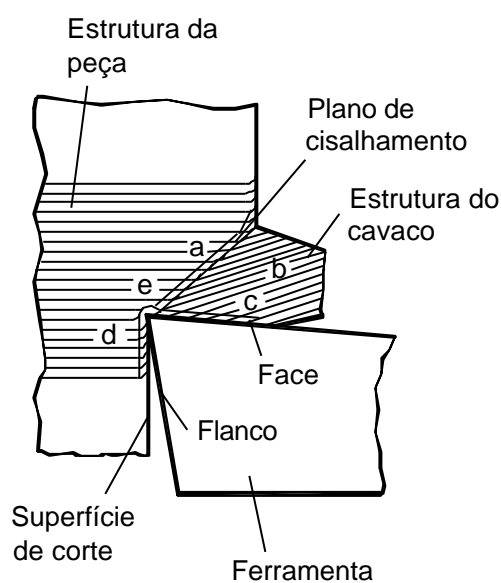


Figura 2.5 - Mecanismo de formação de cavaco [16].

A representação mostra que a deformação plástica contínua, na raiz do cavaco, pode ser dividida em cinco regiões. A configuração estrutural na peça (a) passa por cisalhamento para configuração estrutural do cavaco, em (b). A deformação plástica na região de cisalhamento na usinagem de materiais frágeis pode levar à separação do material na região de cisalhamento. Se o material, no entanto, tem uma capacidade de deformação maior, então a separação ocorrerá imediatamente diante do gume da região (e). A solicitação de tração, simultânea à aplicação de uma pressão vertical sobre a ferramenta em combinação com as temperaturas elevadas, leva a deformações na camada inferior do cavaco (c) e na superfície de corte (d). Durante o deslizamento sobre a superfície da ferramenta, se formam superfícies limites que também sofrem deformações plásticas complementares. Essas regiões de escoamento, que tem uma textura de deformação paralela à face da ferramenta, dão a impressão de escoamento viscoso com grau de deformação extremamente elevado [16].

Na usinagem, através da ação mecânica da ferramenta, uma camada de material é removida da peça e transformada em cavaco. Os cavacos produzidos podem apresentar muitos aspectos distintos, dependendo da profundidade de corte (a_p), da velocidade de avanço (v_f), velocidade de corte (v_c), geometria da ferramenta, material da peça e fluido de corte, entre outros fatores [14]. A forma e o tamanho do cavaco são muito importantes, principalmente para os processos de usinagem (furação, fresamento, torneamento) ou em máquinas-ferramentas onde há pouco espaço para os cavacos ou estes tenham que ser removidos automaticamente (Jawahir *apud* Markus [44]).

Do ponto de vista da tecnologia da usinagem, pode-se classificar as diversas formações de cavacos em quatro tipos básicos: cavaco contínuo, cavaco cisalhado, cavaco em forma de lamela e cavaco arrancado. Os dois primeiros tipos podem vir associados com a formação de um gume postiço [14, 16, 17].

2.2.4 Solicitações Impostas sobre a Ferramenta no Processo de Usinagem

A força de usinagem F , aqui representada para o processo de torneamento (Figura 2.6), pode ser desmembrada em suas componentes: força de corte F_c , força de avanço F_f e força passiva F_p .

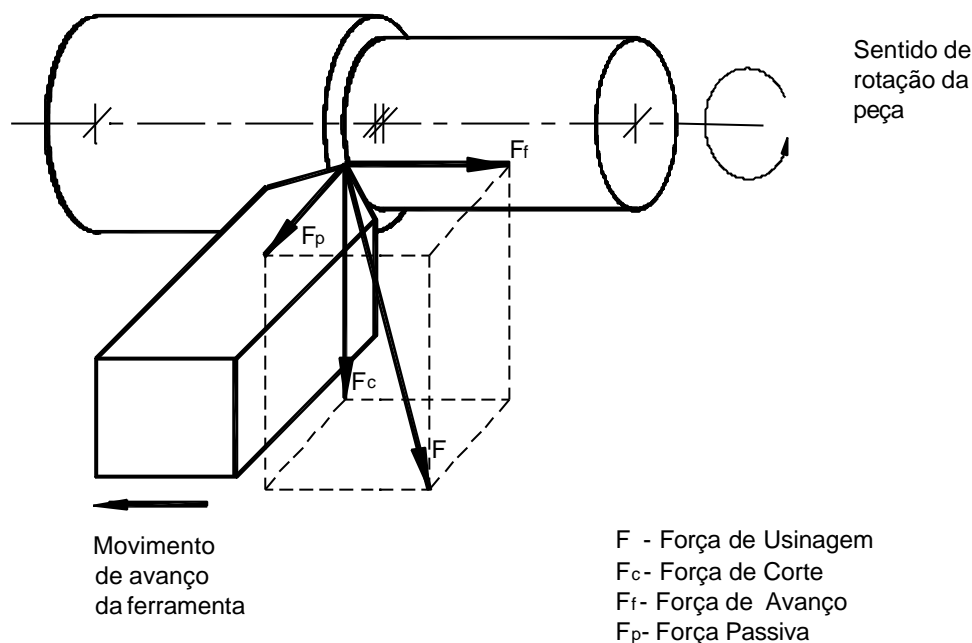


Figura 2.6 – Forças de usinagem e suas componentes para o torneamento [16].

A componente da força de usinagem no sentido da velocidade de corte é denominada força de corte, no sentido da velocidade de avanço de força de avanço e a componente normal a estas duas, de força passiva.

As forças atuantes na ferramenta de corte são influenciadas pelos parâmetros envolvidos no processo de formação de cavaco, tais como material da peça, material da ferramenta, geometria da ferramenta, velocidade, avanço e profundidade de corte [16].

O comportamento da força de corte, força de avanço e da força passiva com relação à variação do ângulo de direção do gume χ , é decorrente da posição geométrica da quina em relação ao eixo de rotação da peça, conforme mostra a Figura 2.7, onde com maiores ângulos de direção do gume as componentes da força de usinagem aumentam na direção do avanço e têm seu máximo quando $\chi = 90^\circ$ [41].

Se o ângulo de direção do gume for aumentado, a espessura do cavaco h aumenta à mesma proporção que a largura do cavaco b diminui (Figura 2.7). Já que a força de corte F_c é proporcional à profundidade de corte a_p (equivalente à largura de cavaco b), ela aumenta de forma inversamente proporcional ao avanço (equivalente à espessura do cavaco h), resultando das duas variações uma leve redução de F_c com aumento de χ [41].

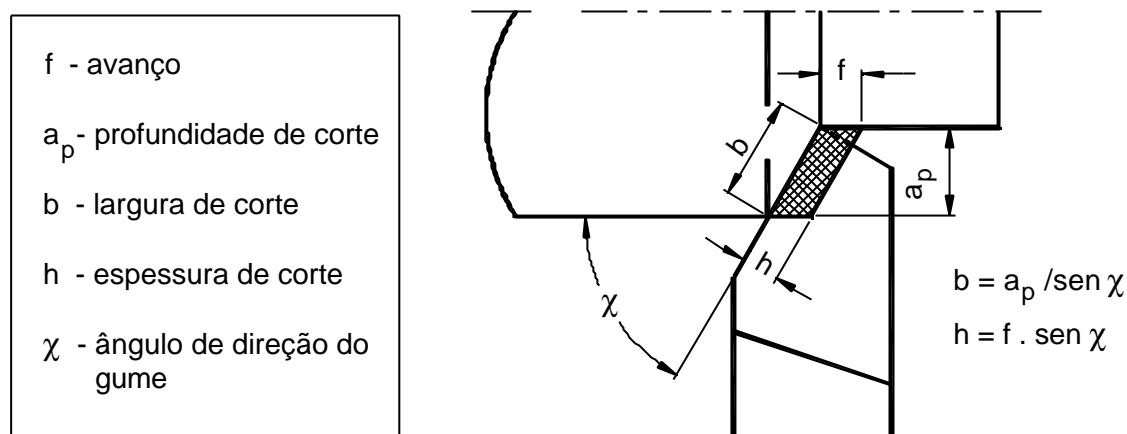


Figura 2.7 – Posição geométrica da quina e suas grandezas em relação ao eixo de rotação da peça [41].

As componentes da força de usinagem obedecem à equação de Kienzle, que relaciona as características do material, a seção de corte e a componente da força de usinagem correspondente. Para a força de corte F_c tem-se:

$$\frac{F_c}{b} = k_{c1.1} \cdot h^{(1-m_c)}$$

A força específica de corte $k_{c1.1}$ indica a força de corte que é necessária para usinar um cavaco com largura de usinagem $b = 1$ mm e a espessura de usinagem $h = 1$ mm. O expoente $(1 - m_c)$ indica a inclinação da reta $F_c/b = f(h)$, no sistema bilogarítmico. Os valores de $k_{c1.1}$ e $(1 - m_c)$ determinam a influência do material da peça sobre a força de corte [44].

Grandeza e direção da força de usinagem são influenciadas fortemente pelas condições e geometrias de corte utilizadas. Na Figura 2.8 é apresentada qualitativamente a

dependência das componentes da força de usinagem F_c , F_f e F_p em função do avanço f , da velocidade de corte v_c , da profundidade de corte a_p e do ângulo de direção do gume χ no sistema de coordenadas lineares [41].

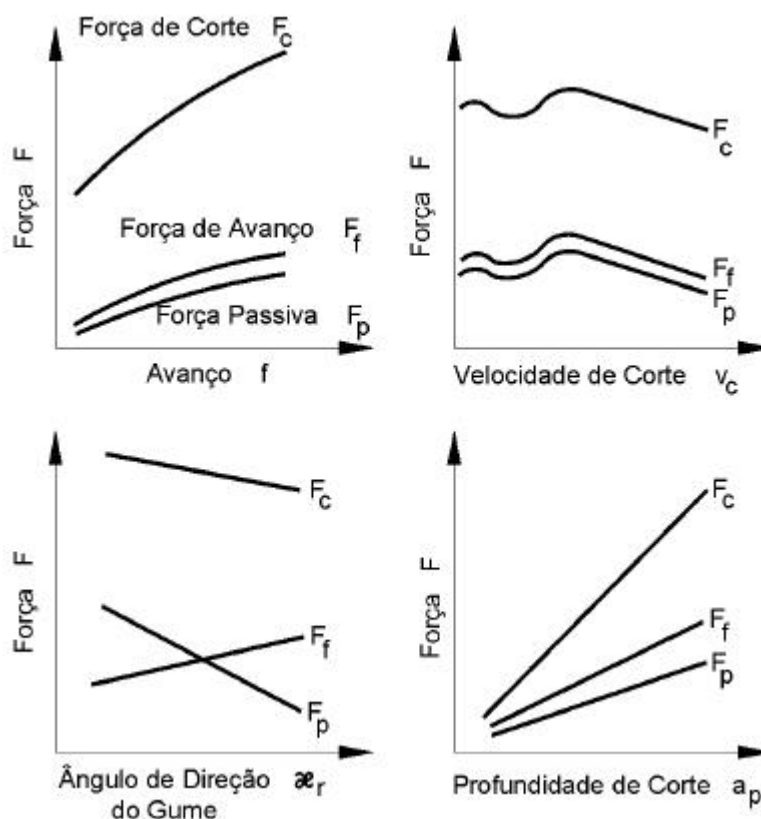


Figura 2.8 – Dependência das componentes das forças de usinagem em relação às variáveis mais importantes [16].

A redução da força com o aumento da velocidade de corte deve-se à redução da resistência do material a altas temperaturas. As componentes da força de usinagem aumentam proporcionalmente com a profundidade de corte a_p . Entretanto, isto vale somente se a profundidade de corte for maior que o raio de quina da ferramenta [41].

A força de corte e a força passiva apresentam uma redução, ao passo que a força de avanço apresenta um aumento para uma variação do ângulo de direção do gume de 30° a 90° . Para um aumento sucessivo do ângulo de direção do gume, a força de corte tende a aumentar novamente, a força de avanço diminuir e a força passiva se torna inclusive negativa [17].

2.2.5 Avarias e Desgastes de Ferramentas de Corte

A ferramenta de corte é solicitada térmica e mecanicamente durante a usinagem. Como nem o material da peça, nem o material da ferramenta são homogêneos, uma série de avarias e desgastes de naturezas distintas podem ser observados na ferramenta de corte ao longo de sua utilização (Figura 2.9). Para evitar que ocorra o colapso total da ferramenta é fundamental que sejam estipulados limites para as avarias e para os desgastes de flanco e cratera [16].

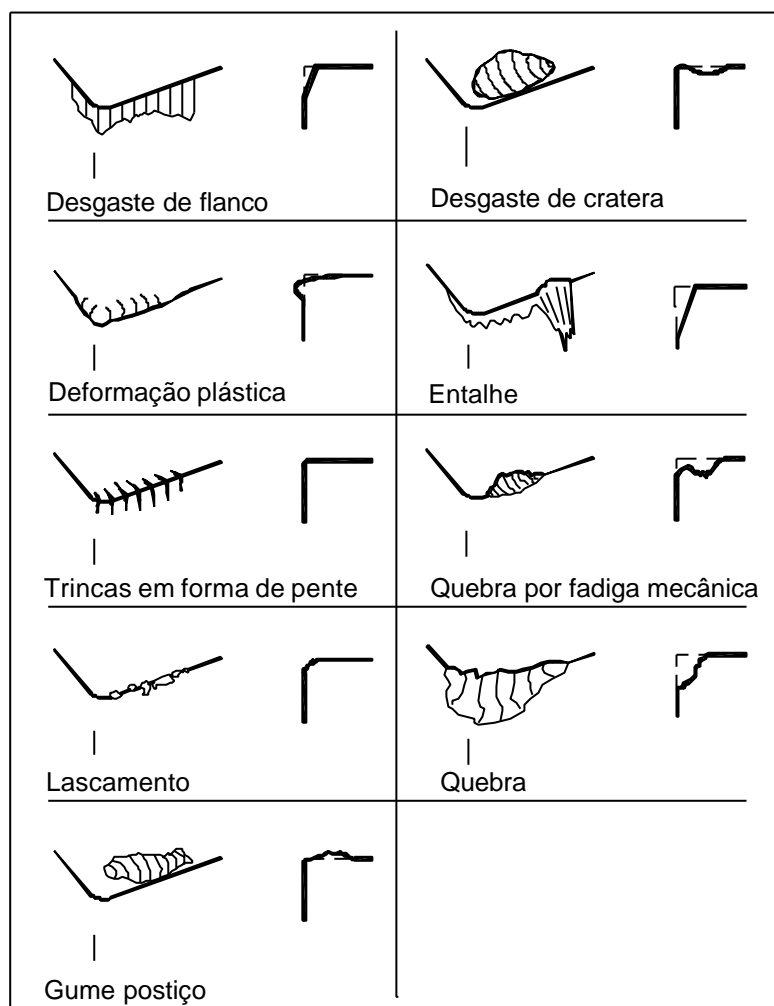


Figura 2.9 - Tipos de avarias e desgaste nas ferramentas de corte (Sandvik *apud* Markus [44]).

Lascamento: é resultante da quebra de pequenos fragmentos do gume durante a operação de corte. São causas do lascamento o limite de resistência do material da ferramenta excedido em áreas localizadas devido a vibrações, variações microestruturais na peça ou a quebra do gume postiço (Sandvik *apud* Markus [44]). Forças de corte excessivas muitas vezes levam a micro e macrolascamentos do gume ou da quina, principalmente quando os ângulos de cunha ou de quina da ferramenta são muito pequenos [16].

Fissuras transversais, longitudinais ou em forma de pente: em cortes interrompidos, o gume da ferramenta é submetido a solicitações térmicas e mecânicas alternadas. Estas solicitações alternadas em conjunto com as tensões de tração residuais na superfície de ferramenta, durante o ciclo de resfriamento, podem levar ao surgimento de fissuras transversais e longitudinais ao gume, principalmente em materiais de ferramenta com pouca tenacidade [16].

Deformação plástica do gume: ocorre quando o material da ferramenta amolece devido às altas temperaturas, e escoar sujeitado pelas forças de usinagem. Estas deformações plásticas também ocorrem em metais-duros e Cermets, entretanto sob maiores temperaturas e esforços do que nas ferramentas de aço rápido e aço ferramenta. Metais-duros tendem a maiores deformações quanto maior for o teor de ligante, especialmente cobalto [41].

Desgaste de entalhe: ocorre na região de interface entre o contato peça/ferramenta/cavaco, no lado exposto da superfície de corte. A formação do entalhe é resultado da ação das rebarbas produzidas nas bordas do cavaco, as quais apresentam uma taxa de encruamento maior que na parte central do cavaco, tornando-se uma região com dureza mais elevada, envolvendo um mecanismo de aderência e arrancamento. Na região de formação de entalhe a ferramenta de corte também é submetida à ação oxidante da atmosfera. O aumento progressivo do entalhe pode levar à quebra da ferramenta de corte bem, como a um pior acabamento superficial [16].

Desgaste de flanco e cratera: as formas de desgaste mais regulares e previsíveis são o desgaste de flanco e de cratera. Em decorrência disto, procura-se estabelecer condições de corte, na usinagem de metais, onde estas formas de desgastes, principalmente o desgaste de flanco, são dominantes sobre o fim de vida da ferramenta de corte. No flanco da ferramenta, onde ocorre o desgaste de flanco, são medidas a largura média do desgaste VB e a largura máxima da marca de desgaste VB_{\max} . Nem sempre a marca de desgaste é muito nítida, devido a mudanças de cor ou oxidações que ocorrem no flanco, nas regiões limites de contato. Além disso, a presença eventual de entalhes dificulta a interpretação precisa da marca de desgaste de flanco [16]. As grandezas de desgaste avaliadas são representadas esquematicamente na Figura 2.10.

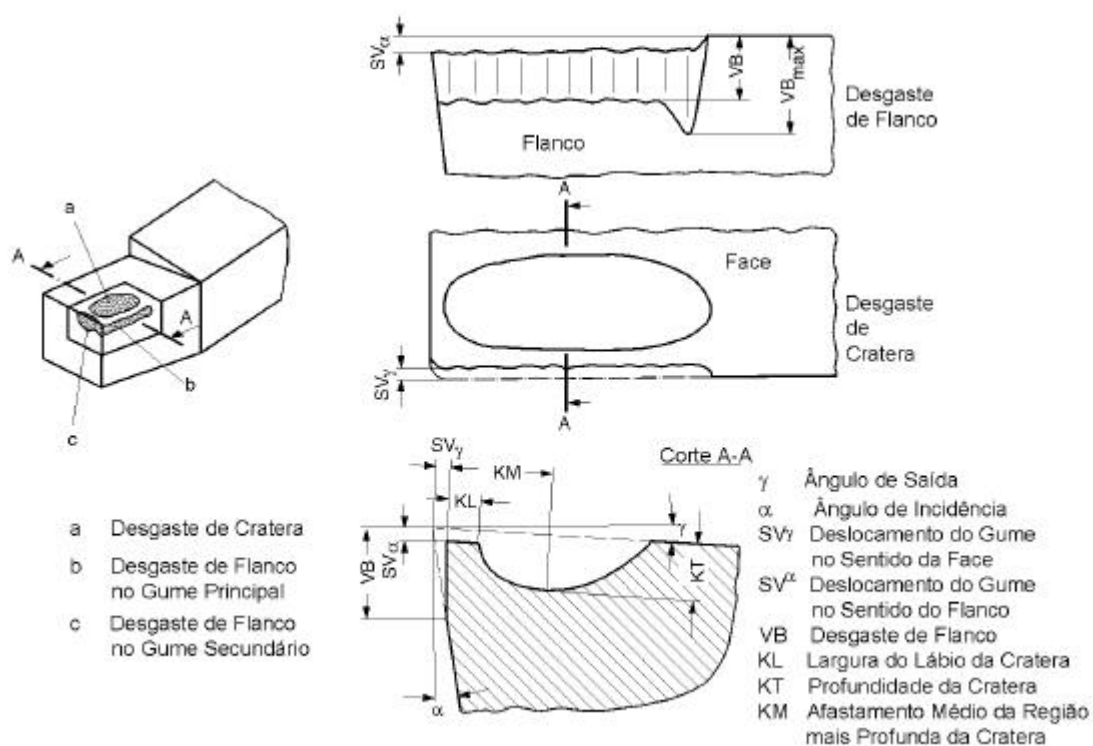


Figura 2.10 - Formas de desgastes e grandezas a serem medidas na cunha de corte [16].

2.2.6 Mecanismos de Desgaste em Ferramentas de Corte

Em decorrência das solicitações térmicas e mecânicas elevadas, o desgaste da ferramenta, de uma forma geral, é relativamente rápido. Diversos mecanismos de

desgaste em geral agem simultaneamente, de forma que tanto sua causa quanto seu efeito dificilmente podem ser distinguidos entre si [16].

O mecanismo de abrasão ocorre em toda a faixa de temperatura a qual é submetida uma ferramenta de corte. A adesão se limita a velocidades de corte baixas, ao passo que mecanismos de difusão e oxidação só ocorrem de forma acentuada para velocidades de corte elevadas, conforme mostra Figura 2.11 [16].

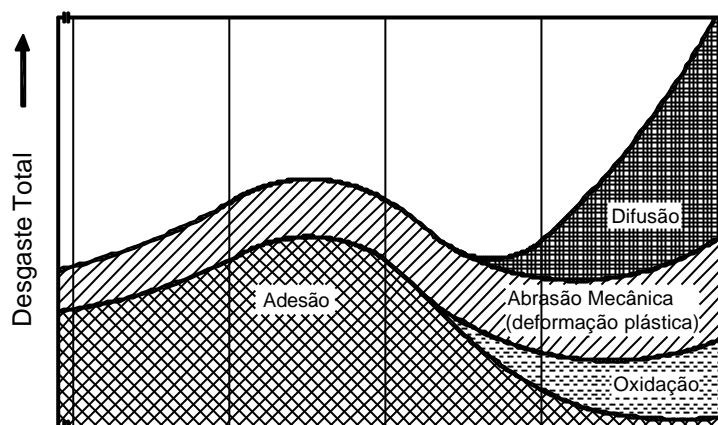


Figura 2.11 - Causas do desgaste na usinagem [16].

Adesão: para ocorrer adesão é necessário que haja afinidade entre o material da peça e o material da ferramenta. Além disto, a temperatura, o tempo e a pressão de contato devem estar situados em uma faixa de valores adequados. Para materiais que apresentam um encruamento acentuado, a adesão leva à formação do gume postiço [13, 16].

Abrasão mecânica: ocorre devido à presença de partículas duras no material da peça. O cisalhamento de partes do gume postiço e sua extrusão pela interface superfície de corte/flanco levam a um desgaste mais acentuado [16].

Difusão: no estado sólido, consiste na transferência de átomos pertencentes à rede cristalina de um material para a rede cristalina de outro material, constituída de elementos que apresentam afinidade entre si. Quanto maior for a afinidade, a temperatura de contato, o tempo de contato e o nível de agitação atômica, maior será a atividade de difusão entre a ferramenta e o cavaco [13, 17].

Oxidação: após o corte do material, muitas vezes são observadas cores de revenimento na região de contato entre o cavaco e a ferramenta, que são provocadas pela oxidação da ferramenta. Esta só ocorre se a temperatura for suficientemente elevada e se houver a presença de oxigênio na região aquecida. Na usinagem do aço com ferramenta de metal-duro, para temperaturas de corte acima de 800°C, o mecanismo de oxidação ocorre de forma mais intensa [13, 16].

Solicitações mecânicas e térmicas: danificações do gume como microquebras, fissuras transversais e longitudinais, bem como deformação plástica, advém de solicitações térmicas e mecânicas excessivas [41].

2.2.7 Vida de Ferramenta

Denomina-se vida de uma ferramenta o tempo que a mesma trabalha efetivamente (deduzido os tempos passivos), até perder a sua capacidade de corte, dentro de um critério previamente estabelecido [17].

As grandezas avaliadas para definir a vida da ferramenta podem ser o tempo de corte, o volume de material cortado ou número de peças fabricadas. O fim da vida é detectável quando ocorre mudança em uma ou mais características do processo. Estas podem estar correlacionadas com mudanças no ruído, no acabamento superficial, na forma de cavaco, vibrações entre a peça e ferramenta, dentre outros (Micheletti *apud* Markus [44]).

Quando se deseja determinar as curvas de vida de uma ferramenta para um determinado material, com uma precisão razoável, deve-se recorrer aos ensaios de usinagem de longa duração. Nestes ensaios, o gume da ferramenta trabalha em condições constantes de corte, sendo utilizado um critério de fim de vida de desgaste previamente fixado. A definição deste critério de desgaste exige que se conheça a sua forma e os mecanismos que regem seu surgimento [17].

2.3 Usinagem por Fresamento

2.3.1 Processo de Fresamento

A fresadora, ou máquina de fresar, é a máquina cuja ferramenta possui movimento de rotação e que permite movimentar a peça em um, dois, três ou mais eixos (lineares ou giratórios). Sendo assim, tem-se uma máquina elaborada para execução facilitada de peças prismáticas, ao contrário do torno, que executa principalmente peças rotacionais (perfil de revolução).

O processo de usinagem por fresamento é um dos mais universais conhecidos, possuindo grande variação quanto ao tipo de máquina utilizado, movimento da peça e tipos de ferramentas. As aplicações freqüentes do processo são a obtenção de superfícies planas, rasgos, ranhuras, perfis, contornos, cavidades e roscas, entre outros. O movimento relativo pode ser resultante apenas da movimentação da ferramenta sobre a peça, ou ainda, ser resultante de uma combinação de movimentos de peça e ferramenta. Contudo, como característica do processo, tem-se a velocidade de avanço da peça bem inferior à velocidade de rotação da ferramenta. Como vantagens gerais do processo de fresamento podem-se citar as altas taxas de remoção obtidas e a possibilidade de obtenção de superfícies de elevada qualidade e complexidade [13, 15, 16].

O processo básico de formação de cavaco no fresamento é similar aos outros processos de usinagem, onde o gume afiado da fresa penetra na peça removendo uma camada de material. Praticamente toda a operação de fresamento consiste em corte interrompido, onde cada dente ou inserto atua num tempo igual ou inferior à metade do tempo necessário para a ferramenta completar uma revolução. Neste processo, a espessura do cavaco produzido pelo gume varia constantemente [25].

Em todas as variações de processos de fresamento os gumes da ferramenta não estão constantemente em ação, como ocorre, por exemplo, em processos como o torneamento e a furação. O que ocorre geralmente é que a cada rotação da ferramenta os gumes têm pelo menos uma interrupção de corte, ou seja, cada gume remove da peça uma porção individual de material na forma de pequenos cavacos. Tal situação gera, em cada gume da ferramenta, uma solicitação cíclica de caráter mecânico e térmico, sendo

de primordial influência sobre o comportamento de desgaste da ferramenta. Ainda como conseqüência do tipo de movimento relativo existente entre peça e ferramenta, tem-se durante o corte uma espessura de cavaco variável. A espessura de usinagem h varia de acordo com o ângulo de contato ϕ , tendo-se para um ângulo de contato $\phi=90^\circ$ (gume na mesma direção e sentido que o avanço) a máxima espessura de usinagem (Figura 2.12). Faz-se ainda necessário para a descrição completa da condição de usinagem no fresamento, além dos parâmetros fornecidos, por exemplo, no torneamento, o diâmetro da fresa, o número de dentes e seu ângulo de contato ϕ , definido pelo ângulo de contato na entrada ϕ_e e na saída ϕ_a , que fornecem a parte da fresa que está de fato atuando [16].

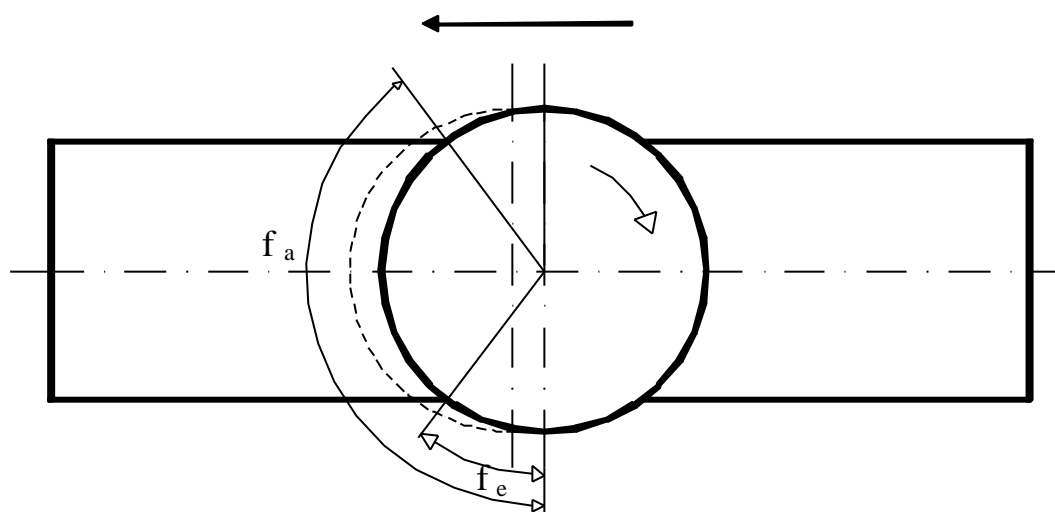


Figura 2.12 - Condição de contato no fresamento.

De acordo com a direção de corte e de avanço pode-se distinguir dois tipos de fresamento: o concordante e o discordante. No fresamento concordante, os movimentos de corte e de avanço têm o mesmo sentido, iniciando-se o corte com espessura máxima de cavaco. No fresamento discordante a espessura inicial de corte é teoricamente zero. Assim, no início do corte não há uma remoção nítida de cavaco, mas apenas o esmagamento do material da peça e o atrito entre o gume da ferramenta e o material da peça. De acordo com a posição de ferramenta em relação à peça (no caso do eixo da ferramenta interceptar a peça) o processo assume uma porção concordante e outra discordante, conforme Figura 2.13. Tal característica observa-se freqüentemente no fresamento frontal e de topo [15, 16].

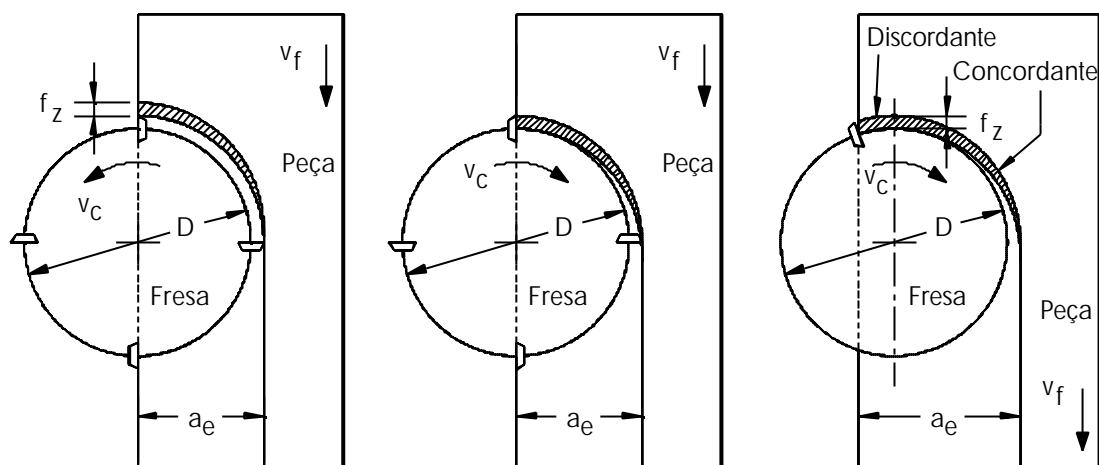


Figura 2.13 - Fresamento discordante, concordante e combinado [20].

Algumas das principais vantagens do fresamento concordante em relação à variação discordante do processo são que a resultante da força de corte empurra a peça contra sua fixação na mesa da máquina, minimizando a possibilidade de vibrações. Há um menor desgaste e, por conseqüência, maior vida da ferramenta, melhor qualidade superficial obtida e menor potência e força de avanço.

Apesar das vantagens que o fresamento concordante possui, há situações nas quais não é possível utilizá-lo como, por exemplo, quando existem folgas no fuso da mesa da máquina-ferramenta ou quando a superfície da peça possui resíduos de areia de fundição, a peça tenha sido fabricada por forjamento ou for muito irregular (Drozda *et al apud* Macedo [18]).

2.3.2 Fresamento de Topo

Dentre as possíveis variações do processo de fresamento, uma das que possui maior emprego nos setores de ferramentaria atualmente é o fresamento de topo. O processo é utilizado na produção de ranhuras, cavidades, rebaiços, gravações, rasgos e na matrizaria, aonde vem ganhando espaço e substituindo processos tradicionalmente empregados, graças a sua maior produtividade [13, 15]. Tal evolução se dá principalmente devido ao desenvolvimento de máquinas-ferramentas com maior rigidez e

materiais de ferramenta mais resistentes ao desgaste, aliados ao desenvolvimento tecnológico do fresamento empregando elevadas velocidades de corte.

Em função do campo de aplicação, por exemplo, em ranhuras profundas em matrizes, as fresas de topo muitas vezes são configuradas com elevado índice de esbelteza ($L/D > 5-10$), já que, dependendo das condições de engajamento e de contato, podem surgir vibrações regenerativas que aliadas às deflexões da ferramenta levam a erros de forma e dimensionais nas peças. Dependendo ainda da combinação de corte utilizada, a ferramenta pode ser puxada da fixação na máquina (mesmo sentido de rotação e da hélice) ou forçada em direção a esta (sentido de rotação e de hélice contrários). Esta última combinação é usada preferencialmente no fresamento de contornos, onde somente a parte periférica da fresa atua [13, 15].

As fresas de topo possuem gumes tanto em sua periferia quanto na sua face, cortando, portanto nessas duas regiões. Estas fresas podem ter corte à direita ou à esquerda, com ranhuras em hélice também nos dois sentidos. Podem ser construídas com topo simples ou duplo, haste e corpo cilíndricos ou cônicos, diâmetros diversos, um número variável de dentes (3 a 10 segundo DIN 844) e de canais, podendo ser retos ou helicoidais. O topo pode ser reto, esférico ou ainda toroidal. A Figura 2.14 apresenta alguns tipos de fresas de topo disponíveis.

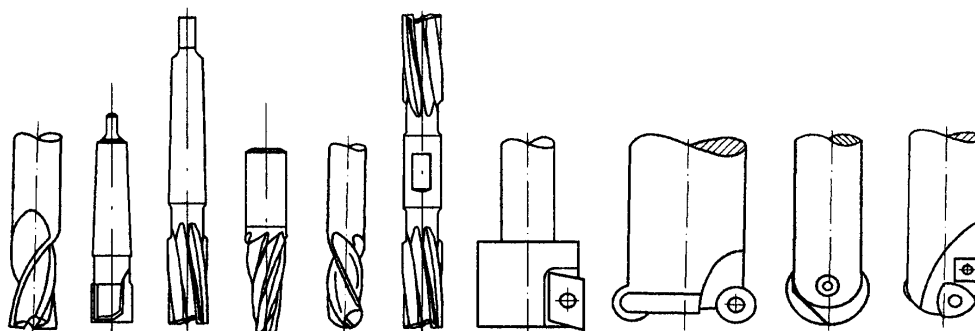


Figura 2.14- Tipos de fresas de topo [18].

2.3.3 Fresamento HSC

A usinagem HSC (*High Speed Cutting*) é um processo de usinagem que se caracteriza por um aumento da velocidade de avanço, rotação e desempenho dinâmico. Este processo tem os seguintes benefícios e campos de aplicação [20]:

- ✓ Com o aumento da velocidade de corte acima de uma velocidade crítica tem-se uma substancial diminuição da força de usinagem. Este fato permite aumentar o avanço por dente, mantendo a solitação da ferramenta, resultando em um considerável aumento de produção e minimizando os procedimentos de retrabalho manual;
- ✓ Para uma mesma capacidade de corte instalada, as forças de corte na fabricação podem ser reduzidas com um aumento da velocidade, desde que as larguras de corte sejam reduzidas;
- ✓ Executar a usinagem em uma faixa de vibrações não-crítica [23].

A HSC não se fundamenta apenas, como regra absoluta, na seleção de um único nível de velocidade de corte considerado ideal, mas também depende do material e do processo envolvidos. É comum também definir alta velocidade como uma faixa que excede claramente os dados de corte em geral praticados, os quais atingem os limites das máquinas-ferramentas ou das ferramentas. Assim, no fresamento de metais de baixo peso específico, como o alumínio, por exemplo, a faixa HSC é bem acima de $v_c = 1.000$ m/min; na furação a partir de 100 m/min; e no rosqueamento com machos já se pode referir a ela a partir de $v_c = 50$ m/min [22].

Na *High Speed Cutting* substitui-se um processo de poucos passes de usinagem, lentos e pesados por muitos passes rápidos e leves, o que – combinado com as altas velocidades de corte – acarreta forças de corte pequenas. Além dos benefícios mais importantes do processo HSC, estão aqui listados mais alguns:

- ✓ Custos de fabricação reduzidos devido a ciclos totais de produção mais rápidos;
- ✓ Altas taxas de remoção de material;
- ✓ Menor aquecimento da peça, especialmente no fresamento.

Embora a tecnologia HSC (algumas fontes bibliográficas tratam como HSM, *High Speed Machining*) ainda esteja em desenvolvimento, já oferece inúmeras vantagens e se apresenta como uma alternativa valiosa para as indústrias, tornando-as mais competitivas, atingindo as seguintes metas [24]:

- ✓ Redução dos custos;
- ✓ Redução dos tempos de fabricação e, conseqüentemente, do *lead time*;
- ✓ Melhoria da qualidade dos componentes produzidos;
- ✓ Redução nas forças de corte.

Entre suas desvantagens, a *High Speed Cutting* apresenta basicamente o alto custo de investimento no equipamento, bem como do ferramental de corte e de fixação. Apesar do investimento inicial ser elevado, se comparado com métodos convencionais, contudo o custo final de um molde, matriz, eletrodo ou outro produto produzido por este processo é normalmente justificável [24].

Mas mais importante do que o aumento da velocidade de corte é o aumento da taxa de avanço. Portanto, especialmente no campo da manufatura de moldes e matrizes utilizando diâmetros pequenos de ferramentas para a usinagem de superfícies esculpidas (*freeform*), as altas frequências de rotação do fuso em combinação com taxas de avanço elevadas são uma característica mais precisa para o HSC, em comparação com a usinagem convencional [23].

O fundamental para as aplicações da usinagem de alta velocidade em processos de fresamento é que as profundidades de corte axial e radial (a_e e a_p), e a espessura média de cavaco (h_m), sejam mantidas baixas comparadas com a usinagem convencional. As forças de corte, bem como as taxas de remoção de material são consideravelmente menores que na usinagem convencional. As exceções são na usinagem de alumínio e outros materiais não-ferrosos [21].

A elevada dinâmica do processo HSC provoca zonas de baixa estabilidade na ferramenta de corte. Desse modo é potencializada a necessidade de uma etapa de pré-acabamento para uniformização dos volumes de corte, e a escolha de estratégias de corte adequadas à geometria e ao material da peça e da ferramenta de corte [29].

Existem muitos fatores que interferem em um processo de usinagem, o que no caso de altíssimas velocidades se torna ainda mais complexo (Figura 2.15). *High Speed Cutting*

é, na verdade, uma tecnologia não-convencional onde fatores como máquina, ferramenta de corte, material e a forma da peça a ser usinada, além do próprio processo a ser elaborado, interagem com o objetivo de se obter resultados específicos nas operações de usinagem, porém de maneira muito mais rápida [24].

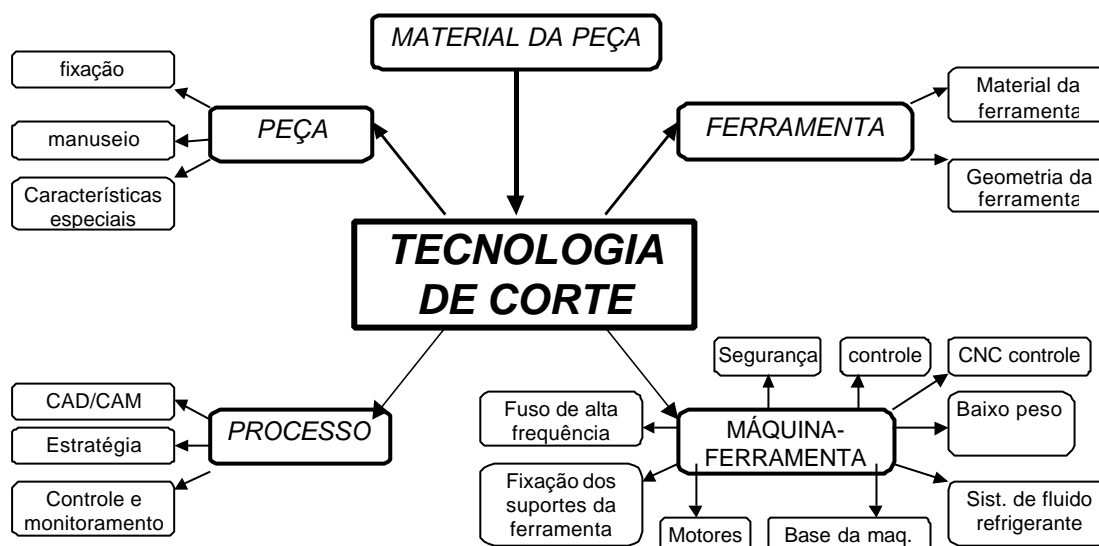


Figura 2.15 - Fatores influentes sobre a tecnologia de corte HSC.

Atualmente, muitos fabricantes mundiais de máquinas-ferramentas para usinagem HSC estão investindo na produção de máquinas específicas para a usinagem de grafita. Máquinas especialmente projetadas para este fim têm a região de corte encapsulada, equipamento para exaustão e coleta das partículas de grafita advindas do corte (cavacos) e proteção especial para as guias, rolamentos e comandos eletrônicos.

2.4 Fresamento de Grafita

O mecanismo de remoção de cavaco em materiais policristalinos é bastante complexo, visto que os principais fatores de influência como por exemplo, os contornos de grão, a distribuição dos grãos de diferentes tamanhos e a anisotropia das propriedades mecânicas destes materiais têm uma grande influência sobre o resultado do trabalho [45].

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 frágil 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 é resultante da necessidade de menor energia para a formação e propagação de trincas que para ocorrer deformação plástica.

Na usinagem da grafita, recomenda-se a utilização de elevada velocidade de corte v_c , juntamente com elevada velocidade de avanço v_f . Se o avanço por dente f_z não for suficientemente alto, a grafita tende a atuar quase como um agente de polimento na ferramenta. Porém, não se deve sobrecarregar a ferramenta com um avanço que produza pressões excessivas na ferramenta [12].

2.4.1 Problemas Gerados na Usinagem de Grafita

Na usinagem de grafita, a força de usinagem é pequena. Em decorrência disto, não ocorrem problemas como forças de corte e tensões térmicas, sendo estas as principais vantagens apresentadas na técnica de produção de peças em grafita.

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 tem tamanho de partículas muito pequenos, que penetra nas pequenas brechas e aberturas da máquina-ferramenta. Além disto, o pó deposita-se sobre o barramento e penetra no fuso de esferas recirculantes, o que traz danificações a estes componentes [10].

Também vale salientar que a grafita é eletricamente condutora e, quando partículas destas penetram no comando e acionamentos do motor, podem provocar curtos-circuitos elétricos intermitentes que levam à destruição na parte eletrônica [10].

Esta problemática é, de certa maneira, solucionável com a utilização de equipamentos de aspiração eficientes, direcionados diretamente para a zona de corte, evitando assim a grande dispersão do pó pela máquina.

Além do local de trabalho manter-se sempre limpo, motivando os funcionários, e protegendo os componentes elétricos e eletrônicos, como os comandos, com a

diminuição do teor de poeira de grafita, muitos inconvenientes podem ser evitados, como a impregnação da pele pelo pó de grafita, que mesmo depois de repetidas lavagens não é totalmente removido.

O melhor ambiente para usinar eletrodos de grafita é quando o pó de grafita é aspirado de forma contínua. Há variações na forma de coleta dos particulados, como a utilização de bicos de aspiração na mesa, aspiração no fuso e aspiradores no ambiente (Figura 2.16) [40].

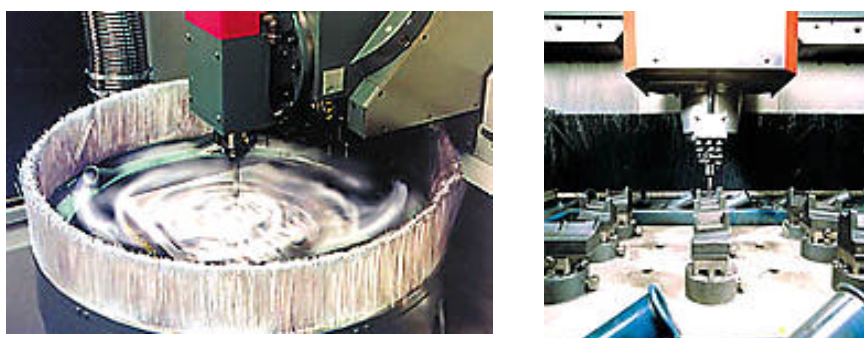


Figura 2.16 – Exemplos de aspiração com bicos instalados na mesa da máquina.

Os aparelhos de aspiração utilizados normalmente possuem filtros, com grau de separação de 99,9%. Também possuem como reservatório coletor um saco plástico com o fundo arredondado, o que possibilita esvaziá-lo praticamente sem dispersão de pó. O pó de grafita pode ser descartado junto com o lixo comum, porém é também utilizado por fabricantes de cimento.

Um dos problemas também originados no fresamento de grafita para confecção de eletrodos é o surgimento de quebras na peça, causadas pelo processo de corte. Estas podem ser evitadas com a adoção de estratégias adequadas de movimento na usinagem.

2.4.2 Formação de Cavaco no Fresamento de Grafita

Segundo König *apud* Schroeter e Weingaertner [41], no início do processo de corte de metais, a cunha da ferramenta penetra no material da peça, que se deforma elástica e plasticamente. Após ultrapassar a tensão de cisalhamento máxima do material

este começa a escoar. Devido à forma da cunha de corte o material escoado toma a forma de cavaco, que desliza sobre a face da ferramenta.

Na usinagem da grafita é diferente; ela é uma estrutura policristalina, e é usinada por um processo de fratura desta estrutura ao invés de deformação plástica. A zona de corte esmaga a grafita logo à frente do gume da ferramenta, quando esta se move através do material. Isto forma pequenas partículas que resultam em pó de grafita como produto final, ao invés de cavacos do tipo que se verifica na usinagem de metais. Assim, o processo de corte da grafita não gera elevadas temperaturas [26].

Com a penetração do gume, a tensão máxima no material da peça começa a ocorrer na frente do mesmo, Figura 2.17(a). Quando esta tensão alcança seu limite, uma trinca é formada em frente ao gume, Figura 2.17(b). A propagação desta trinca torna o estado de tensões complexo, porque não somente tensões compressivas, mas também tensões de flexão são criadas pelo cavaco, atuando na zona de deformação [28].

Basicamente duas diferentes situações podem ser identificadas. A primeira é quando a tensão de flexão atua de uma forma ativa na formação do cavaco e em sua fratura. Isto ocorre quando a força resultante R intercepta o eixo de formação da trinca, Figura 2.18(a). O segundo caso é quando a força resultante é tão direta que não há tensão de flexão na formação de cavaco, Figura 2.18(b). Aqui, a fratura do cavaco ocorre quase que puramente pela compressão de um fragmento da camada a ser removida localizada entre a face da ferramenta e a parte não-deformada do material [28].

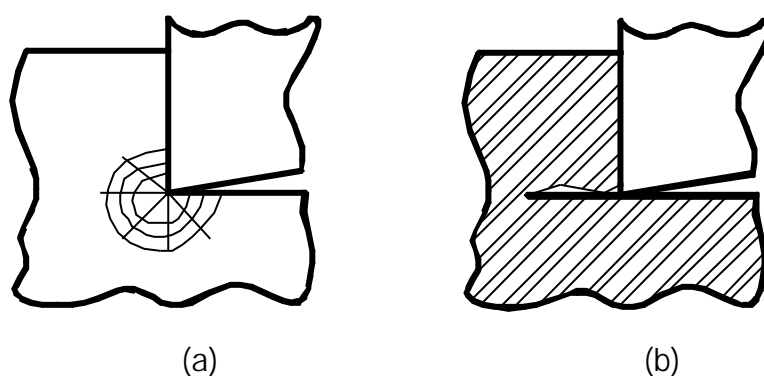


Figura 2.17 - Mecanismo de formação de cavaco.

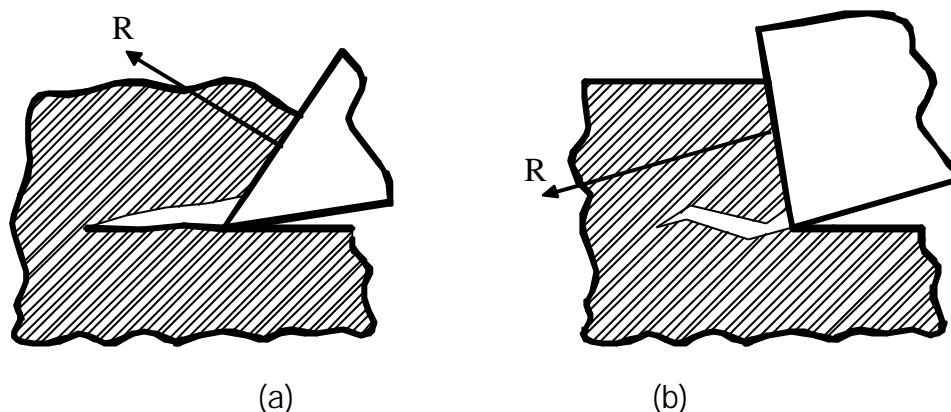


Figura 2.18 - Resultante de forças na formação de cavaco.

Dessa maneira, até mesmo no corte de materiais frágeis, a forma do cavaco pode ser um parâmetro controlável. E é entendido que quando a compressão e a flexão atuam conjuntamente, muita menos energia deve ser fornecida à zona de corte e melhores condições de trabalho (sem considerar o pó) podem ser alcançadas. A geometria de corte tem uma grande influência nisto tudo [28].

Devido à sua baixa resistência mecânica, a grafita é considerada fácil de usinar. Contudo, existem complicações no corte devido ao problema da estrutura do material em camadas 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 [5].

Uma especial atenção deve ser dada para que se evite o lascamento da borda do material, e o desenvolvimento de trincas internas causadas por tensões compressivas, geradas com a utilização de geometrias de corte não específicas. Grafitas de grãos finos ou ultrafinos devem ser utilizadas quando uma alta qualidade do produto é exigida, devido às características superiores de usinabilidade e manipulação destes tipos de material [26].

2.4.3 Influência da Geometria da Ferramenta de Corte

No processo de corte de materiais frágeis, a formação de cavaco dá-se pela propagação de uma trinca logo à frente do gume da ferramenta. Com isto, fica evidente a influência da geometria da ferramenta de corte no fenômeno. Na usinagem de grafita,

esta característica tem função importante no controle da emissão de pó no processo. O ângulo de saída (ψ) e o ângulo de incidência (α) são os parâmetros determinantes neste controle.

As condições de usinagem no corte da grafita modificam-se com a variação do ângulo de saída (ψ) (Figura 2.19). Segundo König [19], 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, e uma diminuição no tamanho máximo destes. 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 [4].

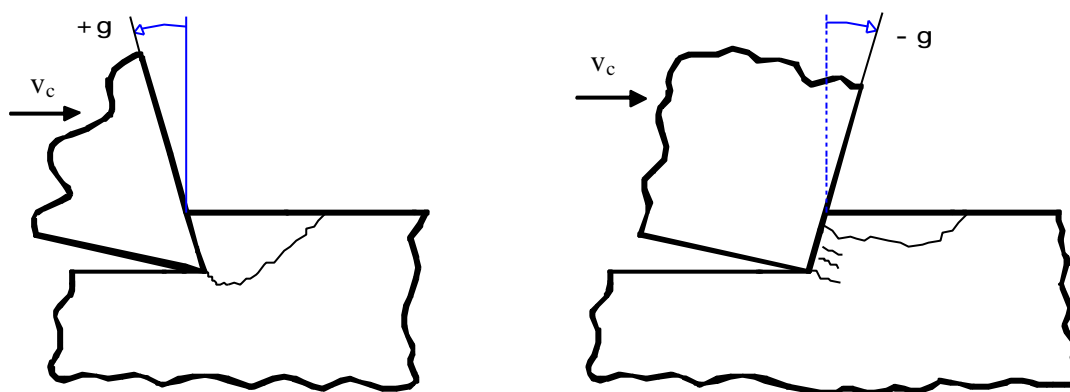


Figura 2.19 - Condições de corte para diferentes ângulos de saída de cavaco.

O resultado evidente da influência do ângulo de saída sobre o processo de corte leva a interpretação do problema aos resultados de qualidade de superfície usinada e eficiência do corte em si. Com a utilização de ferramentas com ângulo de saída positivo, estimula-se a formação da fratura no corte, aumentando assim a formação de crateras na superfície da peça. Já para ângulos de saída negativos, há uma ruptura macroscópica afastada do ponto de contato gume/material, com isto, o meio de energia favorável arranca menos material, e a emissão de partículas finas aumenta [19].

2.4.4 Estratégias de Movimento de Corte para Fresamento de Acabamento

Fresamento de Superfícies Inclinadas

Em geometrias de formas livres, comumente o programador depara-se com superfícies contendo alguma inclinação, e assim precisa tomar decisões de como usar as diferentes partes, garantindo a mesma qualidade de acabamento obtida em todas as superfícies da peça.

Dependendo da inclinação da superfície, durante o processo de fresamento em três eixos com ferramentas cilíndricas de topo esférico, várias partes do gume estão em contato com a peça [20].

O ângulo de inclinação da superfície a usinar da peça com a horizontal define o raio médio sobre o qual se desenvolve a usinagem em fresamento. Com pequena inclinação, ou seja, quando a parte ativa do corte se aproxima do centro da ferramenta, as cargas sobre o gume e a vibração são máximas, devido à elevada força passiva (F_p) e à pequena área de saída de cavaco na ponta da ferramenta. A utilização de ferramentas de materiais frágeis como Cermet e nitreto de boro cúbico (CBN), é restrita para os casos em que o centro da ferramenta não esteja em contato com a peça [7, 20].

Aumentando a inclinação da superfície, aumenta o raio ativo e com isto a velocidade de corte. Esta tem uma influência direta sobre o acabamento da superfície usinada.

As estratégias CAM, utilizadas no fresamento de formas livres em aço endurecido, também podem ser utilizadas para o fresamento de grafita. Os resultados são satisfatórios, porém existem algumas estratégias dedicadas ao corte de grafita. Estas estratégias buscam, mais que tudo, manter a integridade da geometria com a utilização de altas velocidades de corte, sem perder em qualidade de superfície usinada.

Algumas estratégias estão apresentadas no capítulo 5, que disserta sobre os estudos de casos, realizados em condições e necessidades normais do ambiente fabril.

2.4.5 Materiais de Ferramentas de Corte para Usinagem de Grafita

A evolução no setor de materiais para ferramentas está caracterizada pelo desenvolvimento contínuo, com o intuito de melhorar os materiais de corte existentes, bem como no desenvolvimento de novos materiais para a fabricação de ferramentas de corte [16]. Esta evolução é cada vez mais importante e significativa, principalmente em função da tendência em substituir operações de usinagem com fluidos de corte por usinagem com MQFC (Mínima quantidade de fluido de corte) e usinagem a seco [44].

As propriedades esperadas de ferramentas de corte são relacionadas a seguir. Deve-se salientar que nenhuma ferramenta tem todas estas características, sendo a seleção do tipo e material de ferramenta uma solução de compromisso [41].

- ✓ Resistência à compressão;
- ✓ Dureza;
- ✓ Resistência à flexão e tenacidade;
- ✓ Resistência do gume;
- ✓ Resistência interna de ligação;
- ✓ Resistência a quente;
- ✓ Resistência à oxidação;
- ✓ Pequena tendência à difusão e caldeamento;
- ✓ Resistência à abrasão;
- ✓ Condutibilidade térmica, calor específico e expansão térmica adequados.

A escolha da ferramenta de corte deve ser feita verificando-se, para cada trabalho específico, quais as exigências primordiais e quais as secundárias, de modo a se poder escolher a ferramenta de material mais adequado ao caso, conforme mostra a Figura 2.20 [16].

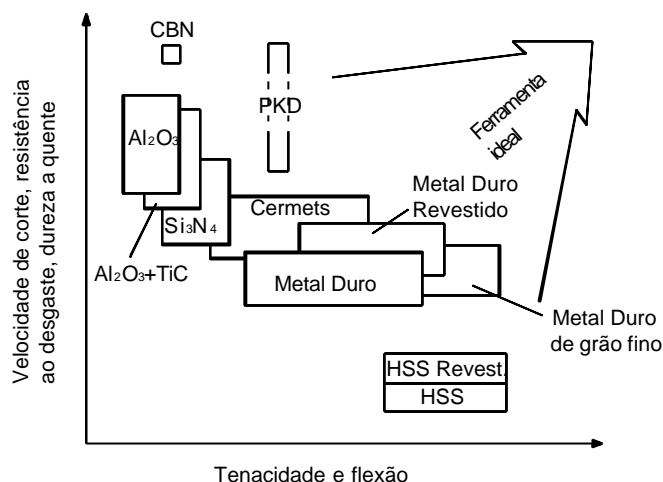


Figura 2.20 - Relação entre a dureza e a tenacidade para diversos materiais de ferramentas de corte [16].

O metal-duro é um material de ferramenta desenvolvido inicialmente por volta de 1927, produto da metalurgia do pó, tendo como base o carboneto de tungstênio e o cobalto. É o material para ferramenta mais importante utilizado na indústria moderna [14, 17].

Os metais-duros são materiais sinterizados constituídos de um ligante metálico nos quais tem-se embutidos os carbonetos, como mostra a Figura 2.21. A função do ligante (um metal do grupo do ferro, geralmente o cobalto) é construir a ligação entre os carbonetos frágeis e oferecer tenacidade, formando assim um corpo relativamente resistente. Os carbonetos por sua vez fornecem alta dureza a quente e resistência ao desgaste [17].

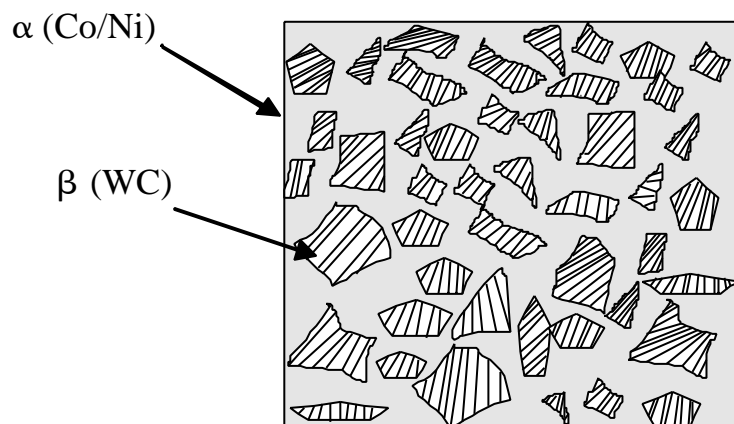


Figura 2.21 - Constituintes presentes na estrutura do metal-duro [21].

O carboneto de tungstênio (WC) é o mais usado, podendo ser o único tipo de carboneto presente ou podendo estar combinado com outros carbonetos. Estes carbonetos podem ser de titânio (TiC), de tântalo (TaC) e de nióbio (NbC), que quando combinados com o de tungstênio melhoram o desempenho das ferramentas em temperaturas elevadas. Isto se deve ao fato destes aumentarem a resistência à oxidação, estabilidade térmica, dureza a quente e a resistência à difusão do constituinte em ligas à base de ferro (Sandvik *apud* Castro [43]).

Os constituintes fundamentais do metal-duro são intimamente misturados na forma de pós e submetidos a um processamento que compreende compressão, sinterização, retificação, entre outras operações, resultando em um produto completamente consolidado, praticamente denso e apresentando as características de resistência mecânica, dureza e tenacidade adequadas para o emprego em ferramentas de corte [17].

As vantagens dos metais-duros estão na boa distribuição estrutural em decorrência do próprio processo metalúrgico de fabricação, dureza elevada, resistência à compressão e ao desgaste em elevadas temperaturas. O metal-duro, a 1.000°C, tem a mesma dureza que o aço-rápido à temperatura ambiente. Além disso, tem-se a possibilidade de obter propriedades distintas nos metais-duros, pela mudança específica dos carbonetos e das proporções do ligante. Os metais-duros podem ser subdivididos em metais-duros convencionais (do grupo P, M e K), metais-duros com alto teor de carboneto de titânio, metais-duros polivalentes, metais-duros revestidos, metais-duros de grão fino e ultrafino, além dos Cermets [43].

Os Cermets (formados de cerâmica + metal) são materiais de corte de metal-duro com base em carboneto de titânio e nitreto de titânio com a fase ligante composta de níquel, cobalto ou molibdênio. Os Cermets atuais são complexos sistemas de múltiplos materiais que podem conter outros elementos como tungstênio, tântalo, nióbio ou carbonetos complexos dos quais se formam fases intermetálicas durante a sinterização [41].

Atualmente, ferramentas de metal-duro revestidas com diamante são muito utilizadas na usinagem de grafita, e geram um custo-benefício atraente e satisfatório. Ferramentas de diamante policristalino são as que fornecem os melhores resultados, especialmente no fresamento em 3 eixos, onde o desgaste da ferramenta é maior.

O diamante tem grande desempenho e vida de ferramenta alta no corte de grafita. O diamante policristalino com gume afiado é a melhor alternativa como material de corte. A recente introdução de filmes de diamante depositada por PVD (Deposição Física de Vapor) em metal-duro leva a um bom desempenho em termos de resistência ao desgaste, mas causa arredondamento do gume [10].

Além de ter um custo elevado, o diamante policristalino (PCD) também apresenta a desvantagem da tenacidade extremamente baixa, o que exige um manuseio cuidadoso da ferramenta e risco de lascamento do gume. A aplicação de ferramentas de metal-duro revestidas de diamante pode combinar as vantagens dos dois tipos de ferramentas: as qualidades de manuseio dos metais-duros (diversidade de geometrias, múltiplos gumes etc) e a dureza do diamante. A vida de tais ferramentas pode atingir, e algumas vezes até exceder, à das ferramentas de PCD [5].

2.4.6 Mecanismos de Desgaste na Usinagem de Grafita

Investigações através de estudos experimentais revelaram que, embora certos tipos e formas de grafita sejam utilizados como lubrificantes, esta tende a ser altamente abrasiva na usinagem. Como resultado, a ação do mecanismo abrasivo causa alto desgaste da ferramenta de corte, muito maior que na usinagem de metais como bronze, aços de corte livre etc [36].

Conforme Stemmer [14], o mecanismo de desgaste abrasivo caracteriza-se pelo arrancamento de pequenas partículas de material do gume, em decorrência do escorregamento sob alta pressão e temperatura entre a peça e a ferramenta. Os carbonetos arrancados da superfície do gume devido à dinâmica do corte também agem no sentido de acelerar o nível de desgaste abrasivo sofrido pela própria ferramenta. De acordo com Gu *et al* [39], este mecanismo conduz, principalmente no processo de fresamento, ao surgimento de marcas de desgaste no flanco principal da fresa. A capacidade para que o gume da fresa resista ao desgaste abrasivo está diretamente ligada à dureza de sua superfície. Assim, os revestimentos agem também no sentido de minimizar a tendência ao desgaste abrasivo, pois elevam a dureza do gume, mantendo a tenacidade do substrato [25, 39].

Diferentemente de outros materiais, a resistência da grafita aumenta com o aumento da temperatura no processo, tornando-a uma escolha natural para muitas aplicações sob altas temperaturas. Se, no entanto, a temperatura na superfície da grafita for reduzida, sua resistência ao cisalhamento diminuirá, resultando também em uma redução do desgaste da ferramenta. Resultados experimentais revelaram que a grafita proporciona baixo atrito com temperaturas de superfícies progressivamente reduzidas. Isto torna a usinagem “fria” de grafita uma solução lucrativa em relação ao desgaste de ferramentas [36].

Camacho *apud* König [4] relata, especificamente sobre os mecanismos de desgaste que ocorrem na usinagem de grafita, que o princípio predominante de desgaste na ferramenta de corte é de natureza abrasiva e pode ser manifestado através do mecanismo de desgaste em forma de pente (*Furchungsverschleiss*). Este tipo de desgaste ocorre tanto no flanco principal da ferramenta, como na face da ferramenta de corte. Cristais de grafita, que têm seus planos alinhados não-paralelos à superfície da cunha de corte, são a base da forte ligação dentro do plano alinhado, altamente abrasivo [4].

O mecanismo de desgaste sobre a face e flanco da ferramenta é determinado através de dois tipos de efeitos, dependendo da parte da superfície envolvida no corte (Figura 2.22). O primeiro, mecanismo de deslizamento, atua através de contato direto com o material, ou seja, na face, a parte que está introduzida e em contato constante com o material para a realização do corte (profundidade de corte), e no flanco, a parte que também está em atrito constante com o material [19].

O segundo efeito presente no corte da grafita é chamado de efeito de jato livre das partículas. Este efeito está presente também na face e no flanco da ferramenta, onde as partículas de pó de grafita formam um fluxo de material arrancado que incide sobre um ângulo plano da superfície, que não está em contato com o material. Estas partículas incidindo promovem um mecanismo de desgaste por abrasão característico, também chamado de desgaste em forma de pente onde, através da formação de sulcos localizados no material de corte, ocorre uma elevação da temperatura com um aumento da velocidade de corte [19].

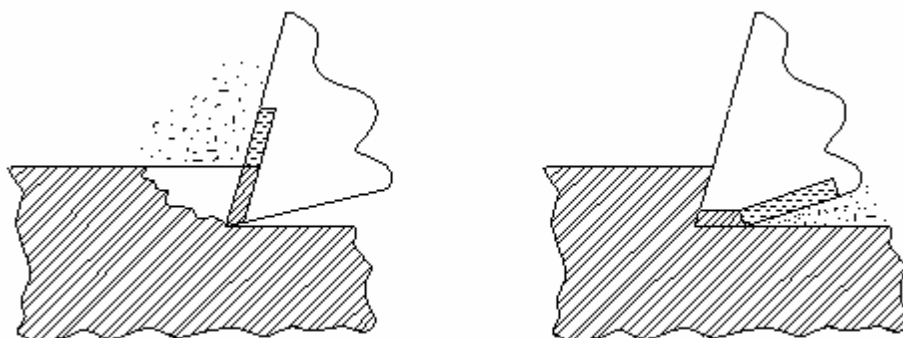


Figura 2.22 - Mecanismos de desgaste na face e no flanco da ferramenta [19].

Na parte onde há contato direto do material com a face da ferramenta, ou seja, onde há a condição de desgaste por deslizamento atuando, basicamente duas características de processo têm importância decisiva, a velocidade de corte e a pressão exercida no material.

Já no flanco da ferramenta existe contato constante entre ferramenta e material, provocando desgaste intenso em condição de atrito. A velocidade de deslizamento entre ferramenta e material é igual à velocidade de corte do processo, e o esforço normal à superfície é constante e igual à força passiva sobre a ferramenta. Também pode ocorrer que partículas desprendidas de material no gume venham a penetrar em poros do material, na zona de atrito flanco-peça, causando desgaste por deslizamento, e depois se desprenderem e agirem como causadoras também de desgaste por jato livre, ou *Strahlverschleiss* (desgaste por jateamento) [19].

A influência de ambas as variáveis do processo no desgaste (ângulo de saída e ângulo de incidência) mostra que, baseado no comportamento do corte, aumenta a economia no processamento a partir de um aumento na velocidade de corte do processo. Na fabricação de eletrodos, uma altíssima velocidade de corte na fabricação não traz apenas uma economia no tempo de fabricação, mas também uma redução no custo de fabricação [19].

2.4.7 Revestimentos para Ferramentas de Corte na Usinagem de Grafita

As ferramentas de aço-rápido e metal-duro são freqüentemente revestidas por uma ou mais camadas de material mais duro, que servem para aumentar a resistência da mesma aos choques térmicos e aos mecanismos de desgaste, melhorando assim o tempo de vida da ferramenta. O revestimento múltiplo é geralmente aplicado com o objetivo de associar as propriedades e vantagens que cada elemento possui, elevando ainda mais o desempenho da ferramenta. A aplicação do revestimento é realizada através da precipitação destes materiais duros na fase de vapor, seguida da sua deposição ao substrato da ferramenta. Este processo é realizado normalmente por dois métodos, PVD (*Physical Vapour Deposition*) e CVD (*Chemical Vapour Deposition*) [41].

Enquanto o revestimento de ferramentas aumenta o custo inicial de uma ferramentaria, os benefícios destas ferramentas são geralmente maiores que seus custos. Ferramentas revestidas geralmente oferecem uma maior vida, menos trocas de ferramenta, aumento de qualidade da superfície usinada etc. Estas vantagens são a força impulsionadora para o desenvolvimento de novas técnicas de revestimento [39].

Quando se usina grafita, o desgaste de ferramenta é em sua maioria causado por natureza abrasiva das partículas de grafita ao invés da temperatura que atinge ou pela velocidade de corte. Isto leva à ênfase na seleção de um material de revestimento da ferramenta com alta resistência a abrasão [26].

Alguns dos principais materiais para revestimento das ferramentas de metal-duro são [41]:

- ✓ Carboneto de Titânio (TiC);
- ✓ Nitreto de Titânio (TiN);
- ✓ Óxido de Alumínio (Al_2O_3);
- ✓ Carbonitreto de Titânio (TiCN);
- ✓ Nitreto de Titânio e Alumínio (TiAlN).

As principais características do carboneto de titânio (TiC) são o baixo coeficiente de atrito, que desta forma minimiza as temperaturas na região de corte, diminuindo o nível de difusão e o grau de adesão e soldas a frio entre a ferramenta e a peça; a alta dureza que proporciona ao gume boa resistência à abrasão; e o baixo coeficiente de

dilatação térmica, o que é muito bom para o processo de fresamento de acabamento em termos da qualidade superficial da peça gerada [15, 41].

As principais características do nitreto de titânio (TiN) são a alta força de ligação interna, que possibilita boa capacidade de adesão do revestimento ao substrato da ferramenta; a estabilidade química do material, que dificulta o processo de difusão; e a diminuição no nível de desgaste de cratera em função de suas propriedades químicas e mecânicas [15, 41].

As principais características do óxido de alumínio (Al_2O_3) são a alta dureza, porém alta fragilidade; a alta resistência a quente, que permite a utilização de velocidades de corte elevadas; e a baixa resistência às oscilações de temperatura, o que no caso do fresamento é fundamental [15, 41].

As principais características do carbonitreto de titânio (TiCN) são a espessura deste tipo de revestimento, que é na ordem de apenas 0,002 mm, o que proporciona um gume afiado; dureza e resistência ao desgaste excepcionais, superando o desempenho do TiN em aplicações onde o avanço e a velocidade de corte são severos, principalmente nos casos da usinagem de materiais abrasivos ou de corte difícil. Este elemento forma uma boa combinação com o óxido de alumínio Al_2O_3 , gerando uma barreira térmica estável, que é fundamental no processo de fresamento [15, 41].

As principais características do nitreto de titânio e alumínio (TiAlN) são os elementos que pertencem ao grupo de materiais metálicos duros, onde o nitreto de alumínio (AlN) pode ser ligado a um metal-duro covalente. Comparando ao TiN, apresenta maior resistência à oxidação, devido à formação de uma camada superior densa de Al_2O_3 , aumentando assim a resistência à difusão e oxidação do filme TiAlN, até mesmo em temperaturas elevadas [15, 41].

A introdução de ferramentas com revestimento de diamante provoca um aumento de economia de usinagem em relação às ferramentas convencionais de metal-duro com revestimento TiC/TiAlCN/TiN. A utilização de ferramentas de metal-duro com revestimento de diamante apresenta-se, inclusive, tanto mais resistente ao desgaste quanto mais economicamente viável do que a ferramenta de diamante, Figura 2.23.

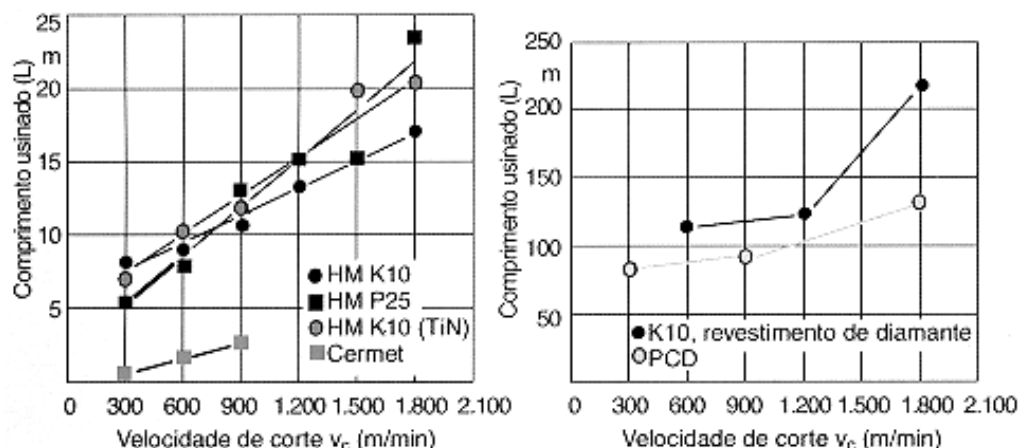


Figura 2.23 - Comparação entre diferentes ferramentas de corte e revestimentos [29].

Na usinagem da grafita, TiAlN e diamante são os revestimentos que melhor se adaptam. Independente de qual revestimento for, a melhor opção é pelo uso de ar no corte, porém muitas ferramentarias utilizam ainda lubri-refrigerantes, porque o líquido ajuda no controle de pó [30].

Esta prática não é recomendada para empresas que utilizam máquinas-ferramenta HSC, pois com a adição de meios lubri-refrigerantes para controlar a dispersão de pó de grafita gerado no corte, há a formação de uma espécie de lama de grafita. Este produto resultante tem características também abrasivas, e contamina partes móveis da máquina, sendo também de difícil remoção.

Costuma-se ter o cuidado em evitar a retenção de fluido ou água em partes expostas da grafita. Por causa da porosidade da grafita, este absorverá qualquer líquido contaminante. Se algum meio lubri-refrigerante é utilizado em operações de usinagem, a grafita deve ser subsequentemente aquecida entre 150°C e 200°C em um forno de circulação de calor, para remoção de qualquer fluido retido [26].

3 Materiais e Métodos

3.1 Material de Ensaio

Neste trabalho foram utilizadas grafitas especiais para aplicação em EDM de dois fabricantes, ambos comercializados no Brasil. As propriedades e características dos dois tipos de grafita apresentadas a seguir (tabela 3.1) são praticamente idênticas, sendo adequadas para condições de acabamento em EDM.

Tabela 3.1 – Propriedades das grafitas utilizadas nos ensaios.

| | Tamanho médio de grão [μm] | Densidade [g/cm^3] | Resistência elétrica [$\mu\Omega\text{m}$] | Resistência à flexão [MPa] | Porosidade | Dureza [Shore] |
|------------------|---|--------------------------------------|--|----------------------------|------------|----------------|
| Grafita 1 | 8 | 1,84 | 16,45 | 65 | 7% | <80 |
| Grafita 2 | 8 | 1,78 | 13,5 | 52 | 7-8% | 65 |

3.2 Máquina-ferramenta

A máquina-ferramenta utilizada para o estudo do fresamento com altas velocidades de corte em grafita industrial foi uma fresadora CNC de 3 eixos, com mesa horizontal (figura 3.1), localizada na ferramentaria do Centro Integrado de Manufatura e Tecnologia – CIMATEC, Salvador, Bahia. As demais características desta máquina estão descritas abaixo.

Fabricante: *HERMLE*

Modelo: C 800 U

Comando: Heidenhain TNC 430

Curso máximo de deslocamento das Guias:

Longitudinal "X" → 800 mm

Transversal "Y" → 600 mm
Vertical "Z" → 500 mm
Rotação máxima: 16.000 rpm
Potência Máxima: 15 kW
Avanço rápido: 35 m/min
Avanço máximo programável: 20 m/min
Aceleração máxima: 0,8 G
Precisão de posicionamento: (Pa/2): 0,001 mm



Figura 3.1 - Fresadora *HERMLE* utilizada nos ensaios.

3.3 Equipamentos Auxiliares

As análises dos resultados obtidos através dos ensaios propostos foram realizadas com o auxílio de alguns instrumentos e equipamentos de verificação de superfícies, como a câmera fotográfica digital *JVC*, modelo TK-C1380 de 2 mega pixels; e também o microscópio estereoscópico da figura 3.2, da marca *LEICA*, modelo Type-S, com ampliações possíveis de 10x, 16x, 25x e 40x.

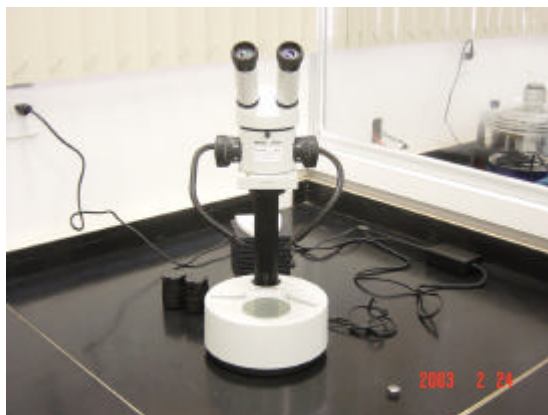


Figura 3.2 - Microscópio de bancada utilizado para análise de desgaste de ferramenta e integridade de superfície nos corpos de prova.

Nos ensaios de acabamento de superfície em fresamento frontal e periférico, foi necessária a utilização de um rugosímetro, para a verificação de rugosidade. Fez-se o uso de um modelo SJ-201P (figura 3.3), da marca *Mitutoyo*, com faixa de medição possível de 350 μm (de $-200 \mu\text{m}$ até $+150 \mu\text{m}$) e comprimento de medição de 21 mm.



Figura 3.3 - Rugosímetro utilizado para análise de superfície.

Para a coleta eficiente do pó de grafita usinada, devido aos efeitos nocivos para a máquina e operador, utilizou-se um aspirador industrial da marca *Aspó*, modelo DC-8, com 7,5 HP de potência e com vazão máxima possível de 70 m^3/min , demonstrado na figura 3.4.



Figura 3.4 - Aspirador de pó industrial utilizado nos ensaios.

3.4 Metodologia Aplicada aos Ensaios

3.4.1 Procedimento de Ensaios para Acabamento Superficial

Ensaio em Plano Horizontal (fresamento frontal e periférico)

Na proposta inicial do trabalho, havia a idéia de que ensaios de fresamento de acabamento de superfície seriam necessários, pois resultados de qualidade de superfície têm um significado importante em estudos onde parâmetros de acabamento são analisados. Sendo assim, realizaram-se ensaios de fresamento frontal e periférico, onde houve também a variação da direção de corte, concordante e discordante, e de parâmetros de corte, como velocidade de corte e avanço por dente.

Foram utilizadas ferramentas de corte de topo reto de metal-duro, com diâmetro de 10 mm e 6 dentes. Quanto aos parâmetros de corte utilizados, estes foram combinados entre si, gerando os resultados para análise posterior:

- ✓ Velocidades de corte: 250, 375 e 500 m/min;
- ✓ Avanços por dente: 0,05, 0,075 e 0,1 mm;
- ✓ Direção de corte: concordante e discordante.

As combinações entre duas direções de corte (concordante e discordante), três velocidades de corte e três avanços por dente, geraram um total de 36 ensaios realizados em fresamento frontal, e 18 ensaios em fresamento periférico. Em todos os testes foram realizadas duas repetições, para assegurar a confiabilidade dos resultados.

Os parâmetros de profundidades de corte axial e radial foram mantidos constantes. Nos ensaios de fresamento frontal utilizou-se $a_p = 1$ mm e $a_e = 7$ mm, e para fresamento periférico, $a_p = 7$ mm e $a_e = 1$ mm. O comprimento em balanço da ferramenta foi de 36 mm, fixo para todos os ensaios realizados.

Os resultados de qualidade de superfície usinada, ou sejam, parâmetros de rugosidade R_a (Desvio médio aritmético ou Rugosidade média) e R_z (Média da profundidade de rugosidade da superfície usinada), foram mensurados na direção do avanço, e repetidos três vezes. Para a medição da rugosidade, foi utilizado o rugosímetro *Mitutoyo*, descrito no Item 3.3, Equipamentos Auxiliares, com parâmetro de *CutOff* de $\lambda_c = 2,5$ mm.

Os corpos de prova de grafita foram dimensionados em tamanho padrão, para facilitar a montagem na máquina-ferramenta e o manuseio para as análises de rugosidade posteriores. A máquina-ferramenta foi primeiramente adequada para a usinagem de grafita, visto tratar-se de uma máquina projetada especialmente para a usinagem HSC em geral.

Para atingir o objetivo de proteger os componentes da máquina-ferramenta do pó de grafita foi concebida uma proteção que era ao mesmo tempo barata e versátil, como também adaptável a qualquer tipo e tamanho de peça que viesse a ser fabricada na máquina. Como uma das adaptações feitas, foi instalado um aspirador de pó industrial, com dois bocais para extração de pó, voltados mais perto possível da zona de corte (figura 3.5). Estes bocais foram fixados em bases, presas na mesa da máquina. A peça e sua fixação foram também parcialmente encapsuladas, por meio de uma caixa de papelão. Após este conjunto cápsula-bocais estarem montados, foi feita a cobertura de

todas as partes externas ao conjunto, como as guias da máquina, as entradas para a esteira extratora de cavaco e os retornos de fluidos lubri-refrigerantes, com folhas plásticas resistentes, como observado na figura 3.6. O cabeçote de alta rotação foi encamisado com uma capa confeccionada em plástico, bloqueando todas as folgas existentes, evitando a entrada de pó fino de grafita, altamente prejudicial às partes eletrônicas, como já mencionado.



Figura 3.5 - Cápsula de papelão com bocais fixados, e cobertura em plástico já montada.



(A)



(B)

Figura 3.6 - (A) Disposição dos tubos de aspiração na máquina-ferramenta. (B) Corpo de prova montado sob a fixação, e bocal direcionado a zona de corte.

Ensaio em Planos Inclinados

Após os ensaios de fresamento frontal e periférico, realizaram-se também ensaios de fresamento de acabamento em superfícies inclinadas. Um dos grandes questionamentos dos programadores de estratégias CAM é saber qual a direção de trajetória de corte, combinada com o sentido do incremento 3D, que forneça a melhor qualidade de superfície usinada na peça. Assim, através destes ensaios pôde-se constatar, em função da inclinação do plano, qual é esta estratégia, para a usinagem da grafita. Os testes foram executados em superfícies com 75° e 45° de inclinação, em um mesmo corpo de prova (Figura 3.7).

A inclinação dos planos refere-se ao ângulo compreendido entre um plano horizontal e o plano que define a superfície a ser usinada. Segundo Cavalheiro [33], incremento 3D é a menor distância entre cada passada paralela, medida em um plano contendo ambas as passadas. Neste caso, o incremento foi dado entre as isolinhas transversais da superfície, ou seja, linhas paralelas que formam a superfície inclinada em questão (figura 3.8).

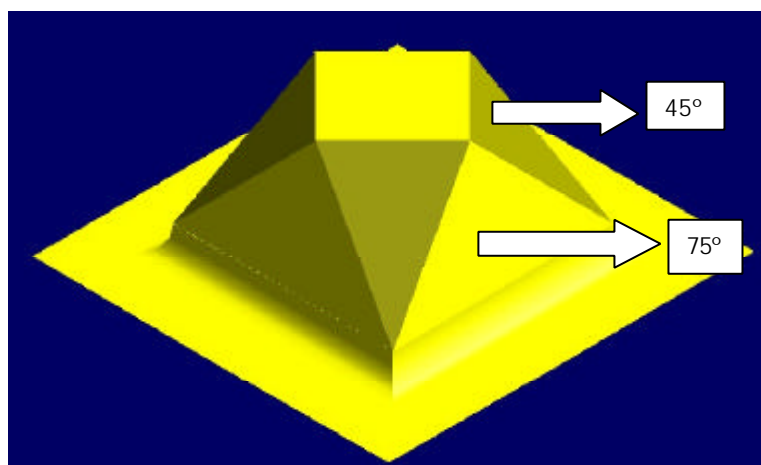


Figura 3.7 - Aspecto do corpo de prova com ângulos de inclinação das superfícies.

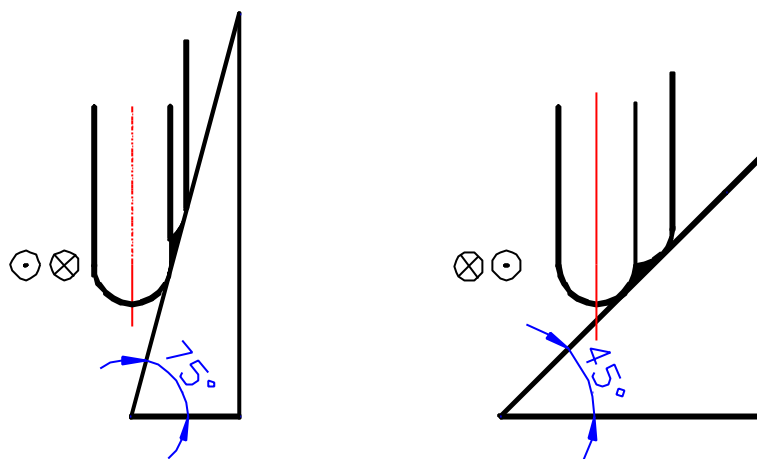


Figura 3.8 - Movimentação da ferramenta em direção longitudinal sobre a superfície.

Geralmente depois de executada uma operação de eletroerosão, a superfície erodida sofre um processo de acabamento manual. Segundo Bet [32], sobre características de rugosidade, pontos isolados de pico-a-vale não têm influência significativa na função da peça. Assim, no caso do eletrodo-ferramenta, pode-se utilizar o parâmetro R_z como variável de saída para este ensaio.

A Figura 3.9 mostra a numeração atribuída às oito superfícies, onde em cada uma delas houve um ensaio diferente, conforme Tabela 3.2, totalizando oito ensaios. Cada numeração corresponde a uma estratégia de direção de corte e sentido do incremento 3D utilizado, como passe entre as isolinhas (ascendente ou descendente), em cada inclinação dos planos. Os parâmetros de corte utilizados, como velocidade de rotação e avanço por dente, também estão descritos na Tabela 3.2.

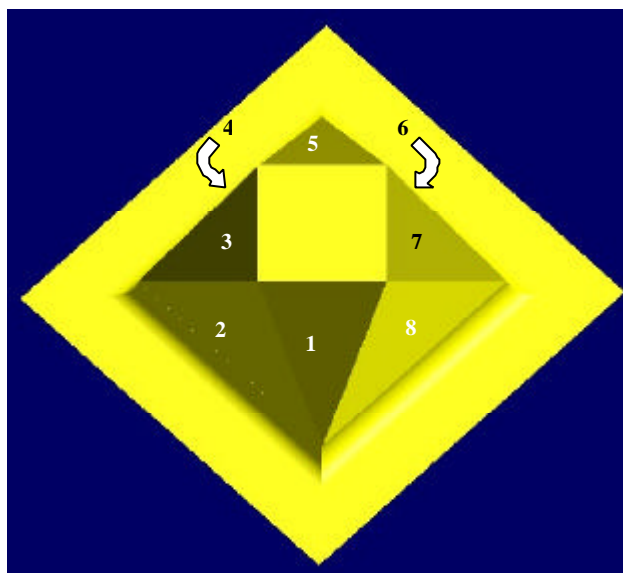


Figura 3.9 - Numeração atribuída aos planos inclinados.

O incremento 3D utilizado entre as isolinhas da superfície foi de 0,2 mm, para ambas as inclinações de superfície (45° e 75°), e em todas as combinações de ensaios, ou seja, tanto onde os incrementos eram ascendentes como descendentes na superfície (Figura 3.10). Como ferramenta de corte, foi utilizada uma fresa de topo esférico de metal-duro, revestida com TiAlN, de 8 mm de diâmetro com 2 gumes cortantes, com comprimento em balanço da ferramenta constante de 40 mm.

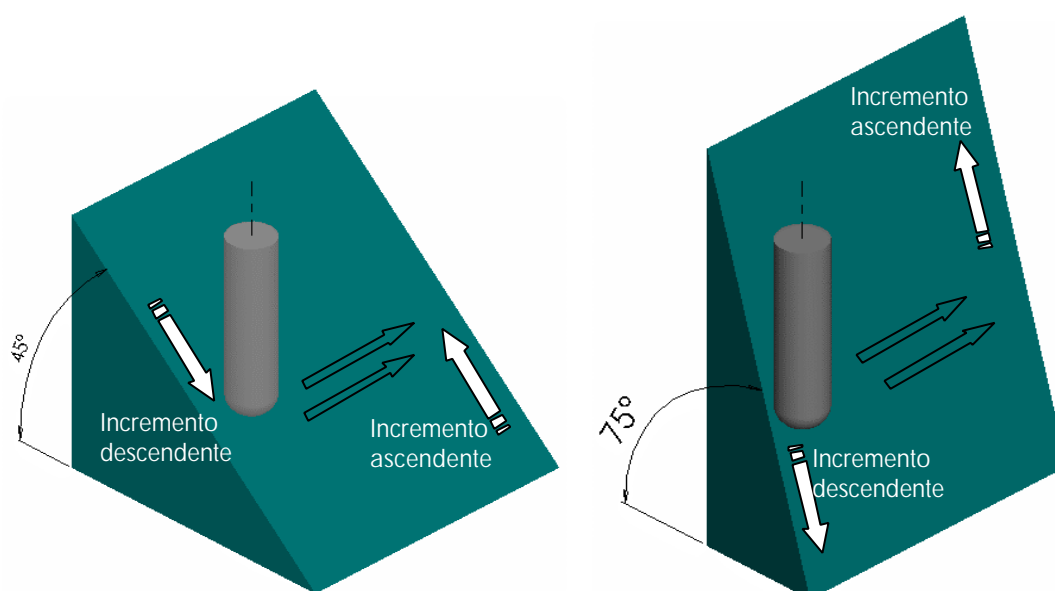


Figura 3.10 - Inclinação das superfícies e movimentos executados nos ensaios.

A montagem e fixação do corpo de prova na máquina-ferramenta foi realizada de maneira idêntica aos corpos dos ensaios de acabamento frontal e periférico, e utilizaram-se os mesmos equipamentos auxiliares também. O corpo de prova tem dimensões de 60 x 70 x 60 mm, onde sua forma final lembra um prisma. Assim, utilizou-se somente um bloco de grafita para realizar os testes em superfícies inclinadas.

Tabela 3.2 - Ensaios realizados nas oito superfícies inclinadas.

| Ensaio | Direção | Inclin. Parede | rpm | f_z [mm] |
|--------|-------------------------|----------------|--------|------------|
| 1 | Concordante Ascendente | 45° | 16.000 | 0,05 |
| 2 | | 75° | 16.000 | 0,05 |
| 3 | Concordante Descendente | 45° | 16.000 | 0,05 |
| 4 | | 75° | 16.000 | 0,05 |
| 5 | Discordante Ascendente | 45° | 16.000 | 0,05 |
| 6 | | 75° | 16.000 | 0,05 |
| 7 | Discordante Descendente | 45° | 16.000 | 0,05 |
| 8 | | 75° | 16.000 | 0,05 |

3.4.2 Procedimentos para Ensaio de Características de Contato Ferramenta-Material sobre a Integridade de Superfície de Peças

A busca pela determinação de uma melhor estratégia de entrada e saída da ferramenta em peças com superfícies de forma livre, fabricadas em grafita industrial, foi impulsionada pela necessidade de melhora no aspecto de peças acabadas, bem como da minimização de quebras e micro-quebras nas bordas das peças, e redução no tempo de fabricação.

O problema de fratura e quebra nas bordas laterais e de entrada e saída da ferramenta na peça foi observado tanto nos ensaios de vida de ferramenta como também nos de acabamento. A partir destas observações foram planejados ensaios específicos para o estudo destas quebras no material.

O ensaio proposto foi dividido em ensaio de fresamento frontal e fresamento periférico, pois a causa das quebras das bordas poderia estar relacionada aos parâmetros de profundidade de corte utilizados, havendo assim a necessidade do estudo

de ambos os tipos de fresamento. O ensaio foi realizado com o uso de ferramentas de topo reto de diâmetro 8 mm, 4 dentes, inteiriças de metal-duro, revestidas com TiAlN.

No teste de fresamento frontal, houve a variação somente da direção de corte e da profundidade de corte radial, conforme demonstra a Tabela 3.3, pois este é o parâmetro que tende a ser maximizado na produção. Com isto, pôde-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, podendo comprometê-la dependendo da finalidade da peça a ser fabricada.

Tabela 3.3 - Variáveis aplicadas para cada ensaio de fresamento frontal.

| Ensaio | Direção de corte | v_c [m/min] | f_z [mm] | v_f [mm] | a_p [mm] | a_e [mm] |
|--------|------------------|---------------|------------|------------|------------|------------|
| ESF1 | Concordante | 400 | 0,05 | 3.200 | 1,0 | 3,0 |
| ESF2 | Concordante | 400 | 0,05 | 3.200 | 1,0 | 4,0 |
| ESF3 | Concordante | 400 | 0,05 | 3.200 | 1,0 | 7,0 |
| ESF4 | Discordante | 400 | 0,05 | 3.200 | 1,0 | 3,0 |
| ESF5 | Discordante | 400 | 0,05 | 3.200 | 1,0 | 4,0 |
| ESF6 | Discordante | 400 | 0,05 | 3.200 | 1,0 | 7,0 |

A proposta de utilização de três valores diferentes de profundidade de corte radial tem 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: $a_e < D/2$, $a_e = D/2$, $a_e > D/2$. Em fresamento frontal, totalizaram-se seis ensaios, com duas repetições para cada um.

Já no teste em fresamento periférico, houve também a variação das direções de corte (concordante e discordante), e das profundidades de corte radial (a_e) e axial (a_p), conforme Tabela 3.4. Foram realizadas oito combinações de ensaios diferentes para o fresamento periférico, onde o objetivo principal foi a verificação da ocorrência de quebra na borda inferior e de saída, no material, em função da variação dos parâmetros.

Tabela 3.4 - Variáveis aplicadas para cada ensaio de fresamento periférico, para análise da integridade na entrada e saída da ferramenta na peça.

| Ensaio | Direção de corte | v_c [m/min] | f_z [mm] | v_f [mm] | a_p [mm] | a_e [mm] |
|--------|------------------|---------------|------------|------------|------------|------------|
| ESP1 | Concordante | 400 | 0,05 | 3.200 | 8,0 | 1,0 |
| ESP2 | Discordante | 400 | 0,05 | 3.200 | 8,0 | 1,0 |
| ESP3 | Concordante | 400 | 0,05 | 3.200 | 7,0 | 2,0 |
| ESP4 | Discordante | 400 | 0,05 | 3.200 | 7,0 | 2,0 |
| ESP5 | Concordante | 400 | 0,05 | 3.200 | 5,0 | 4,0 |
| ESP6 | Discordante | 400 | 0,05 | 3.200 | 5,0 | 4,0 |
| ESP7 | Concordante | 400 | 0,05 | 3.200 | 4,0 | 5,0 |
| ESP8 | Discordante | 400 | 0,05 | 3.200 | 4,0 | 5,0 |

Para que o ensaio de fresamento periférico não ficasse restrito a informações somente de corte periférico em si, propuseram-se valores de profundidade de corte alternantes, para uma melhor compreensão do fenômeno de quebra das bordas. Ou seja, alternaram-se os valores de a_p e a_e , desde um fresamento de características puramente periféricas ($a_p \gg a_e$), até valores de transição entre fresamento periférico e fresamento frontal, conforme a tabela 3.4.

Os corpos de prova utilizados foram idênticos aos utilizados nos ensaios de acabamento de superfície, e toda a montagem e adequação do ensaio à máquina, objetivando evitar ao máximo a dispersão de pó de grafita para as guias e partes móveis da mesma, foi realizada da mesma forma que nos ensaios anteriores de acabamento.

Em ambos os ensaios, de fresamento frontal e periférico, as bordas de entrada da ferramenta e de saída foram analisadas, conforme Figura 3.11. Em fresamento frontal, também a borda lateral fresada foi verificada.

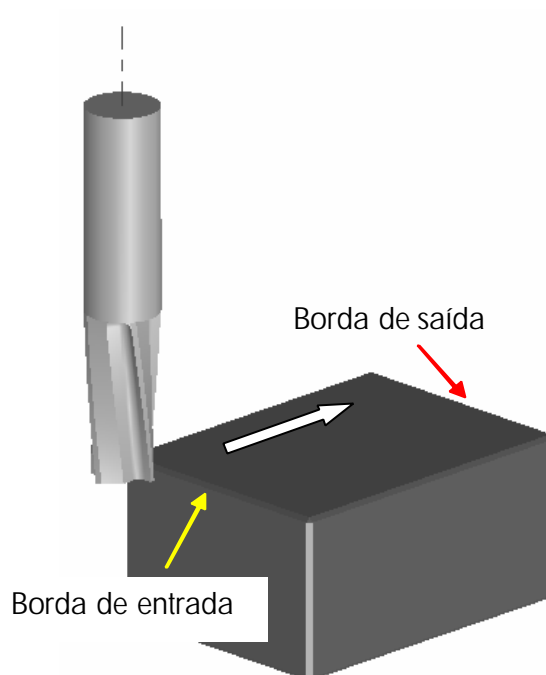


Figura 3.11 - Detalhamento do movimento da ferramenta e das superfícies analisados no ensaio de contato ferramenta-material.

3.4.3 Procedimentos para Ensaio 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 [51], e adequados às necessidades deste trabalho. Os ensaios, segundo a Norma, foram do tipo fresamento de topo, onde é utilizada predominantemente a periferia da ferramenta. Adotou-se como critério de final de vida de ferramenta um desgaste de flanco médio (VB_m) de 0,1 mm.

A escolha do critério de fim de vida para a análise proposta de $VB_m = 0,1$ mm foi embasada na tendência do mecanismo de abrasão atuante causar uma marca de desgaste constante uniforme, segundo König [4]. Com isto, para evitar testes de longa duração e de grande consumo de material, o fim de vida das ferramentas analisadas foi fixado em $VB_m = 0,1$ mm.

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 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 3.5) 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 3.5 - Condições de corte adotadas nos ensaios de vida de ferramenta

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

As marcas de desgaste de flanco médio (VB_m) foram medidas no microscópio estereoscópico *Leica*, e fotografadas por câmera digital *JVC*, equipamentos estes descritos no item 3.3 (Equipamentos Auxiliares).

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 (Figura 3.13). 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 3.6.

Tabela 3.6 - Condições de corte para ensaio de vida de ferramenta com alta velocidade de corte.

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



Figura 3.12 - Ferramenta de diâmetro 8 mm e 2 dentes, utilizada nos ensaios de vida com $v_c = 200$ m/min e $v_c = 400$ m/min.



Figura 3.13 - Ferramenta de diâmetro 16 mm e 4 dentes, utilizada nos ensaios de vida com alta velocidade de corte ($v_c = 800$ m/min).

4 Análise dos Resultados

4.1 Análise dos Resultados dos Ensaios de Acabamento Superficial

4.1.1 Ensaios de Fresamento Frontal e Periférico

Enquanto na usinagem com ferramentas de geometria definida de materiais dúcteis a velocidade de corte tem uma influência clara sobre a qualidade da superfície usinada, na usinagem de grafita esta influência mostra-se aleatória. Esta aleatoriedade é mais significativa no fresamento periférico, conforme gráfico da Figura 4.1, onde os valores das rugosidades médias medidas não têm praticamente nenhuma relação com as velocidades empregadas, diferentemente dos resultados dos ensaios de fresamento frontal (Figura 4.2).

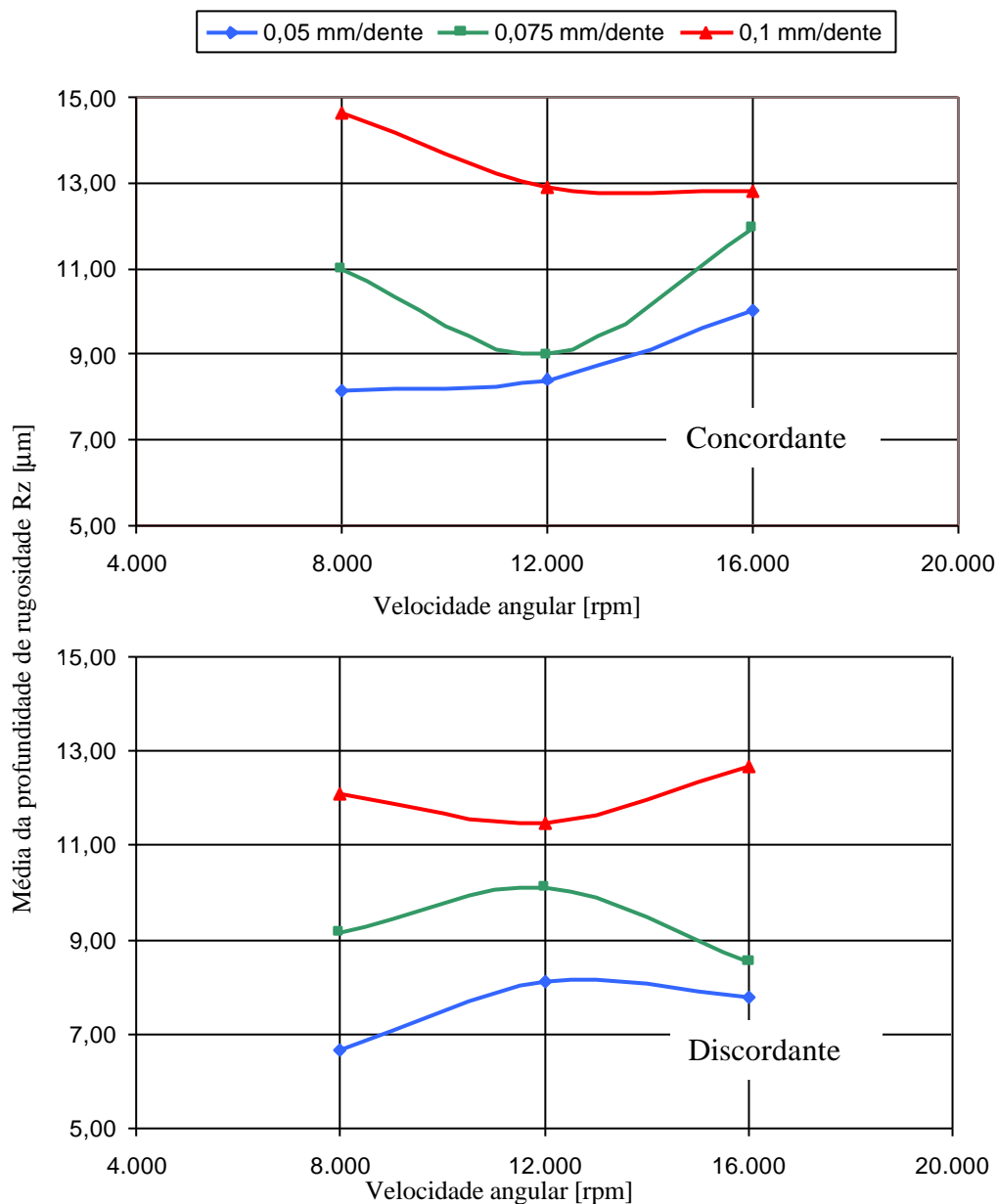


Figura 4.1- Influência da velocidade angular e avanço por dente na qualidade da superfície no fresamento periférico.

A aleatoriedade nos resultados pode levar a conclusões precipitadas quanto a possíveis causas da mesma, como a existência de vibrações geradas no processo de usinagem a altas velocidades de corte, estrutura não-homogênea do material e parâmetros de corte que estimulem a frequência natural do sistema máquina-peça, entre outros. A hipótese de vibração pode ser descartada, pois a grafita, frágil por natureza, também é relativamente de boa usinabilidade com relação as forças de usinagem. Em seu processo de manufatura o mesmo é prensado isostaticamente, o que favorece a

homogeneidade da estrutura interna. A máquina-ferramenta utilizada é de altas velocidades, sendo projetada e fabricada com uma estrutura rígida que assegure uma usinagem sem perturbações, principalmente no corte da grafita.

Assim, listadas todas as possíveis causas dos resultados aleatórios da figura 4.1, estes resultados devem ser interpretados de maneira prática e aplicável, pois algumas destas podem ser relevantes e significativas ao estudo.

Utilizando o recurso de planejamento e avaliação de resultados [35, 50], priorizando o projeto fatorial 2^k , como também os algoritmos de Yates, concluiu-se que o fator mais determinante para a obtenção de qualidade de superfície no fresamento periférico é o avanço por dente (f_z), seguido da direção de corte empregada (concordante ou discordante), como segundo determinante no processo. Esta análise e toda a seqüência de cálculo fatorial e dos algoritmos está inserida no Anexo.

No ensaio em fresamento frontal há uma influência perceptível da velocidade de corte na qualidade de superfície, conforme gráfico da Figura 4.2. Com aumento da velocidade de corte há aumento da rugosidade média, para todos os avanços por dente testados, independentemente da direção de corte utilizada, concordante ou discordante. Com relação à variável avanço por dente utilizado, confirma-se a tendência descrita por autores como Stemmer, König e Ferraresi da rugosidade ser maior em avanços maiores. Este resultado é fundamentado pela cinemática do processo de corte em geral, e comprovado como variável determinante pela avaliação fatorial 2^k , também efetuada para este ensaio.

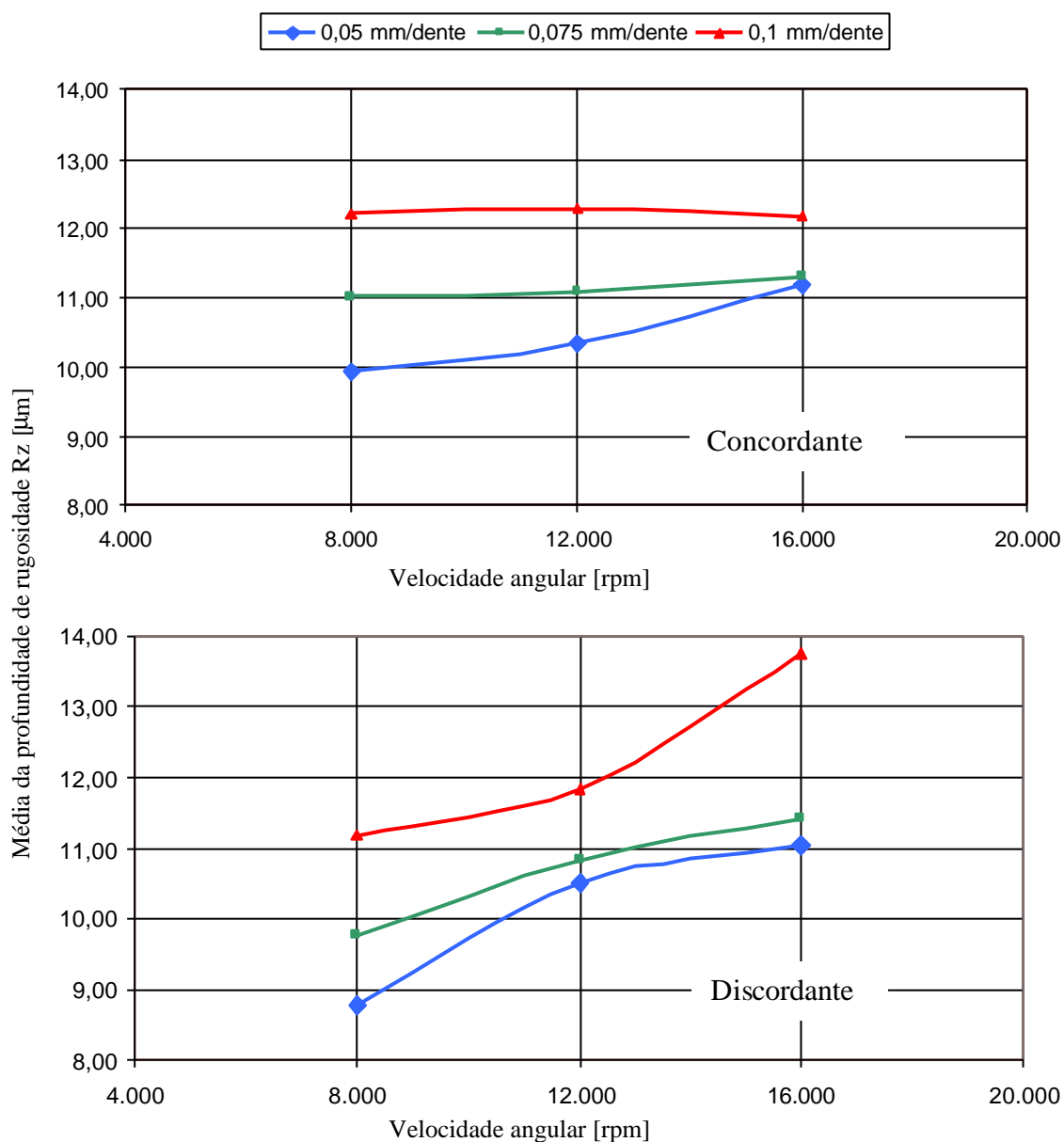


Figura 4.2 - Influência da velocidade de rotação e avanço por dente na qualidade superficial no fresamento frontal.

A avaliação fatorial também identificou, além do parâmetro de corte avanço por dente f_z , a velocidade de corte empregada como o segundo fator determinante no processo. Esta informação também é verificada analisando-se o gráfico da Figura 4.2, para corte em direção discordante, onde a variação de rugosidade a partir da variação de velocidade é relevante.

No tocante à influência da direção de corte sobre a qualidade da superfície gerada, verificam-se no fresamento frontal de grafita resultados contraditórios. Em

direção discordante de corte há uma atenuação na inclinação da curva de rugosidades para avanços por dente de 0,075 mm e 0,05 mm, em rotações mais elevadas. Já para direções de corte concordantes, esta inclinação da curva é aumentada para estes avanços por dente, porém em avanços de 0,1 mm/dente a curva mantém-se constante em velocidades maiores.

4.1.2 Ensaio em Planos Inclinados

Analisando os resultados obtidos nos ensaios de fresamento de planos inclinados, simulando situações de confecção de eletrodos para cavidades com ângulos de parede, por exemplo, verifica-se uma tendência normal, observada também na usinagem de materiais metálicos, da influência do ângulo de inclinação da superfície na qualidade de superfície da peça. Esta influência foi analisada para dois ângulos diferentes, 45° e 75°, e também com direções de corte e incrementos 3D diferentes, todos combinados entre si, conforme a tabela 3.2.

Segundo Silva Filho [34], utilizando a estratégia de fresamento com incremento 3D descendente, obtém-se uma superfície com rugosidade em torno de 10% maior que a mesma realizada em estratégia ascendente, em planos inclinados de 45°. Pelos resultados expressos na Figura 4.3, esta afirmação também é aplicável para usinagem de grafita, onde também considera-se a influência do diâmetro efetivo das fresas de topo esférico no fresamento em planos inclinados.

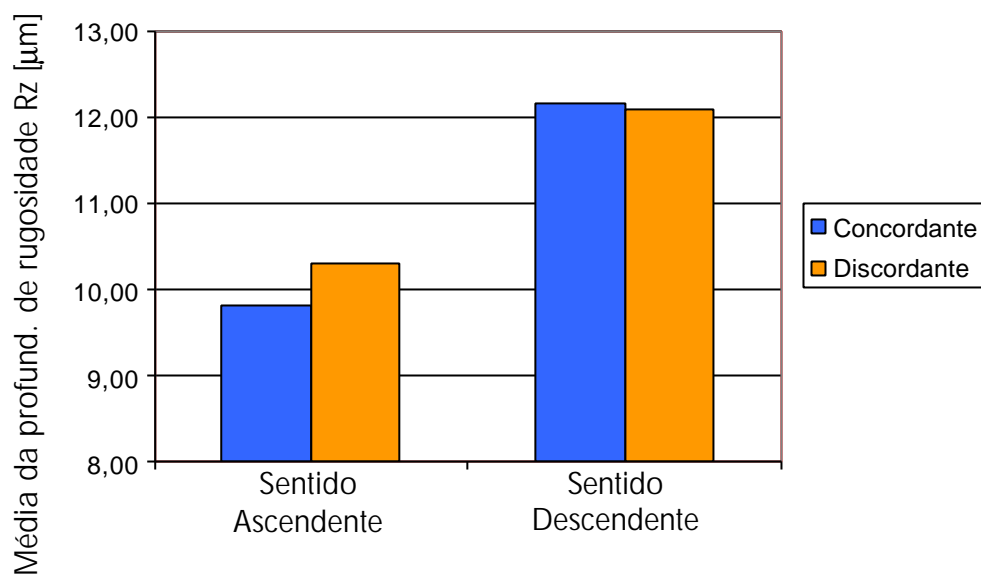


Figura 4.3 - Fresamento em plano inclinado de 45°.

As diferenças nos resultados de qualidade de superfície observados no fresamento em plano inclinado de 75° mostram que não se pode afirmar estatisticamente uma direção de corte melhor, nos dois sentidos de incremento 3D. Tanto em incrementos 3D ascendentes e descendentes, os resultados são praticamente iguais para as direções de corte utilizadas, conforme mostra a Figura 4.4.

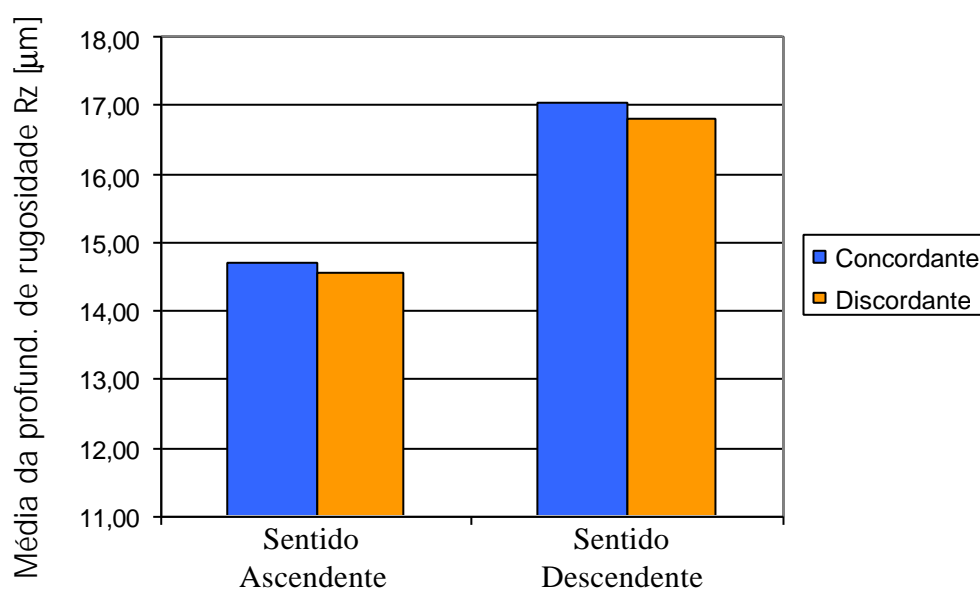


Figura 4.4 - Fresamento em plano inclinado de 75°.

A diferença nos resultados de qualidade de superfície para direções de corte concordante e discordante, em ambas as inclinações de planos analisadas é desprezível. Assim, pode-se recomendar ao programador que, conforme necessidade do movimento das estratégias de corte, escolher aquela que demande menor tempo de programação, bem como de usinagem.

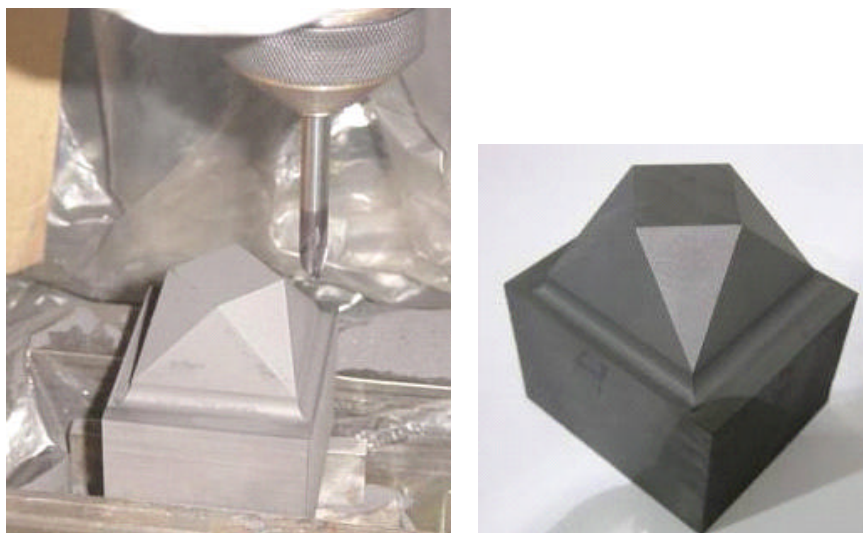


Figura 4.5 - Corpo de prova após ensaios de superfície inclinada.

4.2 Análise dos Resultados sobre as Características de Contato Ferramenta/Material

Visando atingir uma abrangência e entendimento maior do processo de corte da grafita industrial, foram propostos e realizados ensaios de fresamento periférico e frontal, para analisar a influência da direção do corte também sobre a integridade do material, nas bordas da superfície usinada.

Para o fresamento periférico, analisou-se como descrito no procedimento, a influência da direção de corte, bem como da profundidade de corte radial utilizada, sobre a integridade da superfície gerada. A ferramenta utilizada para este ensaio foi uma fresa de topo reto, de 8 mm de diâmetro, com 4 dentes.

Verificou-se uma situação bastante diferenciada entre as direções de corte utilizadas, mesmo em variações de profundidade de corte radiais proporcionais, ou seja, situações diferentes para $a_e = 2$ mm, $a_e = 4$ mm e $a_e = 5$ mm, para ambas as direções.

Com profundidades de corte radial $a_e < 0,5D$ e $a_e = 0,5D$, o movimento da ferramenta ocorre em apenas uma direção de corte. Nos ensaios com profundidade de corte radial de 5 mm, o processo de fresamento torna-se combinado (direção concordante-discordante). Porém nestas diferentes situações de processo, a ferramenta tem seus dentes de corte entrando na peça em corte discordante nas duas situações estudadas. Em uma delas a espessura de corte inicial é 0 mm, e em outra a espessura é praticamente a máxima de cavaco (Figura 4.6).

A direção de corte na segunda parte do processo, ou seja, quando a ferramenta assume uma única direção de corte até sair de contato com a peça, é concordante em ambos os ensaios. O corte em direção concordante pode finalizar com espessura mínima de cavaco, como normalmente é empregado, ou com espessura de corte praticamente máxima.

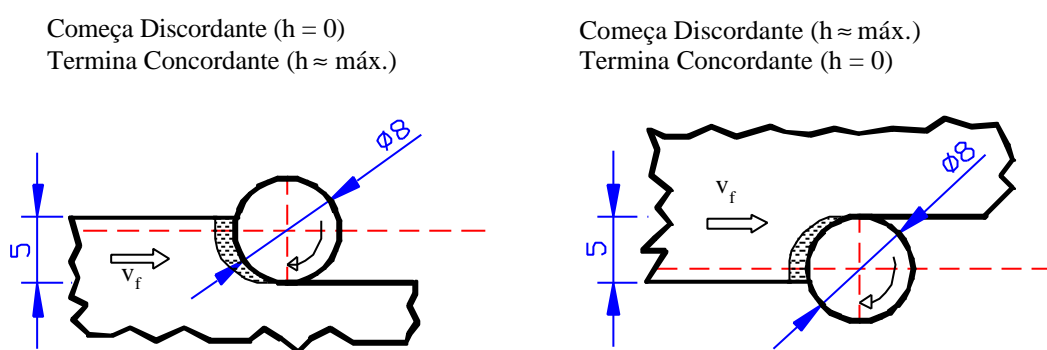


Figura 4.6 - Características de contato da ferramenta no corte.

Direção Inicial de Corte Discordante ($h \sim \text{máx}$)

Nos ensaios onde a direção no início do corte é discordante com espessura de corte quase máxima, a integridade geométrica e de forma da borda inferior foi mantida (figura 4.7). Este resultado foi verificado em todas as profundidades de corte aplicadas, inclusive para profundidade a_e de 5 mm, onde o corte torna-se combinado (começa-se o corte em direção discordante, e finaliza-se o corte em direção concordante). Assim, esta

estratégia torna-se a mais adequada para o acabamento das bordas de eletrodos, região esta importante tanto para realização de *preset* na máquina de eletroerosão, quanto na própria erosão submetida.



Figura 4.7 - Borda sem fratura, corte combinado com saída concordante ($h = 0$).

Direção Inicial de Corte Discordante ($h = 0$)

Nos testes com direção inicial de corte discordante, com espessura de cavaco mínima, observou-se a fratura (quebra) de pedaços pequenos da borda inferior, ao longo de toda a extensão do caminho de corte. O tamanho e quantidade destas fraturas é proporcional à profundidade de corte utilizada, principalmente para $a_e > 0,5D$. Neste caso, onde se tem corte combinado, a ferramenta começa o corte em direção discordante ($h = 0$) até $h = \text{máx}$. A partir de $h = \text{máx}$, até $h \approx \text{máx}$, onde a ferramenta sai da peça, o corte tem direção concordante.

Analisando a quebra das bordas neste ensaio, relacionam-se os fenômenos novamente com a cinemática do processo. Quando a ferramenta sai da peça, a espessura de usinagem é quase máxima ($h \approx \text{máx}$). Esta é uma condição onde a ferramenta corta o material, mas também aplica uma carga de tração (flexão) sobre este,

e quando o material é cortado leva consigo parte da borda arrancada. Este fato não ocorre quando a ferramenta deixa a peça com $h = 0$, também em corte concordante (Figura 4.8).

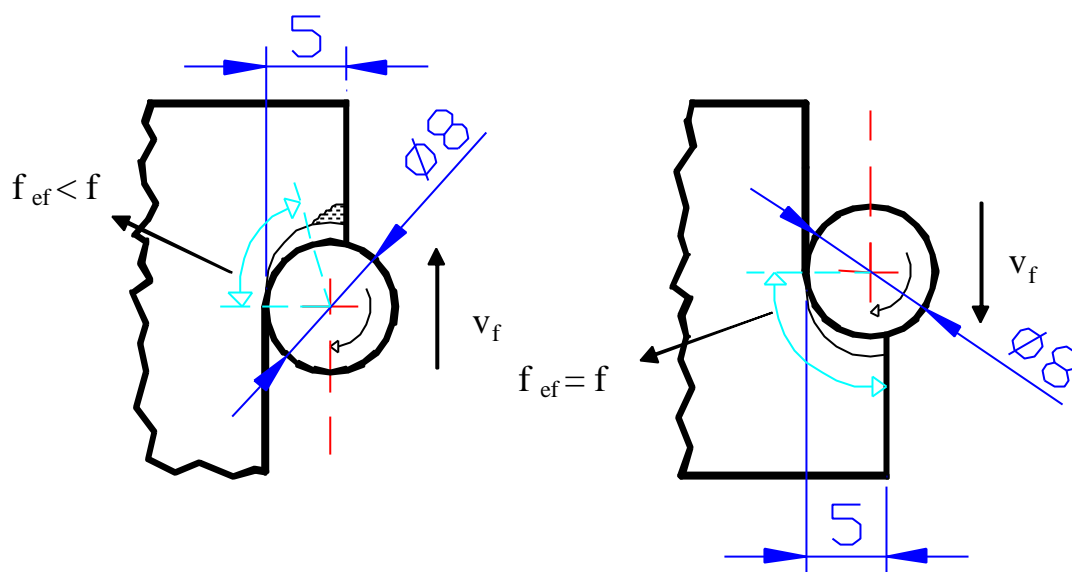


Figura 4.8 - Detalhamento do corte para as condições onde ocorre a fratura da borda, e onde não ocorre a mesma.

No movimento em direção de corte de saída concordante com $h \approx \text{máx}$, parte do material, que teoricamente seria cortado, é arrancado pela ação dos esforços trativos. Assim, o ângulo efetivo de corte é menor. Este ângulo sendo reduzido, o contato ferramenta-peça é menor, garantindo assim também um aumento na vida da ferramenta. Na Figura 4.9 observam-se as fraturas formadas na borda, por arrancamento de material no ensaio.

Neste ensaio o parâmetro de corte avanço por dente foi utilizado com valor constante único de 0,05 mm. Porém, este efeito de redução do ângulo efetivo de corte pela ação dos esforços de tração ocorre também em avanços por dente maiores, segundo König [19].

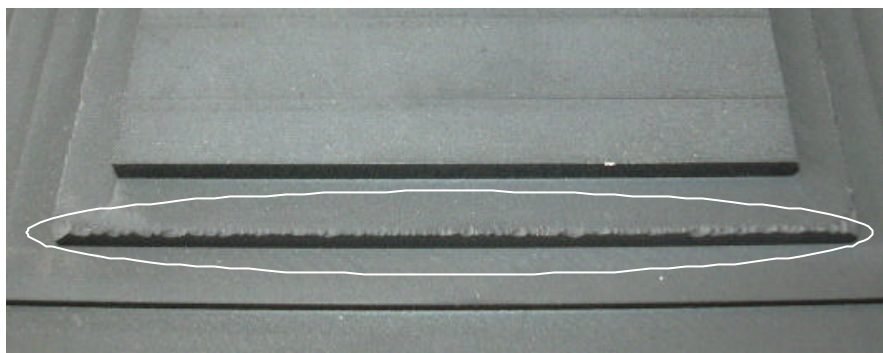


Figura 4.9 - Borda com fraturas, corte combinado com saída concordante ($h \approx \text{máx}$).

Análise do Fresamento Frontal na Entrada e Saída da Ferramenta na Peça

Realizaram-se também ensaios em fresamento frontal, para verificação da integridade da geometria das bordas e cantos de peças na saída e entrada da ferramenta no material. Utilizou-se uma ferramenta de diâmetro 8 mm, topo reto, com 4 dentes cortantes. Neste ensaio houve a variação da profundidade de corte radial em $a_e = 3$ mm, $a_e = 4$ mm e $a_e = 7$ mm.

Os movimentos de entrada da ferramenta, com o uso de diferentes profundidades de corte radial e em qualquer direção de corte ensaiada, não trouxeram conseqüências indesejáveis sobre a superfície do material, conforme observado nas bordas de entrada dos corpos de prova (Figura 4.10).

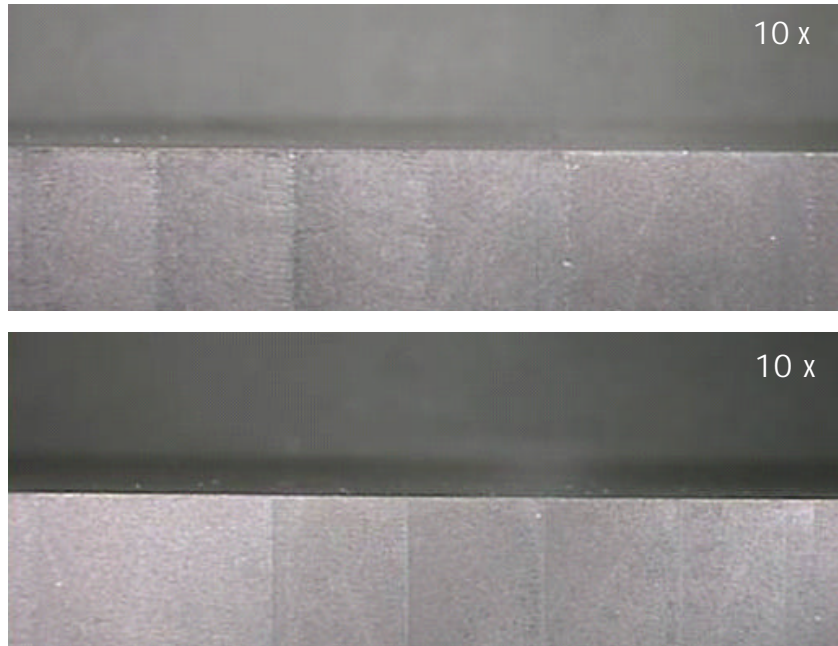


Figura 4.10 - Bordas onde houve a entrada da ferramenta, em direção de corte discordante e concordante, respectivamente.

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 $h \sim \text{máx}$, e saída em concordante com $h = 0$), observaram-se micro-fraturas nas bordas de saída (Figura 4.11). Estas são de dimensão diminuta, sendo assim desconsideradas como falha ou até mesmo como irregularidade de processo.

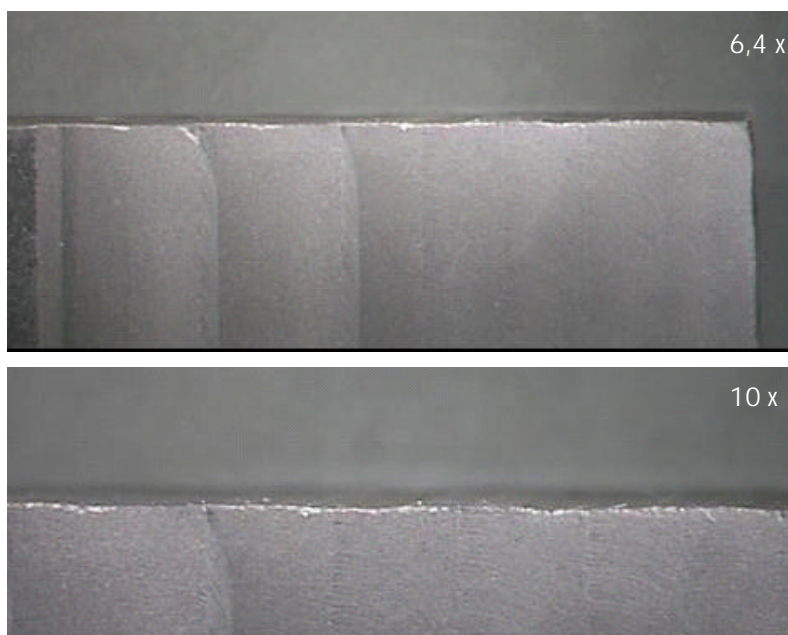


Figura 4.11 - Borda de saída para corte em direção concordante e combinado, entrada em discordante ($h \sim \text{máx.}$) e saída em corte concordante ($h = 0$).

Já para movimentos de corte em direção discordante, aparecem 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, como pode-se observar na Figura 4.12. O tamanho destas é proporcional à profundidade de corte utilizada. Com $a_e = 3$ mm são constatadas apenas micro-fraturas, porém já localizadas na parte da peça onde há o último contato entre o gume da ferramenta e o 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 $h \sim \text{máx}$), as fraturas são de dimensões maiores, proporcionais a profundidade de corte de 7 mm, conforme demonstra a figura 4.13.

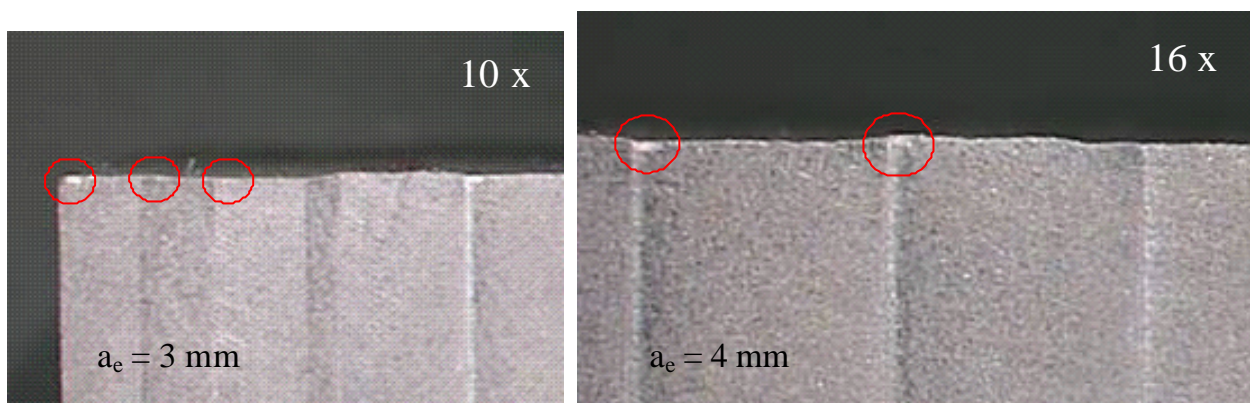


Figura 4.12 - Fraturas nas bordas de saída para o corte em direção discordante.

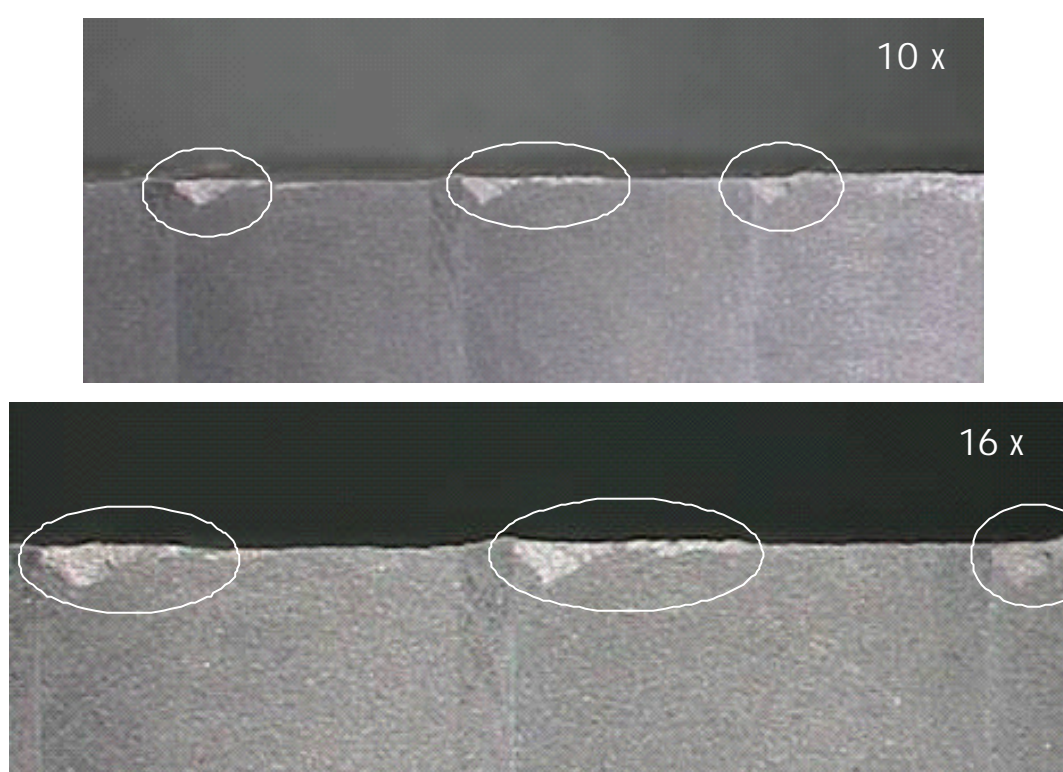


Figura 4.13 - Borda de saída para corte combinado com $a_e = 7\text{mm}$, entrando discordante ($h = 0$) e saindo concordante ($h \sim \text{máx}$).

Também através deste ensaio, os resultados comprovam a teoria proposta por König [19], 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 4.14). As quebras ocorrem quando este vetor está direcionado para fora da peça. Adicionalmente, esta quebra é proporcional à 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.

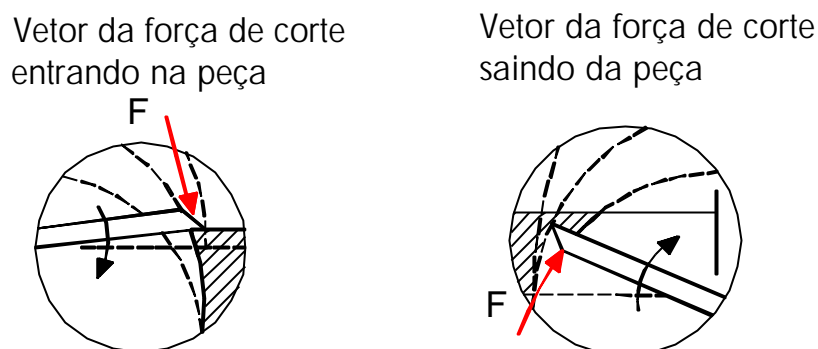


Figura 4.14 - Orientação dos vetores da força de corte na saída da peça, para direções de corte concordante e discordante, respectivamente.

Conforme verificado nos ensaios realizados, definições quanto às estratégias ideais de direção de corte para o fresamento de bordas e cantos deveriam levar em consideração os resultados atingidos. Para se obter uma superfície de boa qualidade, na saída da ferramenta da peça, o corte em direção concordante é o que permite obter os melhores resultados, para profundidades de corte radial $a_e = D/2$ (figura 4.15).

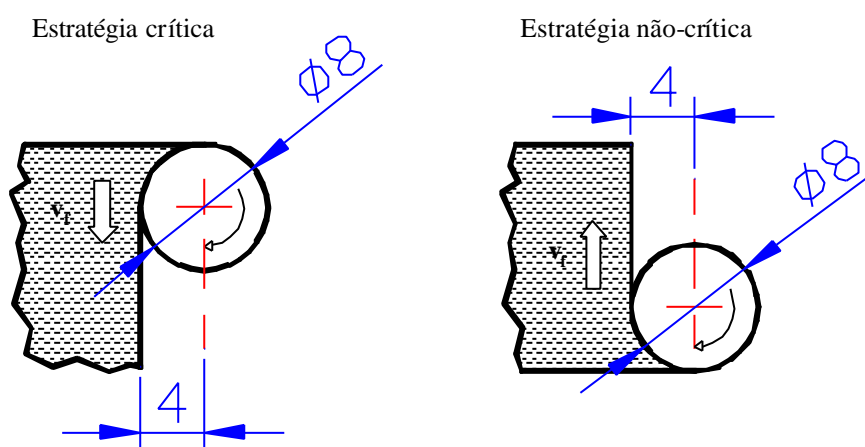


Figura 4.15 - Detalhamento das situações de saída de ferramenta para profundidades radiais de corte $a_e = D/2$.

4.3 Ensaaios de Vida de Ferramenta

Com a finalidade de interpretar e compreender melhor o fenômeno de desgaste sofrido pelo ferramental na usinagem de grafita foram realizados ensaios de fresamento para determinação da vida de ferramenta. A definição quanto aos parâmetros de corte e ferramenta utilizada seguiu a linha do objetivo do trabalho em si, ou seja, o estudo do processo de fresamento de acabamento da grafita.

Na indústria de ferramentas de injeção, a escolha pelo uso de processo de eletroerosão com eletrodos-ferramenta de grafita é determinada segundo características geométricas exigidas nos moldes e matrizes acabados, como também por conveniência e escolha na fabricação.

Algumas cavidades de dimensões reduzidas, onde não há possibilidade de corte com ferramentas de geometria definida, como por exemplo cavidades sem raio de arredondamento no fundo, rasgos com dimensões reduzidas e em locais de difícil acesso para uma ferramenta de corte, são casos onde há a necessidade do uso da eletroerosão.

Os eletrodos-ferramenta são mais exigidos quanto à sua forma e qualidade de superfície. Neste aspecto, as laterais do eletrodo desempenham papel fundamental no acabamento e qualidade final da cavidade. Por esta razão, os testes de vida de ferramenta foram realizados em condições de acabamento, para o fresamento periférico.

Foi utilizada uma ferramenta de metal-duro revestida por processo PVD com TiAlN, com diâmetro de 8 mm e 2 (dois) dentes. Os demais parâmetros de corte estão descritos juntamente com os gráficos de desempenho.

Os testes tiveram por objetivo o acompanhamento da vida da ferramenta, observando o seu desempenho em direções e velocidades de corte diferentes. Os resultados estão demonstrados em forma de gráficos de desempenho de vida de ferramenta, para as velocidades de corte utilizadas.

Com velocidade de corte de 400 m/min observou-se um melhor desempenho, ou seja, rendimento de corte em torno de 20% maior para a condição em direção de corte discordante. Com o uso desta velocidade, no corte discordante há uma estabilização na evolução do desgaste, onde a ferramenta usina quase 10 m desgastando-se apenas 0,03 mm. Isto ocorre entre as marcas de desgaste de 0,06 e 0,09 mm (Figura 4.16). Já para o corte concordante, com mesma velocidade de corte, este fenômeno não foi observado.

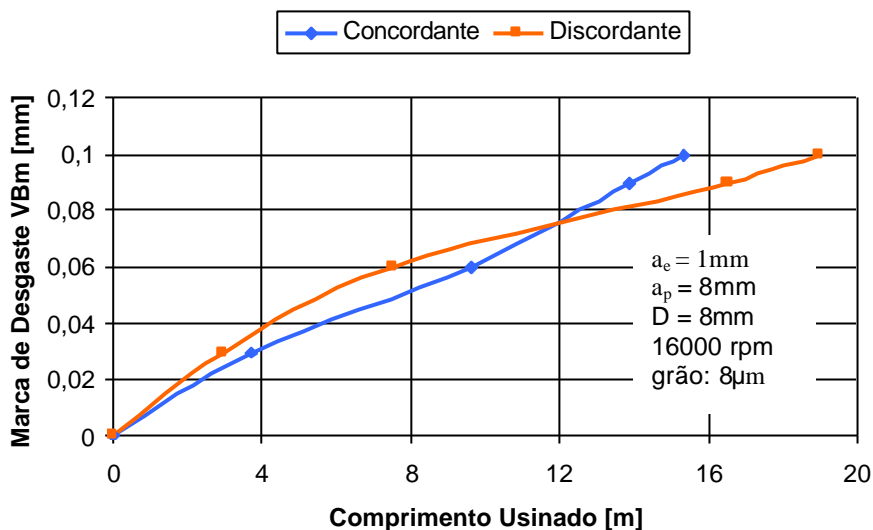


Figura 4.16 - Evolução da marca de desgaste de flanco, para $v_c = 400$ m/min.

Em velocidade de corte mais baixa, 200 m/min, a marca de desgaste tem uma evolução semelhante para as diferentes direções de corte utilizadas, concordante e discordante, conforme Figura 4.17. Observa-se também que o corte em direção concordante tem rendimento levemente melhor que em direção discordante ao final do ensaio. Este comportamento foi também observado em testes feitos por König [4, 19] e Pal *et al* [36], onde em baixas velocidades de corte a vida de ferramenta praticamente independe da direção de corte utilizada, porém à medida que as velocidades aumentam, melhora o desempenho das ferramentas para corte em direção discordante.

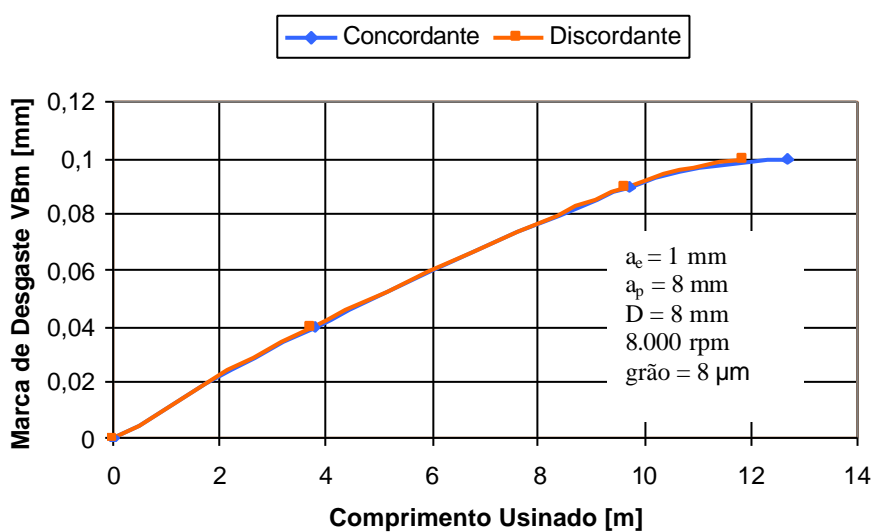


Figura 4.17 - Evolução da marca de desgaste de flanco, para $v_c = 200$ m/min.

Em ambos os testes, para velocidades de 400 e 200 m/min, e direções de corte concordante e discordante, o comportamento de desgaste foi semelhante. A partir das fotos realizadas no microscópio óptico (Figura 4.18), classificou-se o desgaste de flanco da ferramenta segundo a norma ISO 8688-2 [51]. Segundo esta, o desgaste é denominado “fenômeno de deterioração uniforme do flanco”. É a região com largura constante da marca de desgaste, e estende-se por toda a porção do flanco da ferramenta, adjacente ao inteiro comprimento ativo do gume.

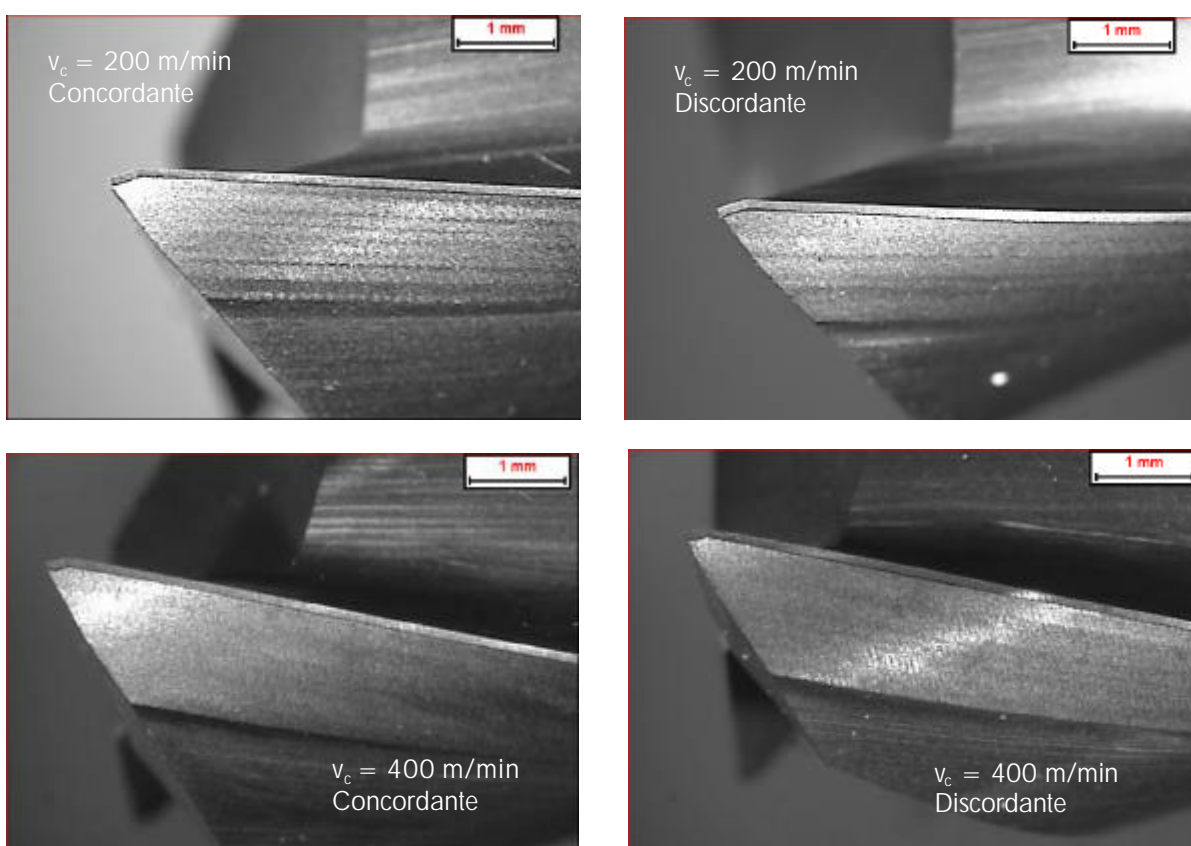


Figura 4.18 - Desgaste de flanco uniforme para $VB = 0,1$ mm.

Nas fotos realizadas no Microscópio Eletrônico de Varredura (Figura 4.19), fica evidenciado o desgaste abrasivo uniforme e constante, onde a camada de revestimento foi retirada, surgindo o substrato de metal-duro. Não se verifica nenhuma marca de achatamento do gume da ferramenta, nem de deformação plástica, lascamentos e recuo do mesmo. Pode-se também observar que o desgaste tem um comportamento uniforme em sua evolução, apresentando a mesma característica de forma tanto em meia-vida

como no final de vida de ferramenta. Também em toda a extensão da largura de corte, o desgaste mantém-se constante em sua evolução, não havendo marcas de desgaste máximo evidentes, como na usinagem de metais.

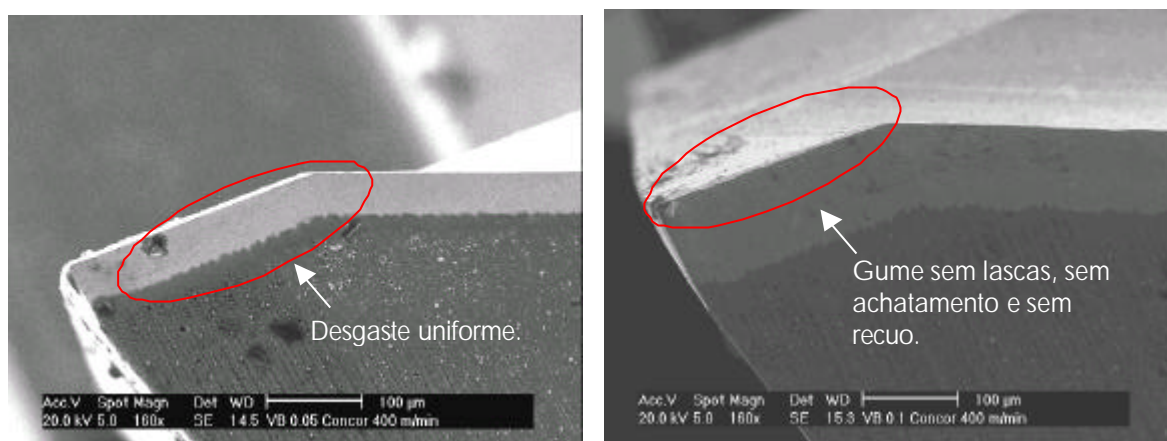


Figura 4.19 - Comparação entre os gumes da ferramenta para marcas de desgaste de flanco de 0,05 mm e 0,1 mm.

Os testes ocorreram em condições secundárias idênticas, ou seja, as ferramentas (idênticas e de mesmo fabricante) tinham o mesmo comprimento em balanço (33,9 mm), fixadas em um mesmo mandril, na mesma máquina e o material da peça mantinha a mesma especificação e provinha do mesmo fabricante.

Os ensaios denominados de meia-vida tiveram como critério de fim de vida uma marca de desgaste de flanco (VB) de 0,05 mm. Estes foram executados para que fosse possível averiguar melhor a evolução da marca de desgaste, através de uma análise em Microscópio Eletrônico de Varredura (Figura 4.19), após o ensaio.

A partir da análise por microscópio das ferramentas, bem como citado por König [4], a causa predominante de desgaste é de característica abrasiva, no flanco da ferramenta. Juntamente com a análise feita no MEV, foram realizadas amostragens químicas da parte desgastada da ferramenta e da parte ainda intacta desta (Tabela 4.1 e Figura 4.20). Na parte desgastada não são observados mecanismos de desgaste do tipo fissuras transversais e longitudinais, nem micro-quebras e deformações plásticas. Evidencia-se então a não-atuação de solicitações térmicas alternadas, nem de altas temperaturas geradas na região de corte.

Tabela 4.1 - Análise quantitativa dos componentes existentes na parte desgastada da ferramenta.

| | Wt [%] | At [%] |
|-------|--------|--------|
| Co | 9,62 | 24,92 |
| W | 90,38 | 75,08 |
| Total | 100 | 100 |

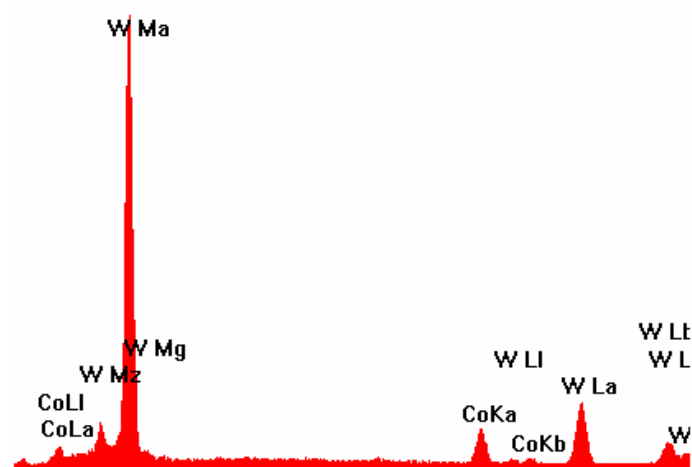


Figura 4.20 - Análise qualitativa da composição química média da parte desgastada da ferramenta.

Como observado na análise quantitativa de composição química (Tabela 4.1), na parte desgastada da ferramenta existem somente componentes que formam o substrato da mesma, ou seja, tungstênio e cobalto, elementos que compõem o metal-duro. Com isto, pode-se supor que causas de desgaste como difusão química e adesão também não estão presentes, ou não têm conseqüências relevantes no desgaste da ferramenta de corte.

Segundo König [19], existe um aumento no comprimento usinado a partir de uma redução do caminho de corte da ferramenta. Nos ensaios de vida realizados, esta redução no caminho de corte no material, para cada dente da ferramenta, deve-se ao aumento da velocidade de corte, pois o avanço por dente foi mantido constante em 0,05 mm. Assim, confirma-se a tendência de aumento no comprimento usinado a partir de redução do contato do gume com o material (atrito).

O aumento da velocidade de corte reduz o desgaste de face e de flanco da ferramenta, pois causa diminuição no tamanho das partículas de grafita, que tem relevante importância no mecanismo de desgaste abrasivo existente no processo, como detalhado no item sobre os mecanismos de desgaste na usinagem de grafita.

Para este estudo, também foram realizados ensaios com velocidades de corte de 800 m/min, visando 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 ($v_f = 3.200$ mm/min), como nos ensaios com 400 m/min e 200 m/min.

Conforme a Figura 4.21, verifica-se um comprimento usinado em direção de corte discordante aproximadamente 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 400 m/min. O aumento da vida de ferramenta para o fresamento em altas velocidades de corte também foi verificado por Pal *et al* [36] e König [4, 19].

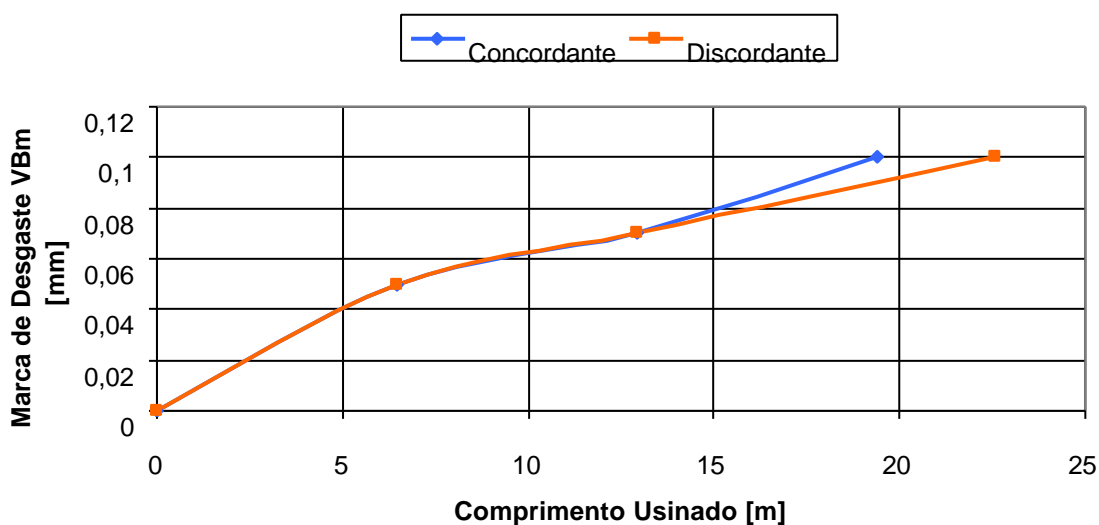


Figura 4.21 - Evolução da marca de desgaste de flanco médio em função da direção de corte, para $v_c = 800$ m/min.

Com esta informação pode-se verificar que, 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, o uso da HSC na usinagem de grafita,

entre todas as vantagens e benefícios existentes, também pode trazer a diminuição no custo do ferramental de corte como característica impulsionadora de desenvolvimento na área.

5 Estudo de Casos

Com o estudo realizado sobre qualidade de superfície gerada e vida de ferramenta, na usinagem de grafita industrial, verificou-se a necessidade de se usinar algumas peças (eletrodos-ferramenta) para que as conclusões acerca destes ensaios pudessem ser aplicadas e verificadas em situações reais de produção. Somando-se a isto, também havia o objetivo de se fabricar eletrodos que fossem utilizados em posterior processo de eletroerosão.

Como os experimentos práticos foram realizados em um ambiente que agregava pesquisa em usinagem e fabricação de moldes e matrizes de injeção, os casos aqui relatados são exemplos de necessidades reais do chão-de-fábrica, encontrados na confecção de cavidades em moldes de aço endurecido.

5.1 Eletrodo 01 (Eletrodo fêmea)

A confecção deste eletrodo-ferramenta foi impulsionada não somente pela necessidade de erosão desta geometria em uma cavidade real, mas também para a análise de qualidade de superfície gerada no fresamento de acabamento de formas livres, em grafita. Como primeira experiência na confecção de peças comercialmente produzidas em grafita, características da usinagem em superfícies inclinadas foi o principal objetivo da confecção desta forma. Contudo, também o comportamento da grafita na usinagem das demais geometrias, como “degraus”, pequenos rasgos, foi analisado.

Foram realizadas uma etapa de desbaste e duas etapas de acabamento, onde os parâmetros de corte utilizados estão descritos a seguir.

Desbaste:

Ferramenta de topo reto com \varnothing 8 mm, com 2 dentes, de metal-duro revestido com TiAlN.

16.000 rpm

$$v_f = 2.000 \text{ mm/min} (f_z = 0,0625 \text{ mm})$$

$$a_p = 0,5 \text{ mm}$$

$$a_e = 3,2 \text{ mm}$$

Tempo de usinagem: 10' 18".

Acabamento 01:

Fresa de topo esférico de $\varnothing 10 \text{ mm}$, com 2 dentes, de metal-duro revestido com TiAlN. A estratégia de corte utilizada foi um *raster* em 45° , completo em todas as geometrias da superfície (figura 5.1).

16.000 rpm

$$v_f = 2.000 \text{ mm/min} (f_z = 0,0625 \text{ mm})$$

$$a_p = 0,5 \text{ mm (sobremetal)}$$

$$a_e = 0,125 \text{ mm}$$

Tempo de usinagem: 14' 25".



Figura 5.1 - Aspecto do eletrodo-ferramenta após acabamento 01.

A estratégia em *raster* foi aplicada com incremento 3D ascendente, devido aos bons resultados deste tipo de movimentação nos ensaios em superfície inclinada (figura 5.2). Neste estudo de caso, o uso deste tipo de movimento atendeu as exigências de qualidade de superfície do eletrodo, não apresentando marcas de avanço da ferramenta sobre a superfície, principalmente na parte côncava da geometria.

Acabamento 02 (alívio de raios):

Fresa de topo reto de \varnothing 2 mm, com 2 dentes de corte, de metal-duro revestido com TiAlN.

16.000 rpm

$v_f = 2.000$ mm/min ($f_z = 0,0625$ mm)

$a_p = 0,025$ mm

$a_e =$ sobremetal restante

Tempo de usinagem: 14' 28".

Fez-se uso de algumas estratégias de corte usualmente utilizadas para o fresamento de formas em aço para a confecção deste eletrodo inteiro, como o *raster* e movimentos de entrada e saída da ferramenta. Observou-se a possibilidade de utilização de parâmetros de corte mais agressivos, principalmente uma maior profundidade axial de corte na etapa de desbaste.

Nas bordas superiores há uma geometria (saliência) pequena e complexa, em forma de degrau, percorrendo toda a extensão da cavidade. Esta foi usinada na etapa de Acabamento 02 onde também a preocupação com quebras na saída da ferramenta da borda foi considerada, e os resultados obtidos nos ensaios de contato ferramenta/material (item 4.2) foram utilizados trazendo bons resultados. Conforme a experiência na fabricação de eletrodos-ferramenta do pessoal técnico envolvido nos estudos de caso, muito provavelmente a utilização de cobre como material de eletrodo não levaria à mesma qualidade de forma obtida com o uso da grafita na confecção deste tipo de geometria.

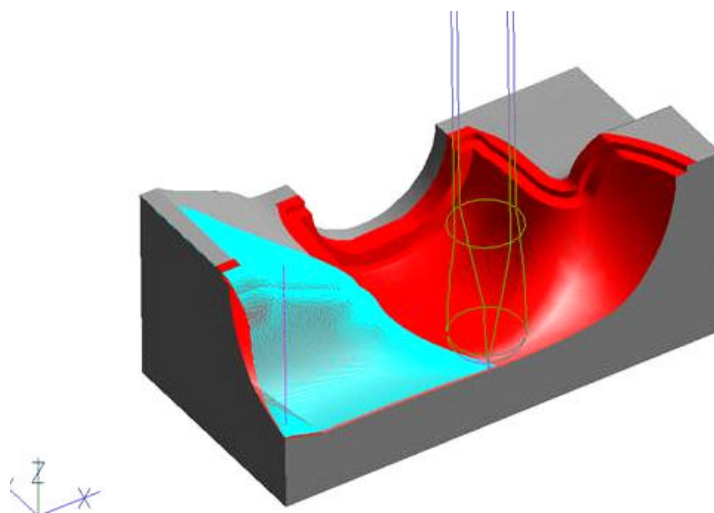


Figura 5.2 - Simulação do movimento de corte no acabamento 01, gerado pelo software *SurfCam*.

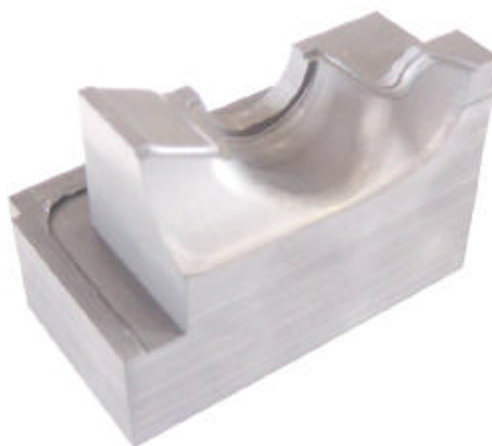


Figura 5.3 - Aspecto final do eletrodo.

5.2 Eletrodo 02 (Eletrodo-canal macho).

Este eletrodo tem características geométricas diferentes das que geralmente são fabricadas, com um comprimento de 200 mm e paredes finas (1,5 mm) de 30 mm de altura. Esta geometria é formada por um conjunto de paredes, uma grande e tortuosa, e duas pequenas. Esta diversidade de escalonamento proporcionou o estudo do comportamento do corte em situações críticas para a usinagem de grafita, como geometrias finas e altas (torres) e "nervuras".

A confecção deste eletrodo-ferramenta possibilitou a análise dos resultados expressos nos ensaios de fresamento periférico de acabamento, pois a qualidade de superfície foi exigida na periferia da geometria, devido as exigências posteriores da eletroerosão no molde.

Desbaste:

Fresa de topo reto de \varnothing 6 mm, com 2 dentes, de metal-duro revestido com TiAlN.

16.000 rpm

$v_f = 2.000$ mm/min ($f_z = 0,0625$ mm)

$a_p = 0,5$ mm

$a_e = 2,4$ mm

Acabamento:

Fresa de topo reto de \varnothing 6 mm, com 2 dentes, de metal-duro revestido com TiAlN.

16.000 rpm

$v_f = 2.000$ mm/min ($f_z = 0,0625$ mm)

$a_p = 2,0$ mm

$a_e = 0,1$ mm (sobremetal)

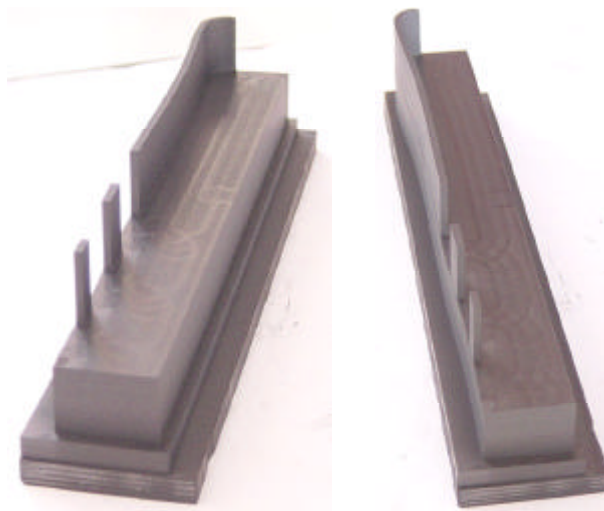


Figura 5.4 - Eletrodo-ferramenta para erosão de canal.

Foram aplicados os melhores resultados dos ensaios de fresamento periférico de acabamento, como um baixo avanço por dente e direção discordante de corte. Assim, o resultado na qualidade das superfícies foi o esperado.

Uma das dificuldades também encontradas na confecção deste eletrodo com paredes finas, foram as mudanças no sentido de corte, para o fresamento das paredes menores. Na Figura 5.4 há somente três paredes, porém o eletrodo era composto de quatro delas, sendo a última (não constante na figura) a menor delas. Esta pequena parede quebrou durante o processo. O arrancamento desta parede localizou-se em sua base, devido à característica frágil do material e seu comportamento sob tensões de tração.

A partir do acontecido, optou-se por um estudo mais específico da influência da cinemática do processo de fresamento, especialmente mudanças de direção e sentido de corte, sobre a integridade das geometrias usinadas. Esta análise foi realizada com um estudo de caso à parte (item 5.4), com formas livres específicas.

5.3 Eletrodo 03 (Eletrodo parede fina, canal macho)

O eletrodo confeccionado neste estudo de caso é formado por duas paredes finas e longas, não-retilíneas, e que possui em uma delas uma geometria de dimensão ainda mais reduzida, sobreposta no topo da parede. É uma saliência de 0,5 mm x 0,5 mm que se estende por todo o comprimento da parede, originando no produto eletroerodido uma ranhura no fundo da cavidade.

O estudo foi motivado pois houve uma tentativa de se usinar a geometria proposta em cobre eletrolítico, e o resultado não foi o esperado, havendo esmagamento do material, muita rebarba aderida à geometria e forma não uniforme da geometria.

Desbaste:

Ferramenta de topo reto de \varnothing 6 mm, com 2 dentes, de metal-duro revestido com TiAlN.

16.000 rpm

$v_f = 2.000$ mm/min ($f_z = 0,0625$ mm)

$$a_p = 0,5 \text{ mm}$$

$$a_e = 2,4 \text{ mm}$$

Acabamento 01:

Ferramenta de metal-duro revestida com TiAlN, de topo reto de $\varnothing 6 \text{ mm}$, com 2 dentes.

$$16.000 \text{ rpm}$$

$$v_f = 2.000 \text{ mm/min} (f_z = 0,0625 \text{ mm})$$

$$a_p = 6,5 \text{ mm}$$

$$a_e = 0,3 \text{ mm (sobremetal)}$$

Acabamento 02:

Nesta etapa é onde ocorre a confecção da saliência superior em uma das paredes (Figura 5.5). Utilizou-se na programação do movimento a direção concordante de corte, conforme resultados dos ensaios de contato ferramenta/material, com a ferramenta saindo totalmente da peça ao final do percurso, para depois mudar de sentido e executar a usinagem no outro lado da geometria.

Fez-se o uso de uma fresa de $\varnothing 6 \text{ mm}$, 2 dentes, topo reto, de metal-duro revestido com TiAlN.

$$16.000 \text{ rpm}$$

$$v_f = 2.000 \text{ mm/min} (f_z = 0,0625 \text{ mm})$$

$$a_p = 0,01 \text{ mm}$$

$$a_e = 0,25 \text{ mm}$$

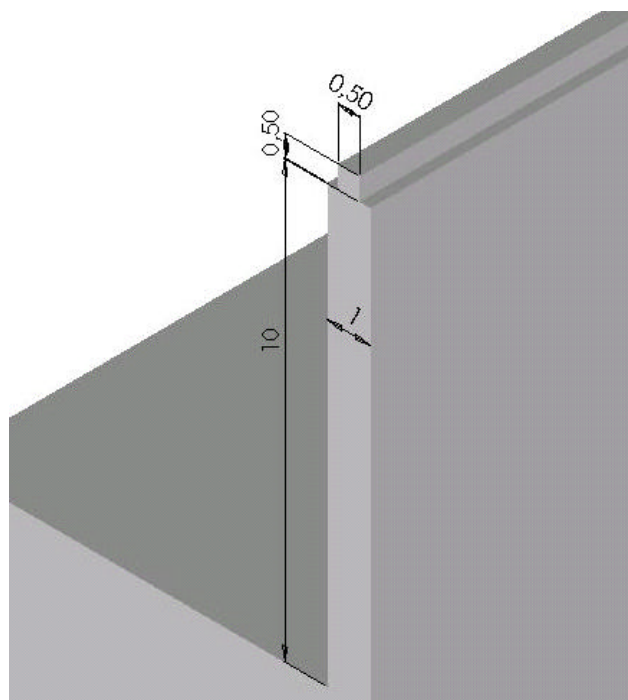


Figura 5.5 – Detalhe das dimensões da micro parede superior.

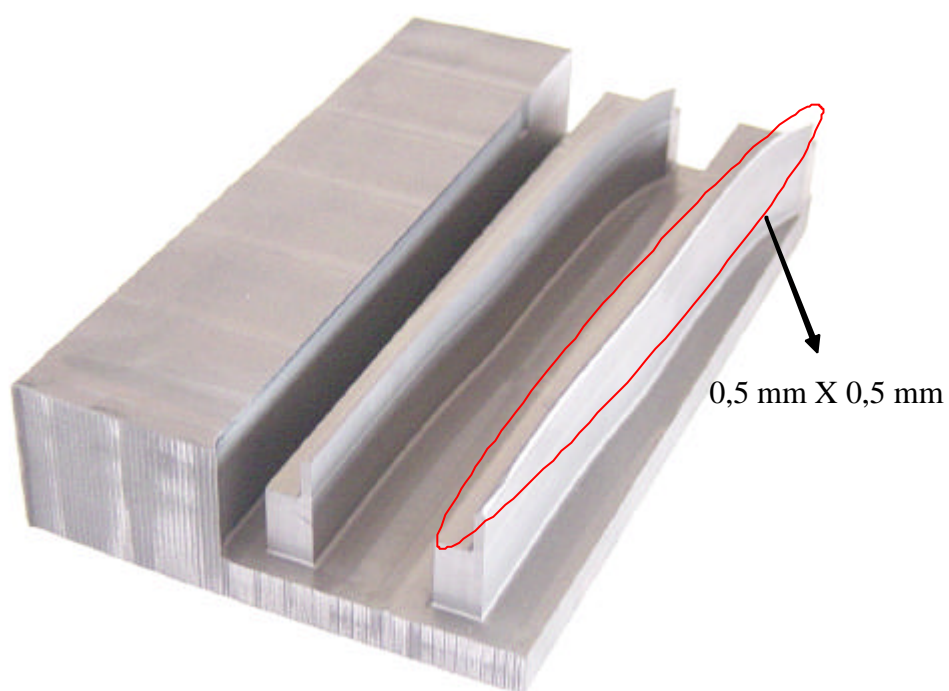


Figura 5.6 - Eletrodo 03, com detalhe da micro parede.

Com a estratégia de sair da peça com a ferramenta, para somente depois executar a mudança de sentido do movimento de corte, foi possível manter a integridade dos

cantos da saliência, pois estes eram de pequena dimensão, susceptíveis a sofrerem quebra.

Segundo a figura 5.6, o lado direito das geometrias possui as paredes maiores, mais suscetíveis a possuir marcas de vibração. Porém, devido as geometrias terem uma base maior, a vibração causada pela utilização de grande profundidade de corte axial é assim reduzida. A qualidade de superfície gerada nestas paredes não acusa nenhuma irregularidade.

5.4 Eletrodos Torre

O fresamento destes pequenos eletrodos em forma de torre (conforme figura 5.7, lado esquerdo), com dimensões de 0,8 mm X 1,0 mm X 15 mm, foi objeto de estudo para analisar alternativas de trajetórias de corte relacionadas a rigidez do material sob altas velocidades de corte, através de estratégias diferentes. Alguns movimentos de corte existem atualmente e são utilizados para confecção de eletrodos deste tipo (torre), em outros materiais, como cobre eletrolítico e ligas de alumínio.

Os parâmetros e ferramentas de corte foram os mesmos utilizados no fresamento do Eletrodo 03, relatado no item 5.3, somente o avanço por dente utilizado no acabamento foi menor, 0,025 mm.

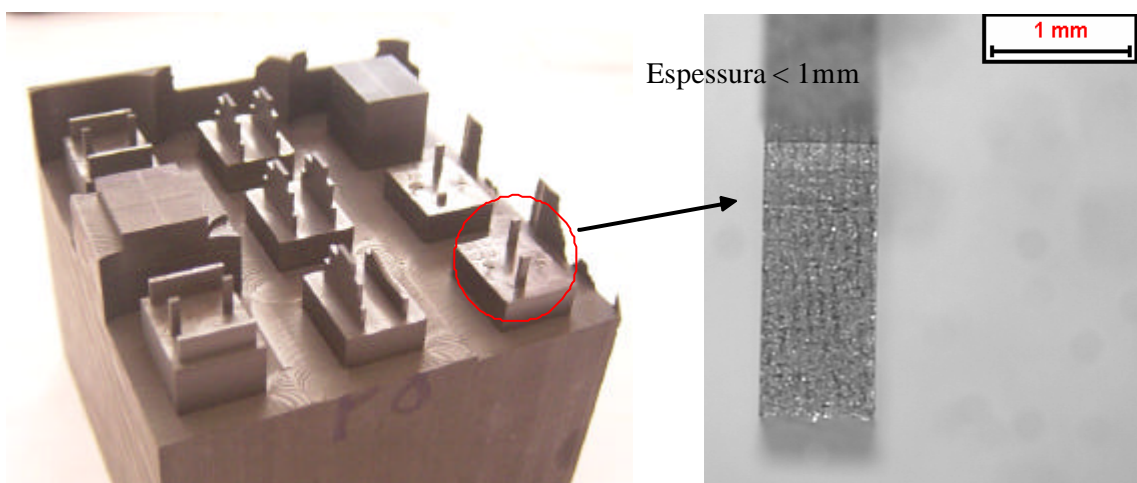


Figura 5.7 - Eletrodos torre fresados para análise de trajetórias de corte.

Segundo a estratégia de movimento de corte para paredes e geometrias de forma livre diversas, proposta por König [19], o sentido de movimento juntamente com a direção de corte discordante da ferramenta proporciona uma melhor qualidade superficial e maior vida de ferramenta.

A estratégia proposta consiste na movimentação contínua da ferramenta, executando uma mudança suave de sentido de corte em forma de arco saindo da peça, e já entrando novamente no sentido de corte a ser executado no próximo percurso (Figura 5.8).

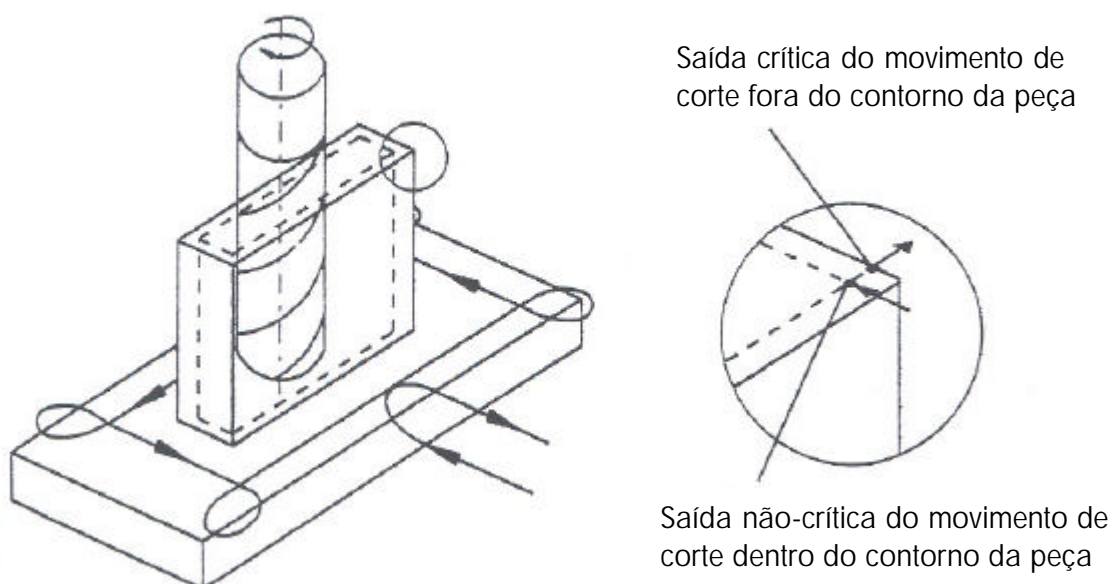


Figura 5.8 - Localização da quebra da borda na execução da estratégia, e trajetória do movimento em arco na saída de cada percurso.

Completando as vantagens tecnológicas propostas com esta estratégia, através dos ensaios realizados observou-se também o benefício sobre a qualidade de forma imposta por este conceito. Toda a problemática de quebra de cantos em direção discordante de corte também é verificada aqui, porém ela acontece na parte de fora do contorno de corte, sendo este material descartado como cavaco e não sendo parte da peça final.

Conforme a figura 5.7 pode-se observar a presença de torres intactas e algumas torres quebradas. As geometrias intactas foram usinadas seguindo a estratégia proposta,

ou seja, com a execução de um arco saindo da peça. As que sofreram fraturas foram usinadas de maneira usual, ou seja, com mudança de sentido de movimento da ferramenta seguindo a forma da geometria, de maneira normal sem executar nenhuma outra trajetória suavizante.

Devido à dimensão reduzida da peça e da característica frágil do material, a confecção deste tipo de geometria de eletrodo gera não somente as dificuldades descritas acima, mas também pode ocasionar a catástrofe total da geometria, por simples quebra, como verificado no estudo de caso relatado no item 5.2. Assim, movimentos de aproximação e recuo da ferramenta para o corte exigem especial atenção na programação das trajetórias.

6 Conclusões e Sugestões para Trabalhos Futuros

O objetivo principal deste trabalho foi obter informações sobre a usinabilidade da grafita industrial, aplicada ao processo de fresamento de eletrodos-ferramenta com superfícies de forma livre.

A partir da abrangência do objetivo do estudo, analisaram-se as características de contato ferramenta/material e seus resultados segundo a direção e movimento de corte executados pela ferramenta. A posição do corte em relação à geometria do eletrodo também foi alvo de análise.

Seguindo os objetivos do trabalho, analisou-se o acabamento superficial da grafita industrial em relação ao tipo de fresamento, frontal e periférico, e à direção de corte. Um estudo sobre vida de ferramenta também foi realizado, sendo que diferentes velocidades e direções de corte foram ensaiadas.

A respeito das exigências de acabamento superficial possíveis de atingir no fresamento de grafita, pôde-se concluir que:

- ✓ em processo de fresamento periférico recomenda-se a utilização de baixos avanços por dente, e em direção discordante de corte;
- ✓ para o fresamento frontal, o uso de baixas velocidades de corte e avanços por dente fornecem superfícies com menor rugosidade, independentemente da direção de corte utilizada;
- ✓ a programação de estratégias de corte em cavidades com ângulos de superfície de 45° e 75° , por exemplo, pode ser realizada de acordo com a maior conveniência para o programador em relação à direção de corte, pois verificam-se diferenças desprezíveis entre as direções concordante e discordante.
- ✓ O sentido ascendente do incremento 3D na superfície fornece uma rugosidade menor na grafita industrial.

A respeito de algumas características de contato ferramenta/material no fresamento de grafita, onde a integridade do material nas bordas da peça respeitando a geometria usinada foi o parâmetro de análise, pôde-se concluir que:

- ✓ em fresamento periférico, para qualquer profundidade radial de corte ($a_e < D/2$, $a_e = D/2$ e $a_e > D/2$), os melhores resultados são obtidos em direção de corte concordante;
- ✓ a entrada de ferramentas em fresamento frontal no material não exige direção de corte e profundidades radiais de corte preferenciais, visto que nenhuma das combinações possíveis causaram fraturas no material;
- ✓ a saída de ferramentas em fresamento frontal concordante causa somente microfaturas, de dimensão irrisória comparadas com as quebras causadas pelo movimento de saída em fresamento frontal discordante. Este provoca quebras proporcionais à profundidade radial de corte utilizada. Assim, para obter uma superfície com boa qualidade na saída da ferramenta, recomenda-se o corte em direção concordante com profundidade radial de corte $a_e = D/2$.

A saída da ferramenta de corte da peça também foi analisada em um estudo de caso (item 5.2 e 5.3), e os resultados vieram a comprovar os ensaios realizados, onde a integridade é mantida com corte em sentido concordante na saída.

No item 5.4, estudo de caso, foram estudadas duas diferentes maneiras de mudança no sentido de corte, onde foram confeccionadas pequenas "torres" e paredes. A mudança no sentido de corte com a realização de um arco de circunferência com a ferramenta ao sair da peça entrando novamente na outra borda, proporciona melhores resultados, sem a ocorrência de quebras.

O estudo da determinação da vida de ferramenta, analisando-se o mecanismo de desgaste das ferramentas de corte de metal-duro revestido, bem como sua evolução em relação à quantidade usinada, comparando-se diferentes velocidades e direções de corte, foi realizado neste trabalho em grafita industrial. A respeito da vida de ferramenta no processo de fresamento periférico de acabamento de grafita, pôde-se concluir que:

- ✓ altas velocidades de corte no processo provocam aumento na vida de ferramenta;
- ✓ com o uso combinado de altas velocidades de corte e direção discordante de corte, as ferramentas têm uma maior vida.

Conforme relatado, pode-se notar uma ambigüidade referente as conclusões acerca do processo de fresamento periférico de acabamento, onde para melhores resultados em integridade e qualidade de superfície propõe-se utilizar fresamento em direção de corte concordante. Contudo, para obter-se uma maior vida de ferramenta, a utilização de direção de corte discordante revela-se a melhor opção.

A escolha de qual direção de corte utilizar, frente as conclusões obtidas, poderá ser feita dependendo do objetivo a alcançar, boa qualidade e integridade de superfície ou uma maior vida de ferramenta.

Após o encerramento das atividades programadas para este trabalho, ficou evidente a necessidade de analisar mais profundamente alguns tópicos. Assim, sugerem-se alguns temas para próximos trabalhos, executados em grafita industrial:

- ✓ verificação do desempenho de ferramentas de diamante no processo de corte de grafita;
- ✓ estudo mais específico sobre geometrias de fresas de corte propícias para o fresamento de grafita;
- ✓ análise e testes de sistemas específicos para a coleta de resíduos da grafita (pó), onde o posicionamento ideal dos bocais de aspiração, encapsulamento da peça e outras características importantes para uma eficiente coleta do pó sejam testados;
- ✓ a microusinagem de grafita, com ferramentas de diâmetro ≤ 1 mm, onde as geometrias executadas também são pequenas, é um tema de estudo importante e de recomendável análise para o futuro, tendo em vista a evolução na fabricação de grafitas com granulometria submicrométrica.

7 Referências

- [1] WEINERT, K.; GUNTERMANN, G. Usinagem de superfícies complexas. **Máquinas e Metais**, São Paulo, n. 411, p. 50-60, abr. 2000.
- [2] **Materiais Condutores**. Disponível em: <http://www.labspot.ufsc.br/~jackie/cap3_new.pdf>. Acesso em: 10 outubro 2002.
- [3] DAHME, M.; UNSIN, F.; SCHRAMME, R. **Trends in der Herstellung für die Massivumformung durch HSC-Fräsen**. Disponível em: <http://www.hirschvogel.com/ger/specials/research/wb_trends_wz_massivumf_mod.pdf>. Acesso em: 14 outubro 2002.
- [4] KÖNIG, W.; KLOCKE, F.; KÖNIG, M. **Hochleistungszerspannung von Graphit. Produktion und Management**. n. 85. Berlin: Springer Verlag, 1995. 21 p.
- [5] ABELE, E., DÖRR, J. Ferramentas de corte protegidas contra a defasagem tecnológica. **Máquinas e Metais**, São Paulo, n. 439, p. 38-53, ago. 2002.
- [6] GOMES, J. O. **Fabricação de superfícies de forma livre por fresamento no aço temperado DIN 1.2083, na liga de alumínio (AMP 8000) e na liga de cobre (Cu-Be)**. 2001. 167p.. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) – Pós-graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis.
- [7] KÖNIG, W. **Fertigungsverfahren Band 3: Abtragen**. 4. ed. Düsseldorf: VDI Verlag, 1990. 416 p.

- [8] **Properties and characteristics of graphite**, Chapter 5. Disponível em: <www.poco.com/Library/edm/SG%20GERMAN.pdf>. Acesso em: 02 outubro 2002.
- [9] Disponível em: <www.crystalgraphite.com/graphite/graphiteproperties_B.html>. Acesso em: 31 outubro 2002.
- [10] **Contours and cleanliness motivate electrode-machining trends**. Disponível em: <<http://www.oarmoldworks.com/articles/article5.htm>>. Acesso em: 13 julho 2000.
- [11] NIEMINEN, I.; PARO, J.; KAUPPINEN, V. High-speed milling of advanced materials. **Journal of Materials Processing Technology**, n. 56, p. 24-36, 1996.
- [12] **Tips on machining graphite**. Disponível em: <<http://www.intech-edm.com/pdf/Spksw92.pdf>>. Acesso em: 04 outubro 2002.
- [13] DROZDA, T. J.; WICK, C. **Tool and manufacturing engineers handbook – Machining**, n. 4. v.1. Dearborn: Society of Manufacturing Engineers, 1983. p. 1.1-1.66, p. 10.1-10.76.
- [14] STEMMER, C. E. **Ferramentas de corte I**. 2. ed. Florianópolis: Editora da UFSC, 1995. 249 p.
- [15] STEMMER, C. E. **Ferramentas de corte II**. 2. ed. Florianópolis: Editora da UFSC, 1995. 314 p.

- [16] KÖNIG, W.; KLOCKE, F. **Fertigungsverfahren, Band 1: Drehen, Fräsen, Bohren**. 6. ed. Berlin: Springer Verlag, 1999. 471p.
- [17] FERRARESI, D. **Fundamentos da usinagem dos metais**. 5. ed. São Paulo: Editora Blücher, 1977. 751p.
- [18] MACEDO, S. E. M. **Análise de forças no fresamento de topo convencional e com altas velocidades de corte**. 2001. 109p.. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Pós-graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis.
- [19] KÖNIG, M. **Fräsbearbeitung von Graphitelektroden**. 1997. 134p.. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) - Rheinisch-Westfälischen Technischen Hochschule Aachen, Aachen, Alemanha.
- [20] NCG Recommendation. **Testing Guidelines and Testing Workpieces for High Speed Cutting, Part1**. Ulm: NC-Gesellschaft, 2000. 15 p.
- [21] SANDVIK-COROMANT. **Tools for Die and Mold Makers**. Estocolmo, 2000. 258 p.
- [22] MÜLLER, P. Disponível em: <<http://www.usinagem-brasil.com.br/artigostecnicos/artigostecnicos21.htm>>. Acesso em: 12 maio 2002.
- [23] GEIST, J.; FINZER, T. Influência dos Parâmetros de Usinagem HSC na Programação NC. **Máquinas e Metais**, São Paulo, n. 411, p. 30-49, abr. 2000.

- [24] KRATOCHVIL, R. **Considerações sobre Usinagem a Altas Velocidades**: Seminário Interno disciplina EMC 6314, maio de 2002. 23 p. Notas de aula.
- [25] VALLE, P. D. **Avaliação da influência da minimização e eliminação do fluido de corte no processo de fresamento de topo reto**. 2001. 129p.. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Pós-graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis.
- [26] **Machining Guides for Diabide Cutting Tools**. Disponível em: <<http://www.sp3inc.com/graphite.pdf>>. Acesso em: 10 fevereiro 2003.
- [27] WEINGAERTNER, W. L.; AMORIM, F. L. Vantagens do Eletrodo de Grafite em Regime de Acabamento em Liga de Alumínio. **Máquinas e Metais**, São Paulo, n. 438, p. 70-83, jul. 2002.
- [28] ASTAKHOV, V. P.; SHVETS, S. V.; OSMAN, M. O. M. Chip Structure Classification based on Mechanics of its Formation. **Journal of Materials Processing Technology**, n. 71, p. 247-257, 1997.
- [29] GOMES, J. O. Influências que Definem o Sucesso da Usinagem de Formas Complexas. **Máquinas e Metais**, São Paulo, n. 439, p. 76-105, ago. 2002.
- [30] ZELINSKI, P. **Where Dry Milling Makes Sense**. Disponível em: <www.mmsonline.com/articles/100002.html>. Acesso em: 10 fevereiro 2003.
- [31] **Specialty Graphites from SGL CARBON**. Disponível em: <www.sglcarbon.com/sg/custsup/mecha.php4>. Acesso em: 30 maio 2003.

- [32] BET, L. **Estudo da Medição da Textura de Superfícies com Sondas Mecânicas e com Sondas Ópticas Tipo Seguidor**. 1999. 243 p.. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) - Pós-graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis.
- [33] CAVALHEIRO, A. Z. **Sistematização do Planejamento da Programação via CAM do Fresamento de Cavidades de Moldes para Peças Injetadas**. 1998. 197p.. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Pós-graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis.
- [34] SILVA FILHO, M. S. **Fresamento por Regiões como uma Alternativa na Usinagem de Cavidades para Moldes de Injeção através de Sistemas CAD/CAM**. 2000. 121p.. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Pós-graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis.
- [35] NANNI, L. F.; RIBEIRO, J. L. **Planejamento e Avaliação de Experimentos**: Caderno de Engenharia, UFRGS, 1992. Porto Alegre. 2. ed. Notas de aula.
- [36] PAL, D. K.; MUKHERJEE, S. N. Wear Studies in Precision Machining of Graphite. **Precision Engineering**, v. 1, n. 1, p. 33-37, jan. 1979.
- [37] SILVA FILHO, M. S.; AHRENS, C. H.; CAVALHEIRO, A. Z. Uma Alternativa para Usinar Cavidades de Moldes de Injeção com CAD/CAM. **Máquinas e Metais**, São Paulo, n. 428, p. 94-105, set. 2001.
- [38] **Leistungssteigerung bei der NC-Fräsbearbeitung von Graphitelektroden – Handlungsanweisungen 1**. IPT/AIF – Forschungsvorhaben n 8366. Aachen. 1994.

- [39] GU, J.; BARBER, G.; TUNG, S.; GU, R. Tool Life and Wear Mechanism of Uncoated and Coated Milling Inserts. **Wear**, n. 225, p. 273-284, 1999.
- [40] RINGLER, K. Usinagem sem Pó de Eletrodos de Grafita. **Máquinas e Metais**, São Paulo, n. 422, p. 42-46, mar. 2001.
- [41] SCHROETER, R. B.; WEINGAERTNER, W. L. **Tecnologia da Usinagem com Ferramentas de Geometria Definida - Parte 1**. 2002. 355 p. Apostila. Notas de aula.
- [42] KLOCKE, F.; KNOTT, S.; WÜRTZ, C. Fresamento HSC de Cavidades em Aço Temperado. **Máquinas e Metais**, São Paulo, n. 402, p. 20-26, jul. 1999.
- [43] DE CASTRO, P. R. A. **Aspectos Tecnológicos da Usinagem a Seco e com Mínima Quantidade de Fluido de Corte na Furação com Broca Helicoidal**. 2001. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Pós-graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis.
- [44] MARKUS, W. **Aspectos Tecnológicos da Minimização e Eliminação de Fluido de Corte no Processo de Torneamento com Insertos de Metal-duro Revestido com TiN**. 2001. 113p.. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Pós-graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis.
- [45] MORI, R. N. **Microusinagem de Juntas Metal/Cerâmica**. 2003. Qualificação (Doutorado em Engenharia Mecânica) - Pós-graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis.

- [46] AMORIM, F. L. **Tecnologia de Eletroerosão por Penetração da Liga de Alumínio AMP 8000 e da Liga de Cobre CuBe para Ferramentas de Moldagem de Materiais Plásticos**. 2002. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) - Pós-graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis.
- [47] **Copper vs. Graphite**. Disponível em: <<http://www.oarmoldworks.com/articles/article5.htm>>. Acesso em: 05 novembro 2003.
- [48] **Manufacturing Process**. Disponível em: <http://www.ttu.com/Continuous_Casting.html>. Acesso em: 23 março 2003.
- [49] POLLI, M. L. **Análise da Estabilidade Dinâmica do Processo de Fresamento a Altas Velocidades**. 2002. Qualificação (Doutorado em Engenharia Mecânica) - Pós-graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis.
- [50] MONTGOMERY, D. C. **Design and Analysis of Experiments**. 4. ed. Phoenix: John Wiley & Sons, 1996. 704 p.
- [51] INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **ISO 8688-2: Tool life testing in milling – End milling**. Genève, 1989. 26 p.