

**UNIVERSIDADE DE CAXIAS DO SUL
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E DA TECNOLOGIA
CURSO DE ENGENHARIA MECÂNICA**

CASSIANO ZANELLA

**AVALIAÇÃO DA INFLUÊNCIA DA VELOCIDADE DE CORTE, AVANÇO POR
GUME E REVESTIMENTO DE FERRAMENTA NO FRESAMENTO DE
ELETRODOS DE GRAFITE**

**CAXIAS DO SUL
2015**

CASSIANO ZANELLA

**AVALIAÇÃO DA INFLUÊNCIA DA VELOCIDADE DE CORTE, AVANÇO POR
GUME E REVESTIMENTO DE FERRAMENTA NO FRESAMENTO DE
ELETRODOS DE GRAFITE**

Relatório de Estágio II, apresentado a Universidade de Caxias do Sul como requisito parcial para obtenção do título de Engenheiro Mecânico no Curso de Engenharia Mecânica.

Orientador Prof. Dr. Rodrigo Panosso Zeilmann

CAXIAS DO SUL

2015

CASSIANO ZANELLA

**AVALIAÇÃO DA INFLUÊNCIA DA VELOCIDADE DE CORTE, AVANÇO POR
GUME E REVESTIMENTO DE FERRAMENTA NO FRESAMENTO DE
ELETRODOS DE GRAFITE**

Relatório de Estágio II, apresentado a
Universidade de Caxias do Sul como
requisito parcial para obtenção do título de
Engenheiro Mecânico no Curso de
Engenharia Mecânica.

Aprovado em 25/06/2015.

Banca Examinadora



Prof. Dr. Rodrigo Panosso Zeilmann
Universidade de Caxias do Sul – UCS



Prof. Me. Gerson Luiz Nicola
Universidade de Caxias do Sul – UCS



Prof. Me. Adelair Lino Colombo
Universidade de Caxias do Sul - UCS

Dedico este trabalho aos meus pais, irmã e namorada pelo carinho e apoio que me deram em todos os momentos.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente à minha família, que sempre esteve ao meu lado me dando apoio e força em todos os momentos da minha vida. Meus pais, Sérgio e Helena, pelo exemplo de trabalho, honestidade e dedicação. Minha irmã, Franciele, pelo auxílio em diversos momentos.

À minha namorada Fernanda pelo companheirismo, afeto e compreensão durante esta jornada.

Ao meu orientador, Prof. Dr. Rodrigo Panosso Zeilmann, pelo apoio, amizade e conhecimentos transmitidos.

À empresa Sulbras Moldes e Plásticos Ltda por permitir a realização dos experimentos deste trabalho, principalmente ao Gerente de Ferramentaria e Desenvolvimento Rafael Dannenhauer pelo auxílio, amizade, incentivo e exemplo de profissionalismo.

Aos amigos Eng. Tiago Scopel, Eng. Silvane Jahn e Rodrigo Melo pelo apoio, amizade e contribuição para a realização deste trabalho.

Aos amigos Alberto D'Ávila, Anderson Lima e Bruno Sates pela amizade e apoio em todas as horas.

Enfim, a todos que de alguma forma me ajudaram nesta jornada, meu sincero agradecimento.

RESUMO

Devido à crescente necessidade de confecção de moldes com prazos e custos cada vez menores, as ferramentarias precisam se adequar ao mercado e devem melhorar os seus processos de fabricação. Um dos processos mais críticos no que diz respeito à precisão dimensional e tempo para confecção de um molde é a usinagem de eletrodos. A utilização de grafite como matéria-prima para os eletrodos vem sendo altamente satisfatória, já que este material possui como qualidade a rápida usinagem e a possibilidade de grandes variedades geométricas. Visto que este material possui como desvantagem o alto nível de desgaste em ferramentas durante a sua usinagem, este trabalho avaliou o comportamento do desgaste de flanco e do acabamento do grafite perante a variação dos parâmetros velocidade de corte, avanço por gume e revestimento. A combinação de parâmetros que gerou o menor desgaste de flanco foi com a utilização da velocidade de corte de 700 m/min, avanço por gume de 0,07 mm/gume e revestimento diamantado, sendo que o parâmetro que mais influenciou no desgaste foi o revestimento da ferramenta. Com relação ao acabamento, os parâmetros que geraram a menor rugosidade foram a utilização da velocidade de corte de 400 m/min, avanço por gume de 0,04 mm/gume e revestimento diamantado, sendo que o parâmetro que mais influenciou no acabamento foi o avanço por gume. O principal mecanismo de desgaste foi a abrasão.

Palavras-chave: Usinagem, desgaste, rugosidade.

ABSTRACT

Due to the growing need in the mold production market of producing with small deadlines and increasingly lower costs, the tooling companies felt the need to adjust to the market and improve their manufacturing processes. One of the most critical processes regarding the dimensional precision and production time of a mold is the electrodes machining process. The usage of graphite as raw material has been highly satisfactory, considering how quickly is machined and the great varieties of geometrical forms. Considering that the graphite has a high level of wearing during the machining process and this is its main disadvantage, this study has evaluated the behavior of the flank wearing and the graphite finish against variations such as cutting speed, feed per tooth and coating tools. The combination of parameters that generated the lowest flank wear was the use of cutting speed of 700 m/min, feed per tooth 0.07 mm/tooth and a diamond coating, where the parameter that most influenced the wear was coating tool. Regarding the finish, the parameters that generated the lower surface roughness were obtained using the cutting speed of 400 m/min, feed per tooth 0.04 mm/tooth and a diamond coating, where the parameter that most influenced the finish was feed per tooth. The main wearing mechanism was the abrasion.

Keywords: Machining, wear, finish.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Representação esquemática do mecanismo de formação de cavaco ...	18
Figura 2 – Tipos de avarias e desgastes nas ferramentas de corte.	19
Figura 3 – Formas de desgastes e grandezas a serem medidas na cunha de corte.	20
Figura 4 – Causas do desgaste no processo de corte.	21
Figura 5 – Parâmetros de rugosidade	23
Figura 6 – Fresamento concordante e discordante	25
Figura 7 – Força de corte no fresamento concordante e discordante	26
Figura 8 – Mecanismo de formação de cavaco.....	27
Figura 9 – Resultante de forças na formação do cavaco	27
Figura 10 – Etapas de fabricação do grafite industrial	29
Figura 11 – Condições de corte para diferentes ângulos de saída de cavaco	32
Figura 12 – Comparação entre diferentes ferramentas e revestimentos na usinagem de grafite	34
Figura 13 – Centro de usinagem e Aspirador de pó.....	37
Figura 14 – Sistema de fixação do grafite	38
Figura 15 – Sistemas para medição e geração das imagens.....	38
Figura 16 – Fotografia do fresamento realizado nos testes	40
Figura 17 – Comportamento da curva de vida das ferramentas de metal duro com revestimento TiAlN	41
Figura 18 – Comportamento da curva de vida das ferramentas de metal duro com revestimento PCD	42
Figura 19 – Comportamento da curva de vida das ferramentas de metal duro com revestimento PCD (escala menor)	43
Figura 20 – Gráfico de Pareto dos efeitos padronizados para o desgaste de flanco	44
Figura 21 – Influência do revestimento, avanço por gume e velocidade de corte no desgaste de flanco	44
Figura 22 – Imagens dos desgastes das ferramentas de metal duro com revestimento TiAlN	45
Figura 23 – Representação esquemática do desgaste de cratera e entalhe gerados durante a usinagem.....	46

Figura 24 – Imagens dos desgastes das ferramentas de metal duro com revestimento PCD	47
Figura 25 – Comportamento das rugosidades dos blocos de grafite	47
Figura 26 – Gráfico de Pareto dos efeitos padronizados para o acabamento.....	48
Figura 27 – Influência do revestimento, avanço por gume e velocidade de corte no acabamento.....	49

LISTA DE SIGLAS

AlCrN	Nitreto de Cromo Alumínio
Al ₂ O ₃	Óxido de Alumínio
CAM	<i>Computer Aided Manufacturing</i>
CNC	<i>Computer Numeric Control</i>
CVD	<i>Chemical Vapour Deposition</i>
EDM	<i>Electrical Discharge Machining</i>
HSM	<i>High Speed Machining</i>
PCD	<i>Polycrystalline Diamond</i>
TiAlN	Nitreto de Alumínio Titânio
TiC	Carboneto de Titânio
TiCN	Carbonitreto de Titânio
TiN	Nitreto de Titânio

LISTA DE SÍMBOLOS

a_e	[mm]	Passo lateral
a_p	[mm]	Profundidade de corte
f_z	[mm/gume]	Avanço por gume
l	[mm]	Comprimento total da ferramenta
l/d	[mm]	Balanço da ferramenta
l_e	[mm]	Comprimento de amostragem
l_m	[mm]	Percurso de medição
R_a	[μm]	Rugosidade R_a
R_y	[μm]	Rugosidade R_y
R_z	[μm]	Rugosidade R_z
r_ϵ	[mm]	Raio de quina da ferramenta
r_β	[μm]	Raio do gume
V_b	[mm]	Largura média de desgaste do flanco
$V_{b_{\text{máx}}}$	[mm]	Largura máxima de desgaste
v_c	[m/min]	Velocidade de corte
v_f	[mm]	Velocidade de avanço
y	[mm]	Posição da linha média do perfil de rugosidade
z		Número de gumes
z_i	[μm]	Rugosidade parcial
α		Nível de significância
λ	[$^\circ$]	Ângulo de hélice do gume principal

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	13
1.1	APRESENTAÇÃO DO AMBIENTE DE ESTÁGIO.....	14
1.2	JUSTIFICATIVA DO TRABALHO.....	14
1.3	OBJETIVOS	15
1.3.1	Objetivo geral	15
1.3.2	Objetivos específicos	15
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA EM PROCESSOS DE USINAGEM	16
2.1	USINABILIDADE	16
2.1.1	Formação de cavaco	16
2.1.2	Mecanismos e tipos de desgastes	18
2.1.3	Acabamento	22
2.2	FRESAMENTO	24
2.2.1	Fresamento de grafite	26
2.2.1.1	Propriedades e aplicações do grafite	28
2.2.1.2	Desgastes no fresamento de grafite.....	30
2.2.1.3	Ferramentas para usinagem de grafite.....	31
2.2.1.3.1	<i>Materiais para ferramentas</i>	32
2.2.1.3.2	<i>Revestimentos</i>	34
3	ETAPAS DE IMPLEMENTAÇÃO DO TRABALHO	36
3.1	MATERIAIS E EQUIPAMENTOS	36
3.1.1	Ferramentas de corte	36
3.1.2	Corpos de prova	37
3.1.3	Equipamentos	37
3.2	ENSAIOS EXPERIMENTAIS	39
3.2.1	Parâmetros de corte	39
3.2.2	Procedimento de análise	39
4	ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS	41
4.1	DESGASTES DAS FERRAMENTAS	41
4.1.1	Avaliação dos desgastes das ferramentas	45
4.2	ACABAMENTO	47
4.2	CUSTOS DE USINAGEM	49
5	CONCLUSÕES	51

6	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	53
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	54
	APÊNDICE A – MATRIZ DE PLANEJAMENTO E RESULTADOS DOS EXPERIMENTOS.....	57

1 INTRODUÇÃO

A economia mundial vem se direcionando para a necessidade de produtos com prazos de lançamentos e custos menores, objetivando um mercado cada vez mais competitivo. Neste cenário, a confecção de moldes e matrizes para injeção de plásticos ganha cada vez mais espaço, devido à possibilidade de produção de componentes seriados, com alto grau de confiabilidade e baixos prazos de entrega (HELLENO; SCHUTZER, 2004). Segundo Arias (2009), a demanda por produtos plásticos cresceu de forma expressiva e representa um consumo de 35% de todo o polímero produzido no país.

De acordo com Guerra (2014), devido ao programa federal Inovar-Auto, a demanda das ferramentarias no Rio Grande do Sul pode dobrar, sendo necessária a melhoria de todos os processos produtivos, além da abertura de novas empresas. Atualmente, são 500 ferramentarias no estado, sendo que Caxias do Sul e Joinville concorrem entre si para ocupar o posto de segundo maior polo de ferramentarias do Brasil, onde São Paulo ocupa a primeira posição.

Uma forma das ferramentarias conseguirem realizar todo este volume de trabalho previsto e serem mais competitivas no mercado, é atuar na redução dos tempos e melhorias nos processos de fabricação dos moldes. Conforme Boujelbene et al. (2003), o custo de fabricação de um molde para uma peça em polímero, representa aproximadamente 30% do custo total do produto.

Usualmente, para a fabricação de um molde, utilizam-se principalmente os processos de fresamento e eletroerosão por descargas elétricas (EDM – *Electrical Discharge Machining*). A fase de confecção dos eletrodos é um dos processos mais críticos, devido à necessidade de alta precisão dimensional, exigência da qualidade superficial e elevado tempo gasto para a confecção dos mesmos. Esta alta exigência se deve ao fato de ser o eletrodo a ferramenta utilizada na EDM. Na sua maior parte, os eletrodos são confeccionados em cobre ou grafite.

O grafite está gradativamente tomando espaço nas ferramentarias por se tratar de um material de fácil e rápida usinagem, além de possuir taxas de remoção maiores no processo de eletroerosão, se comparado ao cobre.

1.1 APRESENTAÇÃO DO AMBIENTE DE ESTÁGIO

A Sulbras Moldes e Plásticos iniciou suas atividades em 1984, no bairro Jardim Eldorado, com o objetivo de realizar testes de moldes novos e injeção de peças plásticas. Em 1990 a empresa mudou-se para uma nova localização, no mesmo bairro, onde hoje ocupa uma área construída de 5.500 m² e conta com aproximadamente 640 colaboradores.

Além da matriz, a Sulbras possui mais três unidades fabris, estas localizadas nas cidades de Sapucaia do Sul - RS, em Salto - SP e em Joinville - SC. A ferramentaria, dedicada para desenvolvimento e confecção de moldes, está situada apenas na unidade de Caxias do Sul.

A Sulbras é uma empresa especializada no desenvolvimento e construção de moldes, em soluções de peças técnicas e subconjuntos de plásticos moldados por injeção, atendendo variados segmentos de mercado, como as linhas automotivas, de eletrodomésticos e eletroeletrônicos.

O presente estágio foi desenvolvido junto ao setor de Ferramentaria de construção de moldes, sendo este capacitado para prestar assessoria técnica e atuar em todo o ciclo de desenvolvimento de moldes. Este ciclo compreende desde a engenharia simultânea do produto, o projeto e a ferramenta, até as aprovações de capacidade do processo produtivo. Este setor possui máquinas, equipamentos atualizados e mão-de-obra altamente qualificada, o que é exigido devido ao alto nível técnico necessário para a confecção dos moldes. As principais atividades realizadas neste setor são a usinagem em centros de usinagem CNC e eletroerosão.

1.2 JUSTIFICATIVA DO TRABALHO

O processo de usinagem de eletrodos em grafite na Sulbras aloca, atualmente, toda a capacidade de um centro de usinagem CNC. Esta alocação representa uma média de 440 horas mensais ou 25% da capacidade de operação dos centros de usinagem CNC da empresa, sendo esta máquina, o principal gargalo do processo produtivo do setor da ferramentaria. Outro ponto está relacionado ao custo, já que são gastos aproximadamente R\$ 8.000,00 por mês em ferramentas apenas para a operação de usinagem deste material, sendo o processo que mais consome ferramentas de usinagem.

Devido a estes pontos, faz-se necessário um estudo para avaliar a influência dos parâmetros de corte e revestimentos de ferramentas na usinagem de grafite, a fim de obter um maior domínio sobre este processo, reduzindo seus tempos e custos de fabricação.

1.3 OBJETIVOS

1.3.1 Objetivo geral

Avaliar a influência das variáveis velocidade de corte, avanço por gume e revestimento de ferramenta na usinagem de eletrodos de grafite.

1.3.2 Objetivos específicos

Os objetivos específicos, a fim de se atingir o objetivo geral, foram definidos como:

- a) Realizar ensaios experimentais para verificar e medir os desgastes das ferramentas.
- b) Medir a rugosidade das superfícies usinadas.
- c) Definir a velocidade de corte e o avanço por gume adequados dentre os previamente definidos.
- d) Realizar ensaios experimentais para comparar os diferentes revestimentos nas fresas.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA EM PROCESSOS DE USINAGEM

2.1 USINABILIDADE

Usinabilidade pode ser definida como o grau de dificuldade em usinar um material específico, onde esta é normalmente analisada com relação à formação de cavaco, vida da ferramenta, qualidade superficial e forças de corte (WEINGAERTNER, 1994).

De acordo com Klocke e König (2008), o processo de usinagem é definido através da realização do corte de um material, onde camadas deste material são separadas mecanicamente de uma peça sob a forma de cavacos, através do emprego de uma ferramenta de corte. Quando se inicia o processo de corte, o gume da cunha da ferramenta penetra no material da peça, que se deforma elasticamente e plasticamente. Após ultrapassar a tensão de cisalhamento máxima do material, o mesmo começa a escoar. O material deformado passa a formar cavacos, que deslizam sobre a face da cunha de corte da ferramenta.

Segundo Ferraresi (1977), o objetivo da usinagem é conferir forma, dimensões e acabamento em um material bruto, através da ação de uma ferramenta pela remoção controlada de cavaco.

2.1.1 Formação de cavaco

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 fenômenos físico-químicos que comandam desgastes nas ferramentas, como as reações químicas, desgastes abrasivos e difusões (DAVIES, 1999 apud POLLI, 2002).

Desta forma, de acordo com Diniz, Marcondes e Coppini (2003), os aspectos econômicos, qualidade da peça, segurança do operador e utilização adequada da máquina estão diretamente envolvidos com o processo de formação de cavaco.

Na usinagem de materiais dúcteis, que possuem grande zona plástica nas condições normais de usinagem com ferramentas de metal duro ou de aço rápido, a formação do cavaco ocorre da seguinte forma (DINIZ; MARCONDES; COPPINI, 2003):

1. Uma parcela do material, ainda fixa à peça, é recalçada (deformações plásticas e elásticas), contra a superfície de saída da ferramenta;
2. A deformação plástica aumenta progressivamente, até que as tensões de cisalhamento se tornem elevadas ao ponto de se iniciar um deslizamento (sem que haja perda de coesão), entre a porção de material recalçada e a peça;
3. Ao continuar a penetração da ferramenta, ocorre um cisalhamento parcial ou completo do cavaco. Este depende da ductilidade do material e das condições de usinagem;
4. Na sequência, devido ao movimento relativo entre a ferramenta e a peça, ocorre um escorregamento da porção do material deformado e cisalhado (cavaco), sobre a superfície de saída da ferramenta. Enquanto isso, outra porção de material está se formando e cisalhando, repetindo o fenômeno.

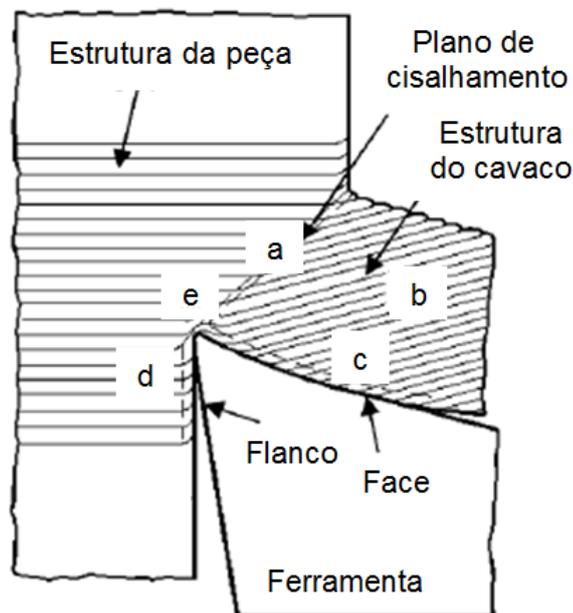
Na usinagem de materiais frágeis, que possuem zona plástica pequenas, as fases 1 e 2 descritas acima são bem curtas. Na fase 3 a ruptura do cavaco é total (não somente da peça, mas também das porções anteriores e posteriores de cavaco). A fase 4 é praticamente inexistente, já que o cavaco formado sai rapidamente da região de corte, não atritando com a superfície de saída da ferramenta (DINIZ; MARCONDES; COPPINI, 2003).

Segundo Klocke e König (2008), a deformação plástica contínua na raiz do cavaco pode ser dividida em cinco regiões, conforme pode ser visualizado na representação esquemática do mecanismo de formação de cavaco (Figura 1). A transição a partir da estrutura da peça de trabalho, região “a”, e a estrutura do cavaco, região “b”, é realizada através do plano de cisalhamento. Na usinagem de materiais frágeis, pode ocorrer uma deformação plástica na região de cisalhamento, que leva à separação do material. Se o material tem uma capacidade de deformação maior, a separação ocorre imediatamente diante do gume, na região “e”. A solicitação de tração, simultânea à aplicação de uma pressão vertical sobre a

ferramenta, combinada com as temperaturas elevadas, leva a deformações na camada inferior do cavaco, região “c”, e na superfície de corte, região “d”.

Os cavacos produzidos podem apresentar diversos aspectos distintos, dependendo da profundidade de corte (a_p), velocidade de corte (v_c), da velocidade de avanço (v_f), material da peça, geometria da ferramenta, fluido de corte, entre outros fatores (STEMMER, 1995a).

Figura 1 – Representação esquemática do mecanismo de formação de cavaco



Fonte: Nicola (2008)

Tendo-se como base a tecnologia da usinagem, as formas dos cavacos podem ser classificadas em três tipos básicos: cavaco contínuo, cavaco cisalhado e cavaco de ruptura (FERRARESI, 1977).

O principal fator determinante do tipo de cavaco é o material da peça usinada. De forma geral, materiais dúcteis, como aços e alumínio, formam cavacos contínuos ou de cisalhamento, e materiais frágeis, como ferro fundido e grafites, formam cavacos de ruptura (DINIZ; MARCONDES; COPPINI, 2003).

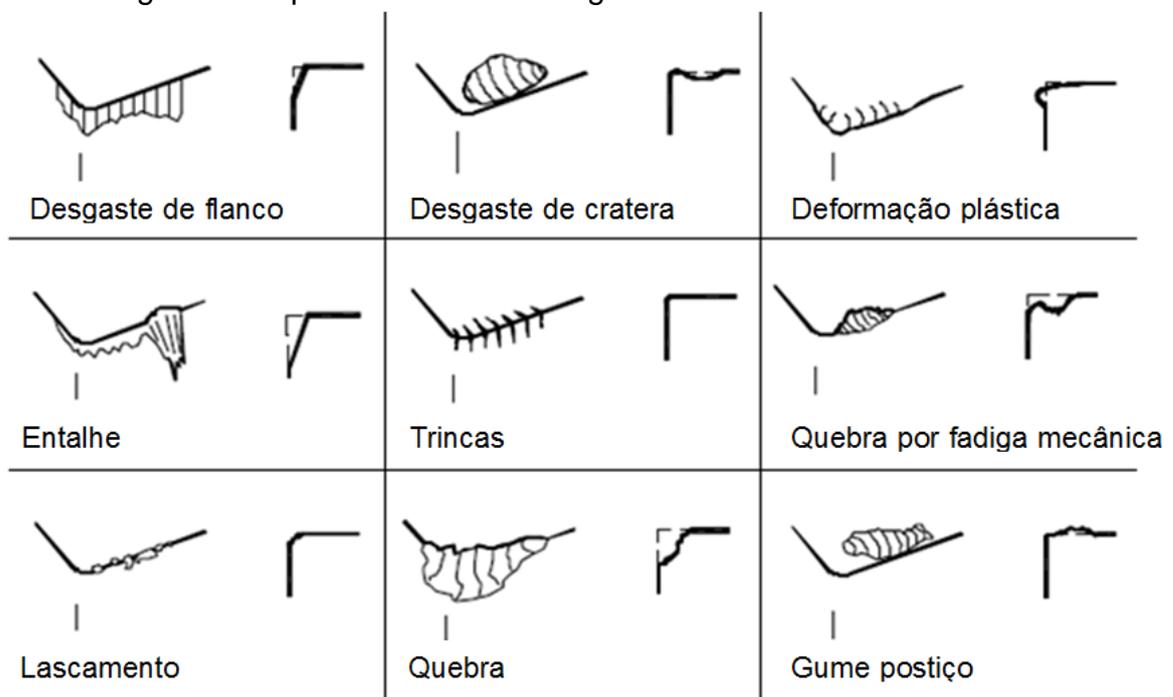
2.1.2 Mecanismos e tipos de desgastes

Segundo Diniz, Marcondes e Coppini (2003), durante o processo de usinagem, a ferramenta de corte é solicitada térmica e mecanicamente. Devido ao

material da peça e da ferramenta não serem homogêneos, diversas avarias e desgastes de naturezas distintas podem ser observadas na ferramenta de corte ao longo de sua utilização, como pode ser visualizado na Figura 2. Dentre elas, as principais são: deformação plástica do gume, lascamentos, trincas, desgaste de entalhe, desgaste de flanco e desgaste de cratera.

De forma a evitar o colapso total da ferramenta, é fundamental estipular os limites destas avarias e desgastes (KLOCKE; KÖNIG, 2008).

Figura 2 – Tipos de avarias e desgastes nas ferramentas de corte.



Fonte: Adaptado de Sandvik apud Markus (2001)

A deformação plástica ocorre quando a pressão aplicada à ponta da ferramenta, somada a altas temperaturas, gera uma deformação plástica do gume de corte (FERRARESI, 1977).

No lascamento ocorre a quebra de pequenos fragmentos do gume durante o corte, principalmente em ferramentas com material frágil ou quando o gume é frágil (KLOCKE; KÖNIG, 2008).

As trincas são causadas pela variação da temperatura ou pela variação dos esforços mecânicos. Quando as trincas possuem origem mecânica, elas ocorrem paralelas ao gume e, quando possuem origem térmica, são perpendiculares ao gume de corte (LIMA; MELO, 2013; FERRARESI, 1977).

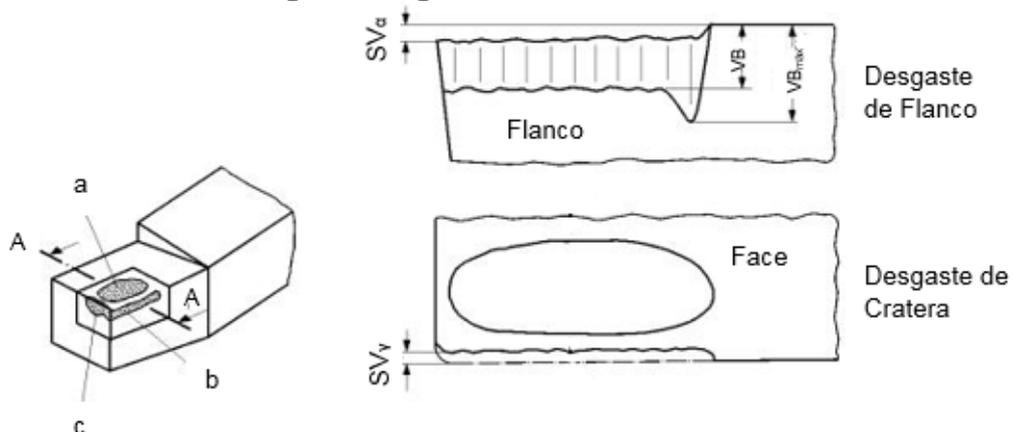
O desgaste de entalhe ocorre na região de interface peça/ferramenta/cavaco, no lado exposto da superfície de corte. A geração do entalhe ocorre devido à ação das rebarbas produzidas nas bordas dos cavacos, as quais apresentam uma taxa de encruamento maior que na parte central do mesmo. Esta região acaba possuindo uma dureza mais elevada, o que envolve um mecanismo de aderência e arrancamento. Na região da formação do entalhe, a ferramenta também é submetida à ação oxidante da atmosfera (KLOCKE; KÖNIG, 2008).

O desgaste de flanco é o tipo de desgaste mais comum. Ocorre na superfície de folga da ferramenta, causado pelo contato entre ferramenta e peça. Pode ocasionar deterioração do acabamento superficial e variações no dimensional da peça (DINIZ; MARCONDES; COPPINI, 2003).

O desgaste de cratera é o tipo de desgaste que acontece na superfície de saída da ferramenta, causado pelo atrito entre ferramenta e cavaco (DINIZ; MARCONDES; COPPINI, 2003).

Segundo Klocke e König (2008), na região do flanco da ferramenta, onde gera-se o desgaste de flanco, são medidas a largura média do desgaste VB e a largura máxima da marca de desgaste $VB_{máx}$. As grandezas de desgastes avaliadas estão representadas na Figura 3.

Figura 3 – Formas de desgastes e grandezas a serem medidas na cunha de corte.

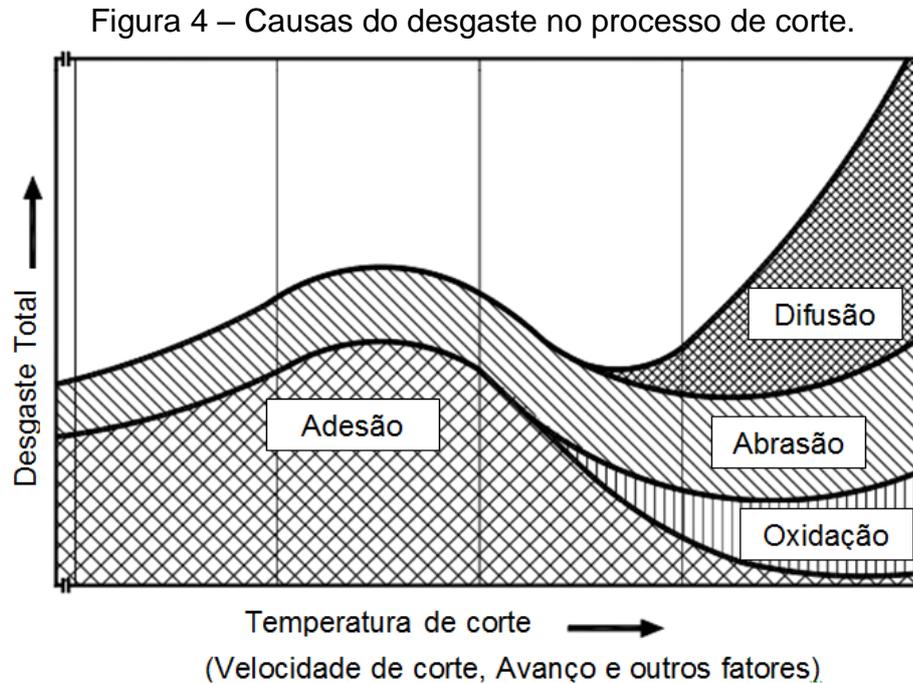


- a Desgaste de cratera
- b Desgaste de flanco no gume principal
- c Desgaste de flanco no gume secundário

- SV_y Deslocamento do gume no sentido da face
- SV_x Deslocamento do gume no sentido do flanco
- VB Desgaste de flanco

Fonte: Kratochvil (2004)

De acordo com Klocke e König (2008), diversos são os mecanismos causadores dos desgastes nas ferramentas. Os principais são: adesão, abrasão mecânica, difusão e oxidação. A Figura 4 indica a faixa de temperatura de corte em que cada mecanismo tem maior atuação.



Fonte: Adaptado de Klocke e König (2008)

A adesão entre as asperezas superficiais da ferramenta e o material da peça se deve devido à ação da temperatura e das altas pressões presentes na zona do corte. A superfície inferior do cavaco, recém arrancado, apresenta-se limpa, sem camadas protetoras de óxidos e, portanto, quimicamente muito ativa. Um exemplo deste fenômeno é a formação do gume postiço, que é formado por partículas que se soldam na face da ferramenta e apresentam elevado grau de deformação a frio. Este fenômeno dificulta o deslizamento do cavaco, fazendo com que haja um maior recalque do mesmo. O acréscimo do atrito provoca um aumento progressivo da forma de deslizamento do cavaco, até que as partículas soldadas sejam arrancadas. Este desprendimento pode acabar arrastando partes da ferramenta, ocasionando o desgaste da mesma (STEMMER, 1995a).

A abrasão mecânica ocorre devido ao efeito abrasivo de partículas duras fixas na superfície de contato da peça ou no cavaco, em decorrência das altas pressões e

temperaturas entre a peça e a ferramenta. O desgaste abrasivo ocorre em todas as faixas de velocidades de corte (KLOCKE; KÖNIG, 2008; STEMMER, 1995a).

O mecanismo de difusão é um fenômeno microscópico, que ocorre em altas temperaturas na zona de corte, onde as moléculas adquirem certa mobilidade. A difusão no estado sólido consiste na transferência de átomos de um metal para outro. A transferência dos átomos de ferro da peça para a ferramenta, principalmente se esta for de metal duro, muda as condições de equilíbrio entre os elementos constituintes da mesma, levando a uma reação química entre eles. Este mecanismo é o principal responsável pelo desgaste de cratera (KLOCKE; KÖNIG, 2008; DINIZ; MARCONDES; COPPINI, 2003).

Altas temperaturas e a presença de ar e/ou água geram oxidação para a maioria dos metais. O desgaste gerado pela oxidação se forma especialmente nas extremidades do contato cavaco-ferramenta, devido ao acesso do ar nesta região, sendo esta uma possível explicação para o surgimento do desgaste de entalhe (DINIZ; MARCONDES; COPPINI, 2003; STEMMER, 1995a).

2.1.3 Acabamento

As propriedades de superfície constituem uma medida importante da qualidade dos componentes usinados, pois influenciam características como: precisão dimensional, desgaste, aparência, coeficiente de atrito e custo. Uma das análises mais comumente utilizadas para esta avaliação é a medição da rugosidade da superfície (LIMA; MELO, 2013; VAKONDIOS et al., 2012).

A rugosidade pode ser definida como um conjunto de irregularidades causadas pelo processo de fabricação, caracterizadas por pequenas saliências e reentrâncias na topografia da superfície (HAMDAM; SARHAN; HAMDY, 2012).

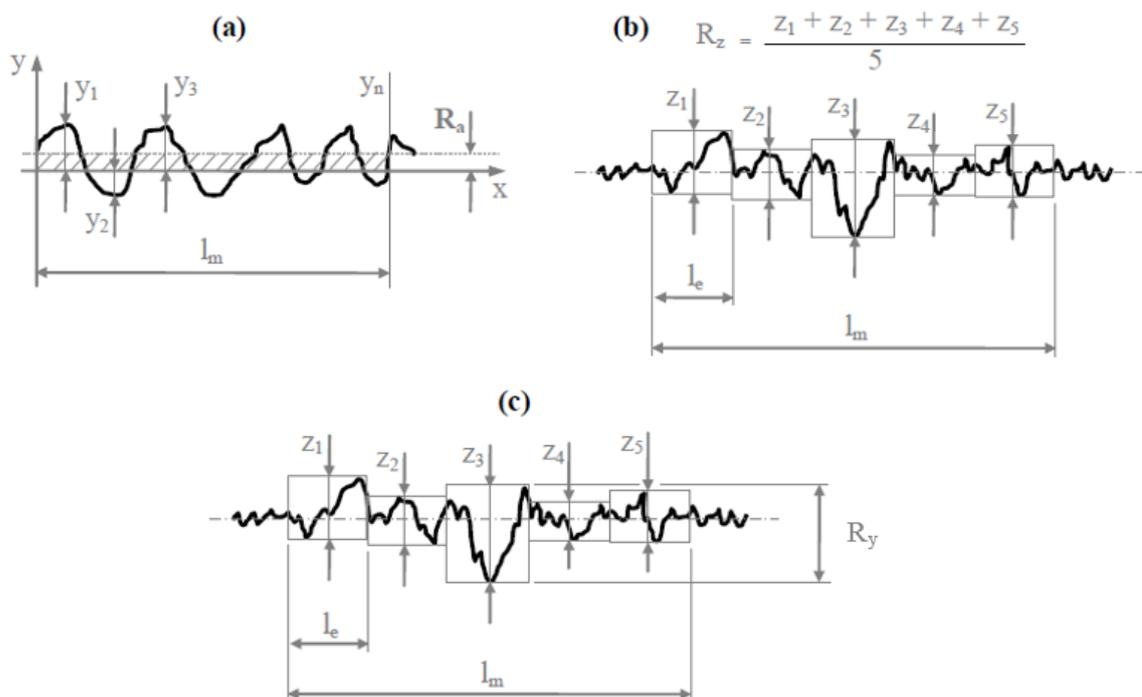
Alguns elementos possuem influência direta sob a rugosidade superficial, como por exemplo: parâmetros de corte, estratégias de usinagem, material da ferramenta e da peça, desgaste e geometria da ferramenta e posicionamento da peça (VAKONDIOS et al., 2012; LU, 2008). Porém, a rugosidade também é afetada por variáveis mais difíceis de serem controladas, como as propriedades mecânicas do material e a vibração produzida durante o processo de usinagem (HAMDAM; SARHAN; HAMDY, 2012).

Analisando apenas os parâmetros de corte, pode-se afirmar que a velocidade de corte e o avanço por gume são os que mais influenciam no acabamento superficial no fresamento (HAMDAM; SARHAN; HAMDY, 2012). Por exemplo, conforme o estudo realizado por Yang, Chuang e Lin (2009), o parâmetro de corte que mais influencia no acabamento superficial em um eletrodo de grafite é o avanço por gume, onde a utilização de menores avanços geram os menores valores de rugosidade. No entanto, a menor taxa de avanço gera também um maior desgaste da ferramenta.

Outra variável influente é o sentido de corte. Em geral, o fresamento concordante possibilita melhores rugosidades, já que o comportamento vertical da força de usinagem tem sempre o mesmo sentido (empurrando a peça na direção da mesa). Já no fresamento discordante, ocorre uma alternância da componente vertical da força de usinagem, causando vibrações que prejudicam o acabamento e a tolerância da peça fresada (DINIZ; MARCONDES; COPPINI, 2003).

De acordo com Vacaro (2013), os parâmetros de rugosidade são medidos como desvios em relação à linha média do perfil, definida como a linha determinada pelo ajuste de mínimos quadrados à linha da forma nominal do perfil. Os parâmetros de rugosidade mais utilizados estão identificados na Figura 5.

Figura 5 – Parâmetros de rugosidade



Fonte: Adaptado de Vacaro (2013)

A rugosidade R_a corresponde à média aritmética dos valores absolutos das ordenadas de afastamento (y_i), dos pontos do perfil de rugosidade em relação à linha média, considerando o percurso de medição (l_m) (VACARO, 2013).

A rugosidade R_z é a média aritmética das rugosidades parciais (z_i), de cinco comprimentos de amostragem (l_e), consecutivos. Rugosidade parcial é a soma dos valores absolutos das ordenadas dos pontos de maior afastamento, acima e abaixo da linha média, existentes no comprimento de amostragem. A rugosidade R_y é o maior valor das rugosidades parciais (z_i), que se apresenta no percurso de medição (l_m) (VACARO, 2013).

A direção em que se realiza a medição dos parâmetros de rugosidade deve ser levada em consideração, pois esta pode exercer influência nos parâmetros obtidos. Em superfícies fresadas, que possuem como característica sulcos ordenados, há a dependência da direção na qual é efetuada a medição, sendo que a diferença entre as rugosidades transversal e longitudinal aos sulcos pode ser significativa (CHEN; HUANG; CHEM, 2005).

2.2 FRESAMENTO

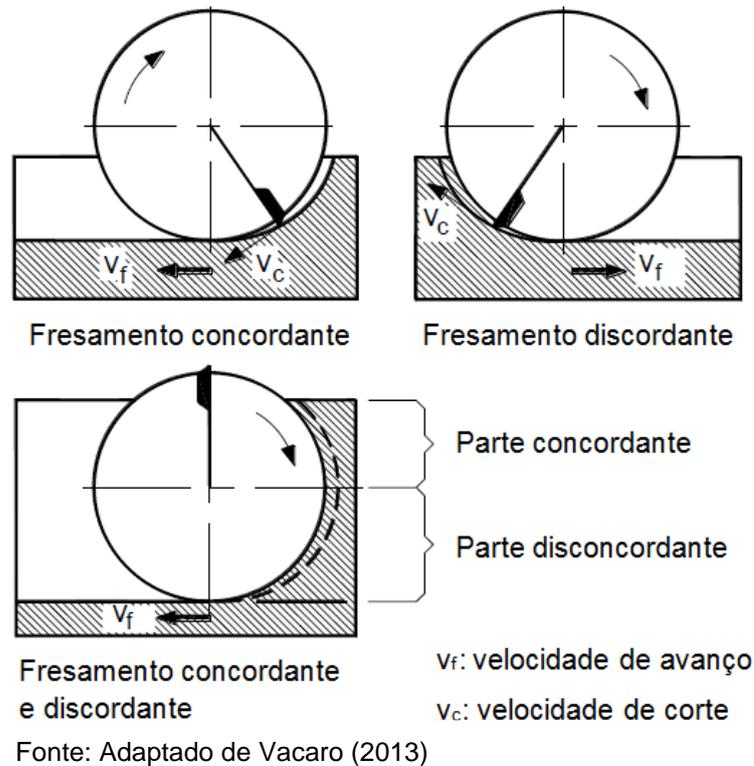
Segundo Stemmer (1995a), o fresamento é um processo de usinagem que realiza a remoção do material da peça de modo intermitente, pelo movimento rotativo da ferramenta, geralmente multicortante, ou seja, com múltiplos gumes de corte gerando superfícies das mais variadas formas. As vantagens deste processo residem na variedade de formas que podem ser geradas, na qualidade dos acabamentos, na alta produtividade e na disponibilidade de ampla variedade de ferramentas, que podem gerar superfícies complexas.

De acordo com a disposição dos gumes ativos em uma fresa, o fresamento pode ser classificado em (DINIZ; MARCONDES; COPPINI, 2003):

- a) fresamento tangencial: os gumes ativos da fresa estão na superfície cilíndrica da ferramenta, ou seja, o eixo da fresa é paralelo à superfície que está sendo gerada;
- b) fresamento frontal: os gumes ativos da fresa estão na superfície frontal da ferramenta, ou seja, o eixo da fresa é perpendicular à superfície gerada.

Levando-se em consideração as direções de corte e de avanço, pode-se distinguir o fresamento em dois tipos: o concordante e o discordante (Figura 6). No fresamento concordante, os movimentos de corte e de avanço possuem o mesmo sentido, iniciando-se o corte com espessura máxima de cavaco. No fresamento discordante, a espessura inicial de corte é teoricamente zero. Desta forma, no início do corte, não há uma remoção nítida de cavaco, mas apenas o esmagamento do material e o atrito entre o gume da ferramenta e o material da peça (DINIZ; MARCONDES; COPPINI, 2003; STEMMER, 1995a).

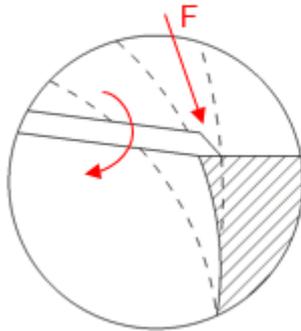
Figura 6 – Fresamento concordante e discordante



Conforme Kratochvil (2004), no fresamento de grafite, a direção de corte deve ser levada em consideração, principalmente devido à possibilidade de fratura da borda do eletrodo. Este fenômeno pode ser entendido através da análise da direção do vetor da força de corte. 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, a condição para que ocorram as fraturas é mais favorável. A Figura 7 mostra as duas situações.

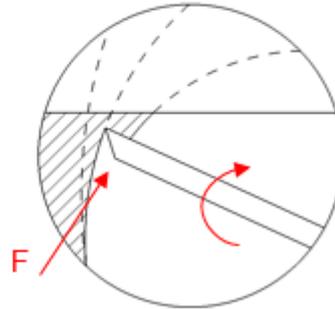
Figura 7 – Força de corte no fresamento concordante e discordante

Vetor da força de corte entrando na peça – Sentido concordante

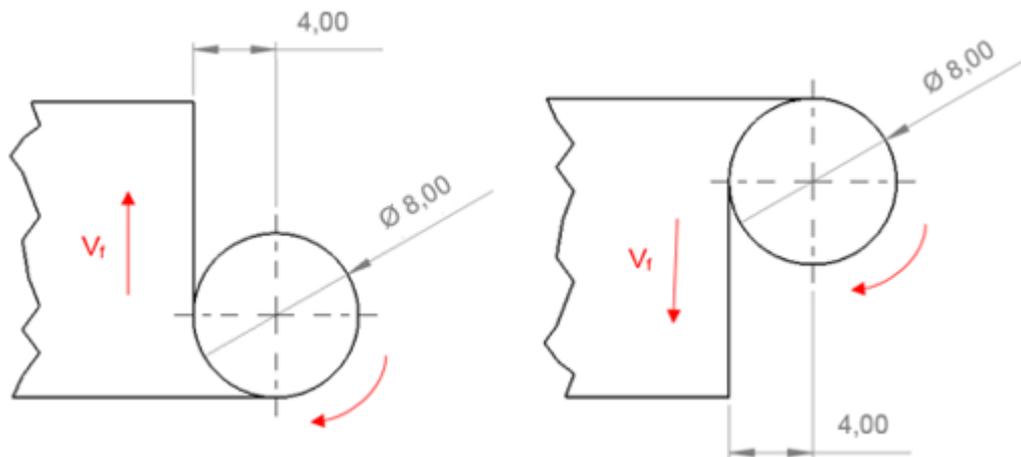


Estratégia não crítica

Vetor da força de corte saindo da peça – Sentido discordante



Estratégia crítica



Fonte: Adaptado de Kratochvil (2004)

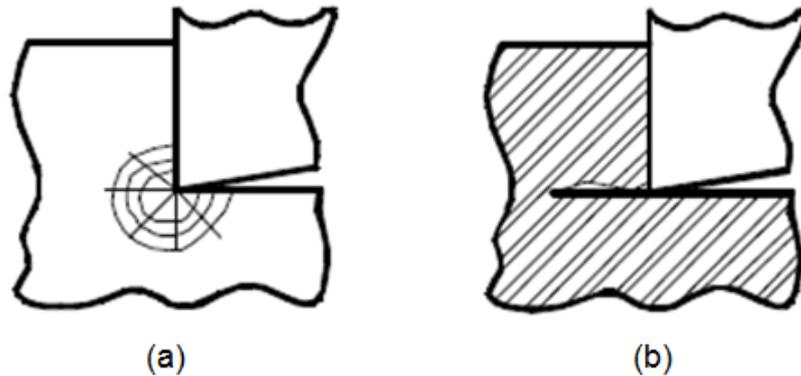
2.2.1 Fresamento de grafite

Conforme Klocke e König (2008), Cabral et al. (2006) e Astakhov, Shvets e Osman (1997), no fresamento de grafite, devido a sua estrutura policristalina, ao invés de deformação plástica, o corte ocorre por processo de fratura desta estrutura. A região de corte esmaga o grafite logo à frente do gume da ferramenta, quando esta se move através do material. Este processo forma pequenas partículas que resultam em pó de grafite, ao invés de cavacos, do tipo que se verificam na usinagem de metais. Desta forma, o processo de corte de grafite não gera elevadas temperaturas.

Ao ocorrer a penetração do gume, a tensão máxima no material da peça inicia-se na frente do gume, conforme Figura 8 (a). Quando esta tensão atinge o seu limite, uma trinca se forma na frente do gume, Figura 8 (b). Neste estágio, apenas

tensões de compressão existem na zona de deformação. A propagação desta trinca acaba tornando o estado de tensões complexo, pois não somente tensões compressivas, mas também tensões de flexão são criadas pelo cavaco, atuando na zona de deformação (ASTAKHOV; SHVETS; OSMAN, 1997).

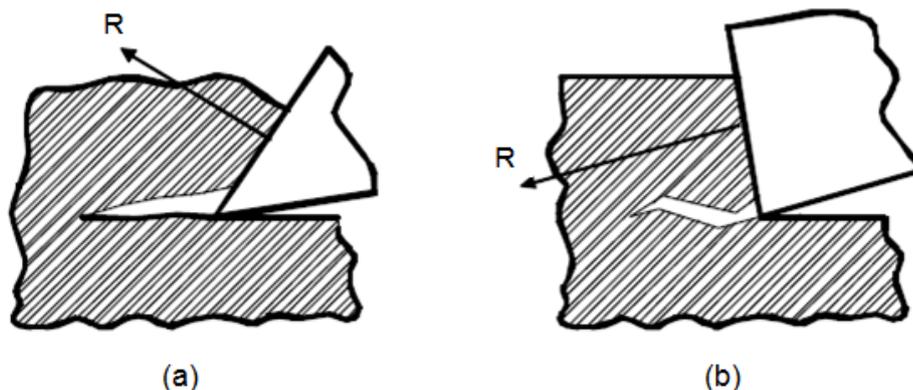
Figura 8 – Mecanismo de formação de cavaco



Fonte: Adaptado de Astakhov, Shvets e Osman (1997)

Fundamentalmente, duas situações podem ser identificadas. A primeira acontece quando a tensão de flexão atua de forma ativa na formação do cavaco e em sua fratura. Este processo ocorre quando a força resultante R intercepta o eixo de formação da trinca, Figura 9 (a). A segunda situação surge quando a força resultante age de forma tão direta que não há tensão de flexão na formação do cavaco, Figura 9 (b). Neste caso, a fratura do cavaco ocorre quase de forma única pela compressão de um fragmento da camada a ser removida, que se encontra entre a face da ferramenta e a parte não deformada do material (ASTAKHOV; SHVETS; OSMAN, 1997).

Figura 9 – Resultante de forças na formação do cavaco



Fonte: Adaptado de Astakhov, Shvets e Osman (1997)

Dessa forma, até mesmo no corte de materiais frágeis, a forma como o cavaco é gerado pode ser um parâmetro controlável, pois quando a compressão e a flexão atuam conjuntamente, menos energia é fornecida à zona de corte e melhores condições de trabalho, como menor geração de pó, podem ser alcançadas (KRATOCHVIL, 2004).

2.2.1.1 Propriedades e aplicações do grafite

Segundo Almeida et al. (2008) e Kratochvil (2004), o grafite é um dos materiais mais amplamente utilizados na confecção de eletrodos para EDM.

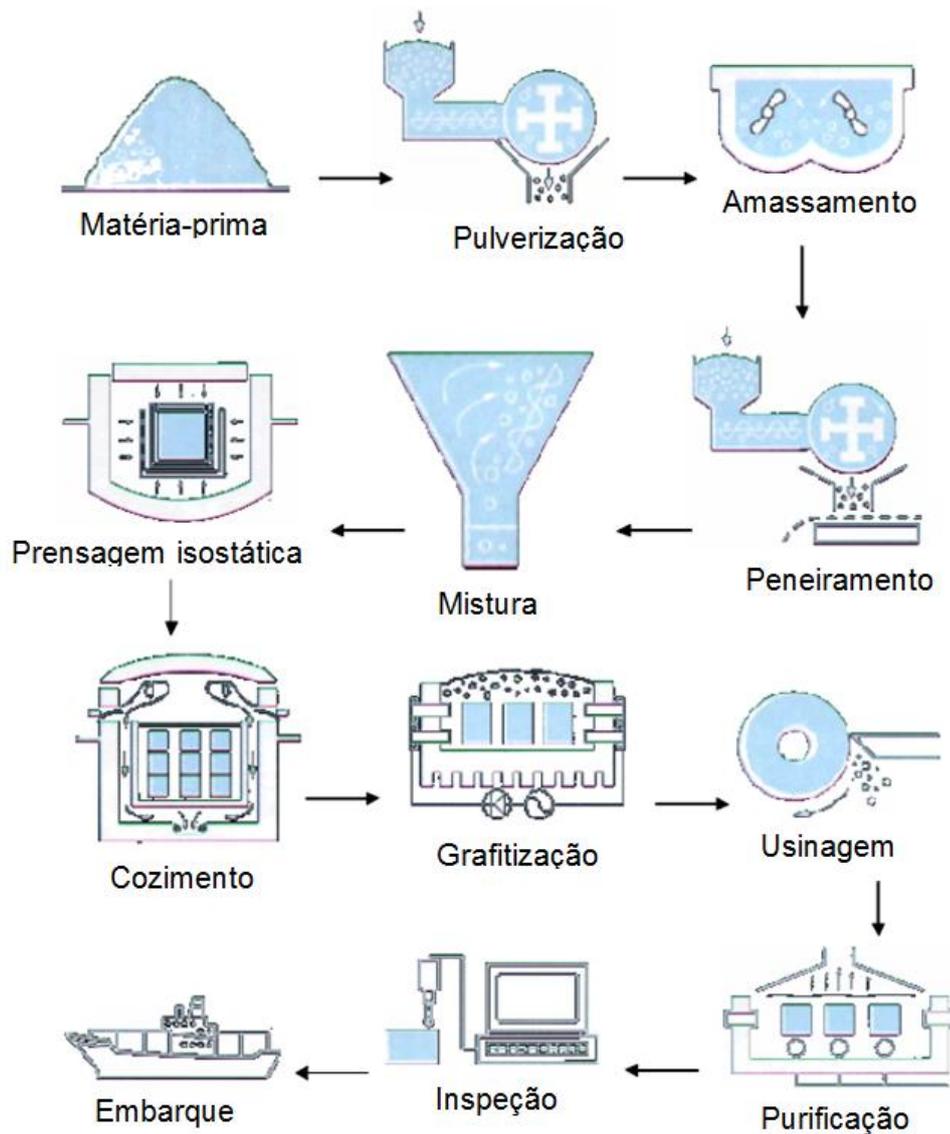
O grafite é uma modificação do carbono cristalizado em uma estrutura de rede hexagonal, onde sua estrutura consiste de lâminas de átomos de carbono híbridos do tipo sp^2 . Cada lâmina se junta às demais por fracas forças de Van Der Waals (ALMEIDA et al., 2008; KRATOCHVIL, 2004).

O grafite industrial é caracterizado pela boa condutividade elétrica e térmica, e é resistente a temperaturas de até 3.000 °C, isto ocorre devido à conjugação das duplas ligações através das lâminas em planos hexagonais, separados por aproximadamente 0,355 nm (KLOCKE; KÖNIG, 2008; ALMEIDA et al., 2008).

O processo de fabricação do grafite permite um grau considerável de liberdade na concepção do processo, em que as propriedades dos materiais resultantes podem ser ajustadas para aplicações específicas (KLOCKE; KÖNIG, 2008). Este processo gera um material inerte e sem componentes voláteis, através da utilização de matérias-primas como: negro de fumo, vários tipos de coque e grafites naturais. A pasta obtida desta mistura é homogeneizada e disposta em moldes ou introduzida em fieiras, através de alta compactação (KRATOCHVIL, 2004).

Através das ligações dos grãos de carbono por intermédio do coque e das forças de retração, obtém-se um carvão homogêneo, compacto e bom condutor de eletricidade. Este carvão é grafitizado por tratamento térmico em temperaturas acima de 1.000°C (POCO, 2014; TOKAY, 2014). As etapas de obtenção do grafite industrial estão identificadas na Figura 10.

Figura 10 – Etapas de fabricação do grafite industrial



Fonte: Kratochvil (2004)

O grafite industrial normalmente é classificado pelo tamanho do grão. Este critério é utilizado, pois a maioria das outras propriedades estão relacionadas de forma direta ou indireta a este fator e à sua orientação. Os grafites para EDM são classificados em cinco grupos (POCO, 2014):

- a) nanofinos: tamanho médio de grão $< 1 \mu\text{m}$;
- b) ultrafinos: tamanho médio de grão entre $1\text{-}5 \mu\text{m}$;
- c) superfinos: tamanho médio de grão entre $6\text{-}10 \mu\text{m}$;
- d) finos: tamanho médio de grão entre $11\text{-}20 \mu\text{m}$; e
- e) médios: tamanho médio de grão entre $21\text{-}100 \mu\text{m}$.

A utilização do grafite vem crescendo de forma expressiva no mundo todo. Atualmente, estima-se que 70% do mercado mundial o utilizem como material para

confeção de eletrodos. Há algumas variações entre as regiões para a escolha entre o grafite ou o cobre, por exemplo, nos Estados Unidos, 95% dos eletrodos são confeccionados em grafite, na Europa a utilização é de 74% e na Ásia de 45%. Tradicionalmente, no Brasil são fabricados mais eletrodos em cobre eletrolítico, porém existe uma tendência nacional para a utilização do grafite, já que este material apresenta algumas vantagens em relação ao cobre (POCO, 2014).

Para efeito de comparação entre estes dois materiais, algumas observações podem ser feitas:

- a) o grafite possui uma menor dilatação térmica que o cobre, o que representa menores deformações durante o processo de eletroerosão, principalmente na usinagem de cavidades profundas (HELLENO; SCHUTZER, 2004);
- b) devido à baixa densidade do grafite (média de $1,8 \text{ g/cm}^3$), há a possibilidade de confecção de eletrodos de grande porte, mais leves do que aqueles em cobre, tornando mais fácil o manuseio da ferramenta no chão-de-fábrica, além da possibilidade de não mais ser necessária a segmentação dos eletrodos (KRATOCHVIL, 2004); e
- c) o grafite tem a capacidade de ser usinado por torneamento, fresamento, furação e retificação, contudo possui o inconveniente de gerar bastante pó durante estas operações. O cobre, porém, possui como vantagem a capacidade de polimento, exigido em algumas superfícies (KRATOCHVIL, 2004).

Um ponto importante a ser considerado é que, devido às diferenças em dureza, microestrutura, resistência e características de atrito, o grafite requer enfoques modificados para a seleção dos parâmetros de corte, das geometrias e materiais das ferramentas, se comparado à usinagem dos metais (NIEMINEM; PARO; KAUPPINEM, 1996).

2.2.1.2 Desgastes no fresamento de grafite

Conforme Klocke e König (2008), Almeida et al. (2008), Cabral et al. (2006) e Kratochvil (2004), o mecanismo de desgaste dominante na usinagem de grafite é a abrasão, que ocorre devido ao atrito do fluxo do pó ultrafino, que pode ser

manifestado também através do mecanismo de desgaste em forma de pente. Esse tipo de desgaste acontece tanto no flanco principal como na face da ferramenta.

O desgaste sobre o flanco e a face da ferramenta é determinado através de dois tipos de efeitos, que dependem da região da superfície envolvida no corte. O primeiro efeito, chamado de deslizamento, atua através do 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 está em atrito constante com o material (KÖNIG, 1997 apud KRATOCHVIL, 2004).

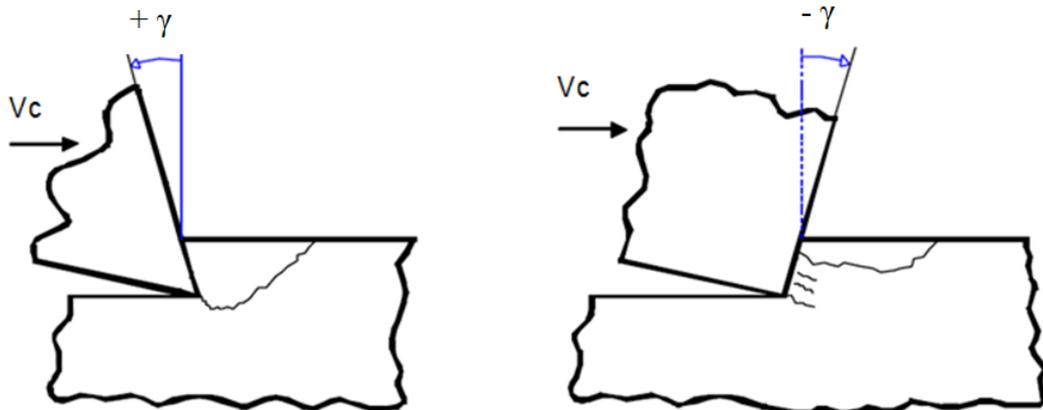
O segundo efeito é denominado efeito de jato livre de partículas, presente também na face ou no flanco da ferramenta. As partículas de pó de grafite formam um fluxo de material arrancado que incide sobre um ângulo plano da superfície, que não está em contato com o material. Estas incidências das partículas promovem um desgaste por abrasão característico, conhecido como desgaste em forma de pente. Através da formação de sulcos localizados no material de corte, ocorre uma elevação da temperatura com um aumento da velocidade de corte (KÖNIG, 1997 apud KRATOCHVIL, 2004).

2.2.1.3 Ferramentas para usinagem de grafite

Na usinagem de grafite, a formação do cavaco ocorre pela propagação de uma trinca logo à frente do gume da ferramenta. Devido a isto, a influência da geometria da ferramenta de corte fica evidente, onde o ângulo de saída (γ) e o ângulo de incidência (α) são os parâmetros determinantes neste controle (KLOCKE; KÖNIG, 2008).

Segundo Yang, Chuang e Lin (2009) e Klocke e König (2008), ferramentas com ângulos de saída bastante negativos, geram um aumento significativo da tensão de compressão, que acabam enfraquecendo e facilitando a quebra do grafite. Isto ocasiona um aumento da quantidade de pó gerado e uma diminuição no tamanho dos fragmentos. Já ferramentas com ângulos de saída positivos, geram fragmentos com dimensões maiores e tensões de compressão menores. A Figura 11 ilustra as duas situações.

Figura 11 – Condições de corte para diferentes ângulos de saída de cavaco



Fonte: Kratochvil (2004)

O ângulo da ferramenta possui influência também no desgaste da mesma, já que com a utilização de ângulos positivos, a remoção das partículas de grafite é facilitada, ocasionando um menor desgaste por atrito (YANG; CHUANG; LIN, 2009).

2.2.1.3.1 Materiais para ferramentas

De acordo com Diniz, Marcondes e Coppini (2003), a escolha da ferramenta de corte deve ser feita verificando-se quais as exigências primordiais e quais as secundárias, de modo a escolher a ferramenta de material mais adequado ao caso.

Atualmente, com base nas características químicas, os materiais para ferramentas podem ser classificados em: aços rápidos, aços rápidos com revestimento, metal duro, metal duro com revestimento, materiais cerâmicos, nitreto de boro cúbico e diamante (STEMMER, 1995b). Segundo Klocke e König (2008), os materiais mais utilizados para usinagem de grafite são: metal duro revestido e diamante, pois apresentam características que reduzem o desgaste por atrito.

O metal duro é um produto da metalurgia do pó, constituído de partículas duras finamente divididas de carbonetos de metais refratários, sinterizados com um ou mais metais do grupo do ferro (ferro, níquel ou cobalto), denominados ligantes. A função do ligante é construir a ligação entre os carbonetos frágeis e oferecer tenacidade, formando um corpo resistente. Os carbonetos por sua vez, fornecem alta dureza a quente e resistência ao desgaste (DINIZ; MARCONDES; COPPINI, 2003; FERRARESI, 1977).

As vantagens dos metais duros estão na boa distribuição estrutural, em decorrência do próprio processo metalúrgico de fabricação, dureza elevada e resistência à compressão e ao desgaste em elevadas temperaturas. Além disso, tem-se a possibilidade de se obter propriedades distintas, através da mudança específica dos carbonetos e das proporções do ligante. Os metais duros podem ser subdivididos em: convencionais (do grupo P, M e K), com alto teor de carboneto de titânio, polivalentes, revestidos, de grão fino e ultrafino, além dos Cermets (FERRARESI, 1977).

Os metais duros revestidos vêm sendo muito utilizados, pois a fina camada aplicada sobre a ferramenta possibilita o aumento da resistência ao desgaste da camada superior, mantendo o núcleo da ferramenta com a tenacidade característica do metal duro. Desta forma, consegue-se aumentar consideravelmente a vida útil da ferramenta e diminuir os esforços de corte. Como exemplo, no fresamento, uma ferramenta revestida pode resistir até 60% a mais do que uma ferramenta sem revestimento (KLOCKE; KÖNIG, 2008; DINIZ; MARCONDES; COPPINI, 2003).

As ferramentas de diamante são classificadas em diamantes monocristalinos e policristalinos. Os diamantes monocristalinos são os encontrados diretamente na natureza, utilizados apenas em situações específicas, principalmente quando há a necessidade de altíssima precisão dimensional e acabamento brilhante, pois possuem como principal desvantagem o elevado custo. Os diamantes policristalinos são materiais artificiais, conhecidos como PCD. Este diamante é constituído de partículas muito finas, de granulação definida para se obter o máximo de homogeneidade e densidade. A ferramenta de PCD é produzida pela sinterização das partículas de diamante com cobalto, em um processo de alta pressão e temperatura. A desvantagem destas ferramentas também é o seu elevado custo, mesmo que seja menor do que o diamante monocristalino, além de possuir baixa tenacidade e não ser possível a utilização em ferramentas com geometrias complexas (KLOCKE; KÖNIG, 2008; DINIZ; MARCONDES; COPPINI, 2003).

Atualmente, ferramentas de metal duro revestidas com diamante são muito utilizadas na usinagem de grafite, onde geram um custo-benefício satisfatório, além de possuírem a capacidade de serem aplicadas em geometrias mais complexas (DINIZ; MARCONDES; COPPINI, 2003).

2.2.1.3.2 Revestimentos

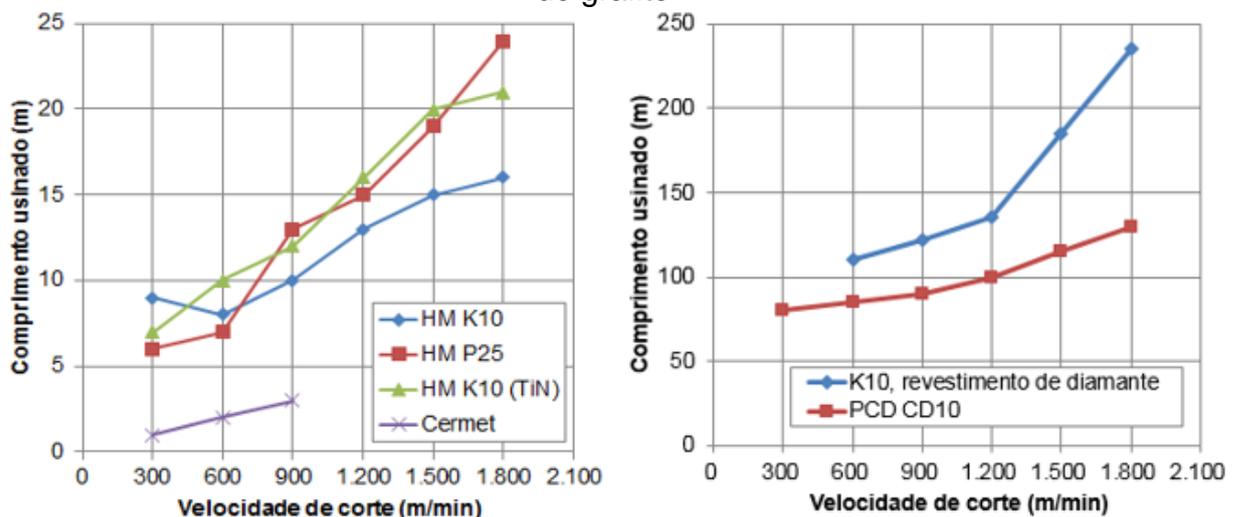
Com sua alta dureza e estabilidade química, os revestimentos possuem os pré-requisitos necessários para inibir o contato entre o material da peça a ser usinado e o substrato da ferramenta, reduzindo assim o desgaste e aumentando o tempo de vida da ferramenta (KLOCKE; KÖNIG, 2008; STEMMER, 1995a).

A utilização de ferramentas revestidas possui como principal vantagem a alta resistência ao desgaste, fornecida pelo revestimento, aliada à elevada tenacidade, fornecida pelo substrato, tornando possível a usinagem com variações associadas aos estresses mecânicos e térmicos (KLOCKE; KÖNIG, 2008).

Os principais revestimentos utilizados em ferramentas de corte são: Carboneto de Titânio (TiC), Carbonitreto de Titânio (TiCN), Óxido de Alumínio (Al_2O_3), Nitreto de Titânio (TiN), Nitreto de Alumínio Titânio (TiAlN), Nitreto de Cromo Alumínio (AlCrN) e Diamante (PCD) (KLOCKE; KÖNIG, 2008; DINIZ; MARCONDES; COPPINI, 2003).

De acordo com Klocke e König (2008), os revestimentos mais indicados para a usinagem de grafite são TiAlN e PCD, devido às suas altas resistências à abrasão. A Figura 12 apresenta um comparativo entre diferentes ferramentas e revestimentos na usinagem de grafite, demonstrando inclusive, que o revestimento de diamante apresenta-se mais resistente ao desgaste do que a própria ferramenta de diamante.

Figura 12 – Comparação entre diferentes ferramentas e revestimentos na usinagem de grafite



Fonte: Adaptado de Klocke e König (2008)

O revestimento TiAlN é uma evolução do TiN, em que o titânio é substituído pelo alumínio entre 20 e 60%. As principais aplicações do revestimento TiAlN são na usinagem a seco e HSM (*High Speed Machining*). Estas características são explicadas pelo fato que uma fina camada de óxido de alumínio é formada sobre a superfície do revestimento, sendo constantemente renovada durante o processo de corte, retardando assim o progresso do desgaste (KLOCKE; KÖNIG, 2008).

O revestimento PCD é uma das técnicas mais recentes utilizadas para produção de ferramentas diamantadas. Este revestimento é aplicado nas ferramentas de metal duro ou cerâmica através de uma síntese de diamante de baixa pressão, pelo processo CVD. A camada de diamante consiste em diamantes puros sem a presença de aglutinantes, onde as temperaturas para a deposição ficam entre 600 e 1000 °C. A sua principal vantagem é a alta dureza da camada, sendo o revestimento com mais efetiva resistência ao efeito abrasivo na usinagem de grafite (MATOS et al. 2009; KLOCKE; KÖNIG, 2008).

A Tabela 1 mostra um comparativo entre os dois revestimentos mais indicados para aplicação na usinagem de grafite.

Tabela 1 – Comparativo entre propriedades do revestimento TiAlN e PCD

Características	TiAlN	PCD
Processo de produção	PVD	CVD
Espessura do revestimento (µm)	1 a 5	3 a 10
Microdureza HV	3.000	10.000
Resistência ao desgaste por abrasão	+++	++++
Resistência ao desgaste por adesão	++	+++
Proteção do substrato quanto à corrosão	+	+++

Fonte: Adaptado de Klocke e König (2008)

3 METODOLOGIA DE IMPLEMENTAÇÃO DO TRABALHO

No presente capítulo estão descritos os materiais e equipamentos que foram empregados no desenvolvimento deste trabalho, incluindo-se as características das ferramentas de corte selecionadas, o material e dimensionamento dos corpos de prova. Na sequência apresentam-se os parâmetros de usinagem e os procedimentos de análise que foram utilizados para a avaliação do acabamento da peça usinada e do desgaste no fresamento de grafite, levando-se em consideração o referencial teórico e os recursos disponíveis.

3.1 MATERIAIS E EQUIPAMENTOS

Abaixo se encontram especificados os materiais e equipamentos que foram utilizados no desenvolvimento e análise experimental deste trabalho.

3.1.1 Ferramentas de corte

A seleção das ferramentas ocorreu com base no material apresentado no referencial teórico, conjuntamente com a disponibilidade comercial. Para tanto, foram selecionadas fresas em metal duro inteiriço com diâmetro de 6 mm, comprimento total de 80 mm, com 2 gumes (z), e revestimentos de TiAlN e PCD. As características das duas ferramentas estão apresentadas na Tabela 2.

Tabela 2 – Características das ferramentas

Revestimento	Ângulo da hélice (λ)	Ângulo de saída (γ)	Ângulo de incidência (α)	Raio de quina (r_ϵ)	Raio do gume (r_β)
TiAlN	30°	10°	10°	0,5 mm	20 μ m
PCD	30°	10°	10°	0,5 mm	20 μ m

Fonte: Adaptado de Seco (2014)

Para fixação das ferramentas foi utilizado um mandril térmico (*Shrink fit Chuck*), da marca Haimer, modelo de fixação HSK-E40, com um balanceamento fino G2.5, que garante um batimento máximo de 3 μ m.

As ferramentas foram fixadas com um balanço (l/d) de 6xD, o que representa 36 mm.

3.1.2 Corpos de prova

Para a realização dos ensaios experimentais foram utilizados blocos de grafite nas dimensões de 100x100x60 mm, da marca Tokai Carbon e modelo BC-15. As principais características deste grafite estão expostas na Tabela 3.

Tabela 3 – Propriedades do grafite

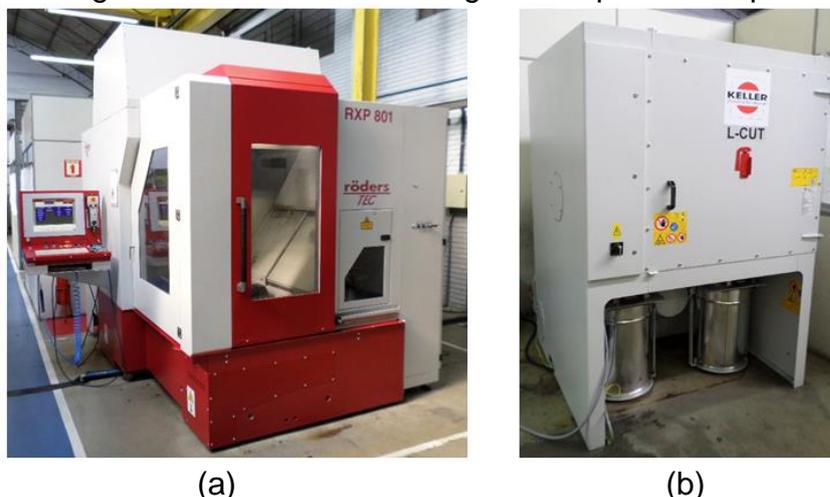
Tamanho do grão	Densidade	Resistividade elétrica	Dureza	Resistência à flexão
7 μm	1,85 g/cm ³	12,5 $\mu\text{ohm.m}$	66 shore	66 MPa

Fonte: Adaptado de Tokai (2014)

3.1.3 Equipamentos

Os testes de fresamento ocorreram em um centro de usinagem CNC da marca Rödgers, modelo RXP 801, com rotação máxima no spindle de 42.000 rpm, 15 kW de potência, avanço máximo de 60.000 mm/min e motores lineares em todos os eixos. O equipamento está identificado na Figura 13 (a), e pertence à empresa Sulbras Moldes e Plásticos. A fim de retirar o pó de grafite que esteve em suspensão durante as usinagens, foi utilizado um aspirador de pó industrial, periférico ao centro de usinagem, da marca Keller, modelo L-cut 2-5P, com capacidade máxima de sucção 2.500 m³/h, pressão de operação 50 mbar e potência de 5,5 kW, conforme Figura 13 (b).

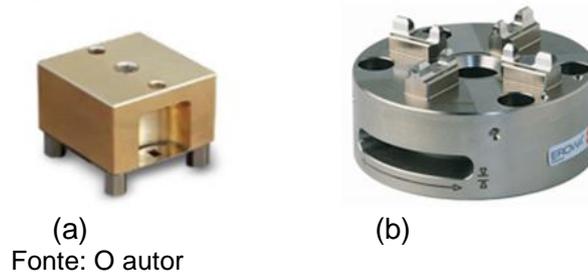
Figura 13 – Centro de usinagem e aspirador de pó



Fonte: O autor

A fixação do bloco de grafite se deu através do sistema de fixação Erowa. Os blocos foram presos com o auxílio de dois parafusos M6 em um porta-eletrodos padrão fabricado em latão, Figura 14 (a). Este porta-eletrodos foi fixado em uma base do sistema Erowa, Figura 14 (b), que garante uma repetibilidade de 0,002 mm com uma força de fixação de 7000 N.

Figura 14 – Sistema de fixação do grafite



Para a realização das análises e medições do desgaste de flanco ao longo dos testes foi utilizado o Sistema de Medição Óptico e Vídeo Swift Duo da Marca Vision Engineering, que possui uma câmera de vídeo CCD a cores com resolução de 640x480 pixels, resolução dos *encoders* de 1 μm e zoom máximo de 100 vezes, conforme a Figura 15 (a). Para a geração das imagens em cada etapa de medição, foi utilizado o Microscópio Digital de mão Micro Zoom, da marca Star Open com resolução de 1280x960 pixels e ampliação máxima de 200 vezes, devido a melhor qualidade de imagem. A Figura 15 (b) exibe este microscópio.

As medições de rugosidade foram realizadas com o auxílio do rugosímetro portátil, modelo SurfTest SJ-201P, da marca Mitutoyo, que possui capacidade de medição em R_z de 0,02 μm à 350 μm , com ponta de diamante e força de medição de 4 mN, conforme Figura 15 (c).

Figura 15 – Sistemas para medição e geração das imagens



3.2 ENSAIOS EXPERIMENTAIS

Os parâmetros de corte utilizados no fresamento e o procedimento de análise utilizado no procedimento experimental estão descritos abaixo.

3.2.1 Parâmetros de corte

Os parâmetros de corte foram definidos tendo-se como base o catálogo técnico do fabricante das ferramentas que serão utilizadas.

O passo lateral (a_e) foi fixado em 2 mm e a profundidade de corte (a_p) foi de 1 mm, pois não foram o objetivo deste estudo.

A fim de se comprovar a possibilidade de utilização destes parâmetros, foi realizado um pré-teste com estes no nível alto, verificando-se o desgaste da ferramenta e o comportamento da máquina e do bloco de grafite, já que atualmente são utilizados parâmetros de corte menores.

Os parâmetros que foram avaliados estão descritos na Tabela 4.

Tabela 4 – Parâmetros de corte definidos

Variáveis	Nível	
	Baixo	Alto
A: Velocidade de corte (m/min)	400	700
B: Avanço por gume (mm/gume)	0,04	0,07

Fonte: Adaptado de Seco (2014)

3.2.2 Procedimento de análise

Com o objetivo de reduzir as vibrações durante o fresamento e a quebra das arestas do bloco de grafite, conforme citado por Kratochvil (2004), a estratégia de usinagem testada foi a de sentido concordante e de fresamento lateral, conforme Figura 16. O volume máximo removido de material pelas ferramentas foi de 300 cm³, o que corresponde a um comprimento total de usinagem de 93.840 mm ou 30 planos de material do bloco, e foi monitorado o desgaste das mesmas a cada 15.640 mm de comprimento usinado.

Figura 16 – Fresamento realizado nos testes



Fonte: O autor

A medição da rugosidade ocorreu após a primeira retirada completa de um plano de material, a fim de não possuir a influência do desgaste da ferramenta nesta verificação. Esta medição foi feita no sentido longitudinal ao avanço da ferramenta.

Através da escolha dos fatores mencionados na Tabela 3 mais a variável revestimento e, considerando um planejamento fatorial completo 2^k com uma réplica, tem-se o total de 16 combinações, conforme identificado no Apêndice A.

Para se definir quais foram as variáveis que mais influenciaram no desgaste no fresamento de grafite e no acabamento, utilizou-se a análise de variância, com um nível de significância $\alpha = 0,01$, o que representa uma confiabilidade de 99%. O parâmetro analisado foi o desgaste de flanco e o acabamento do bloco de grafite de cada teste.

A definição da sequência para a realização dos testes foi feita de forma aleatória, objetivando a não influência de outros fatores que não possam ser controlados.

Os critérios de fim de vida adotados para as ferramentas foram: falha catastrófica (lascamento), fim do teste após 93.840 mm de comprimento usinado ou um desgaste de flanco máximo de 0,3 mm.

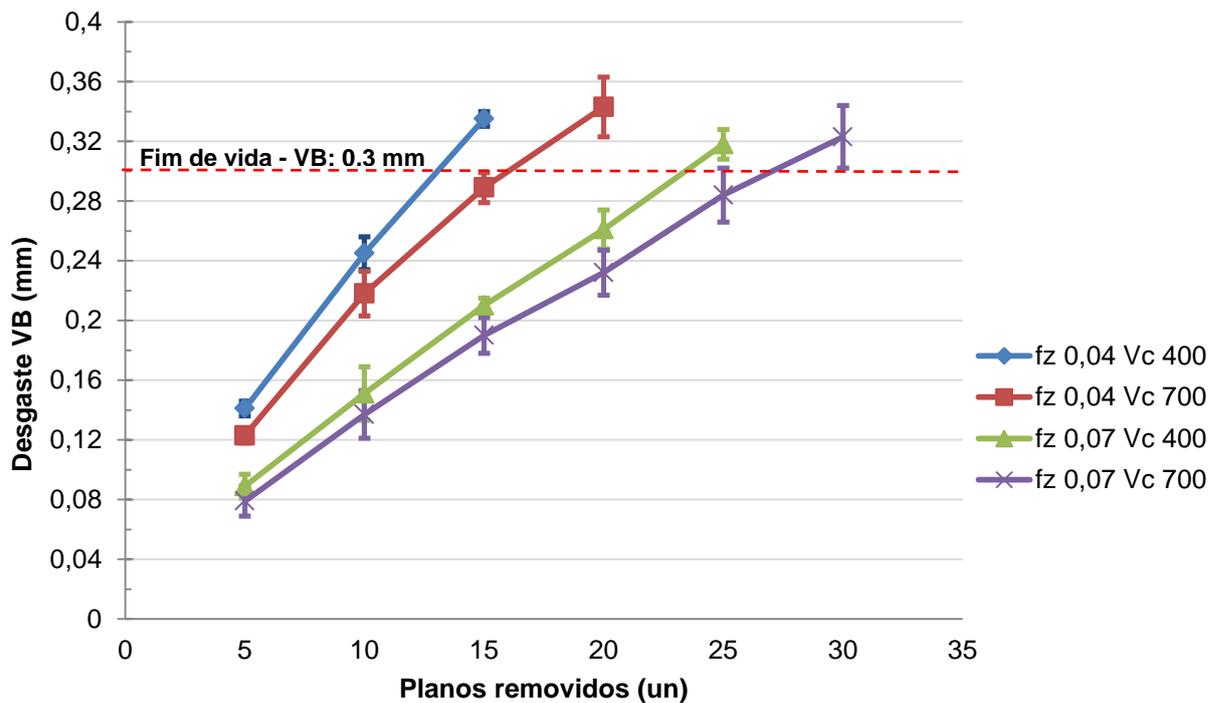
4 ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Este capítulo apresenta os resultados obtidos com a execução da metodologia descrita, através das análises dos desgastes das ferramentas e dos acabamentos dos blocos de grafite.

4.1 DESGASTES DAS FERRAMENTAS

A Figura 17 apresenta os resultados do comportamento dos desgastes em função da quantidade de planos removidos para os quatro parâmetros testados com as ferramentas de metal duro revestidas com TiAlN.

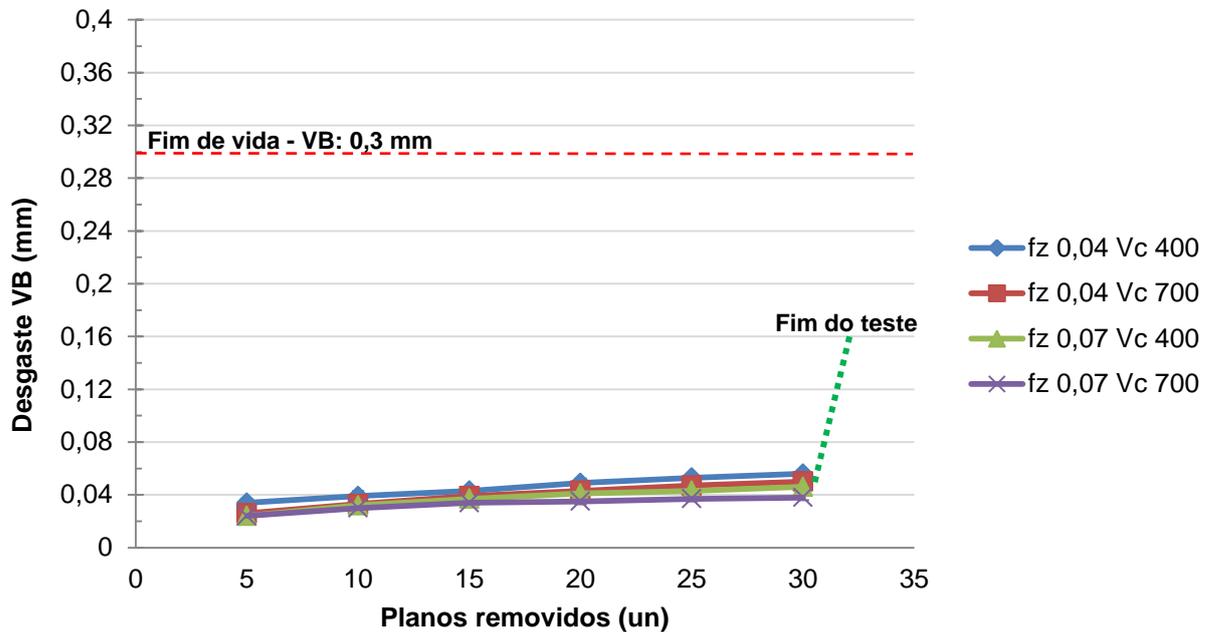
Figura 17 – Comportamento da curva de vida das ferramentas de metal duro com revestimento TiAlN



Fonte: O autor

A Figura 18 traz os resultados do comportamento dos desgastes em função da quantidade de planos removidos para os quatro parâmetros testados com as ferramentas de metal duro revestidas com PCD.

Figura 18 – Comportamento da curva de vida das ferramentas de metal duro com revestimento PCD



Fonte: O autor

Analisando os gráficos das Figuras 17 e 18 é possível identificar que o desgaste gerado nas ferramentas com revestimento PCD foi bem menor se comparadas às ferramentas com revestimento TiAlN. É possível perceber também que nos dois gráficos as curvas de desgaste apresentam-se quase como retas, onde o desgaste aparenta ser constante. Conforme Klocke e König (2009) este desgaste denomina-se fenômeno de deterioração uniforme do flanco.

Como comparativo, a variação do desgaste, tendo-se como referência os valores para os parâmetros de velocidade de corte 700 m/min e avanço por gume de 0,07 mm/gume, foi 6x menor para as ferramentas com revestimento PCD. Este resultado vem ao encontro do que Matos et al. (2009) e Klocke e König (2009) afirmam, onde estes indicam que o revestimento PCD é o que possui a mais efetiva resistência ao efeito abrasivo na usinagem de grafite devido a sua elevada dureza.

Analisando somente o gráfico da Figura 17, é possível perceber que a combinação dos parâmetros de corte mais elevados gerou o menor desgaste e, por consequência, a maior vida útil da ferramenta. De forma oposta, a combinação dos parâmetros mais baixos gerou o desgaste da ferramenta de forma mais rápida.

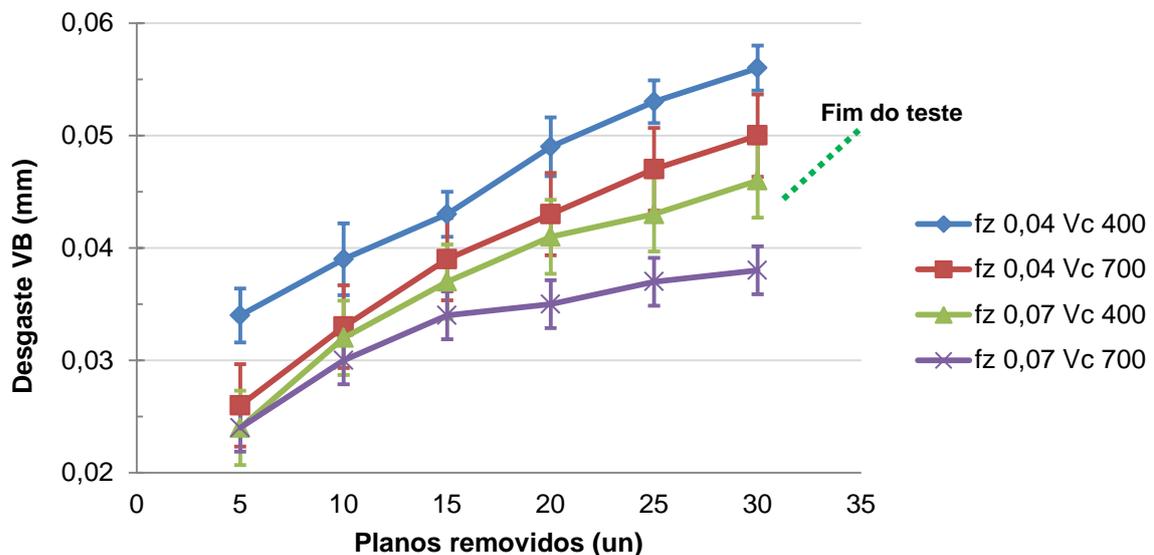
Conforme Klocke e König (2009), esta tendência ocorre, pois na usinagem de grafite a utilização de velocidades de cortes e avanços por gume maiores geram

uma redução do contato do gume com o material do eletrodo, reduzindo assim o atrito entre o fluxo de grafite e a ferramenta, e o desgaste abrasivo do processo.

Kratochvil (2004), realizou um estudo com o objetivo de melhor compreender o comportamento dos desgastes no fresamento de eletrodos de grafite. O mesmo utilizou ferramentas de metal duro com revestimento TiAlN variando a velocidade de corte e chegou a conclusão que a utilização de altas velocidades de corte no processo provoca um aumento na vida da ferramenta, corroborando com os resultados obtidos neste trabalho.

A mesma influência dos parâmetros de corte no desgaste que ocorreu com as ferramentas com revestimento TiAlN, pode ser verificada nas ferramentas com revestimento PCD. Para conseguir uma melhor visualização, a Figura 19 apresenta o mesmo comportamento da curva de vida da ferramenta de metal duro com revestimento PCD, porém com uma escala menor no eixo das ordenadas.

Figura 19 – Comportamento da curva de vida das ferramentas de metal duro com revestimento PCD (escala menor)

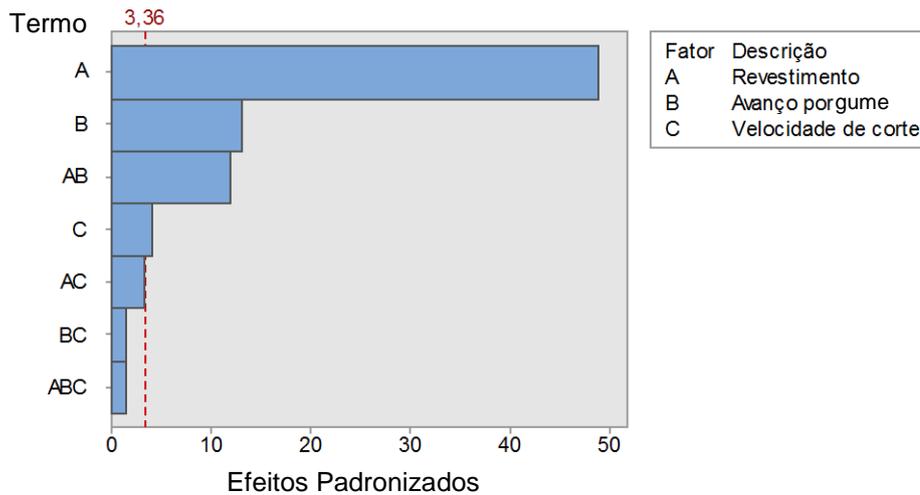


Fonte: O autor

Como forma de validar estatisticamente os efeitos dos fatores de controle no desgaste de flanco e se definir quais foram os mais significativos no experimento, gerou-se o gráfico de Pareto dos efeitos padronizados para o desgaste de flanco, conforme Figura 20, onde, conforme Montgomery e Runger (2003), os efeitos padronizados são a magnitude de cada efeito dividida pelo desvio padrão da variável de resultado.

É possível observar que os parâmetros de corte influentes no desgaste de flanco são o revestimento, o avanço por gume e a velocidade de corte, nesta sequência. Onde o revestimento da ferramenta é o fator que apresenta o maior efeito. Este resultado vem ao encontro do que Matos et al. (2009), Klocke e König (2008) e Kratochvil (2004) indicam.

Figura 20 – Gráfico de Pareto dos efeitos padronizados para o desgaste de flanco

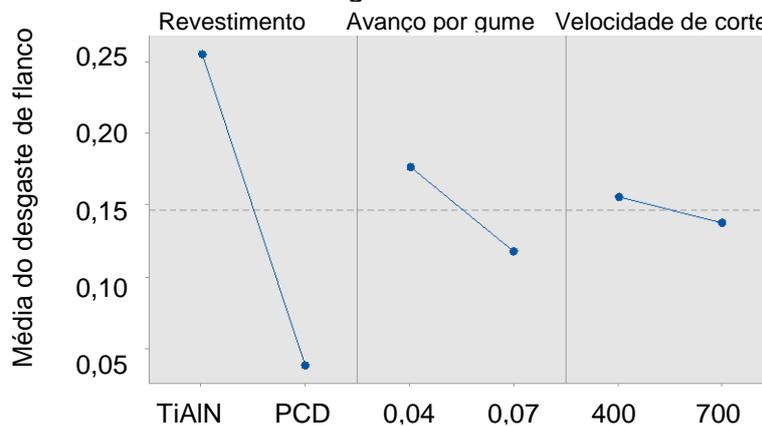


Fonte: Software MINITAB V.17

A afirmação de que estes fatores de controle causam diferenças significativas no desgaste de flanco tem uma confiabilidade de 99%.

De forma análoga ao Gráfico de Pareto, a Figura 21 identifica de forma qualitativa o comportamento do desgaste de flanco diante da variação dos parâmetros de corte.

Figura 21 – Influência do revestimento, avanço por gume e velocidade de corte no desgaste de flanco



Fonte: Software MINITAB V.17

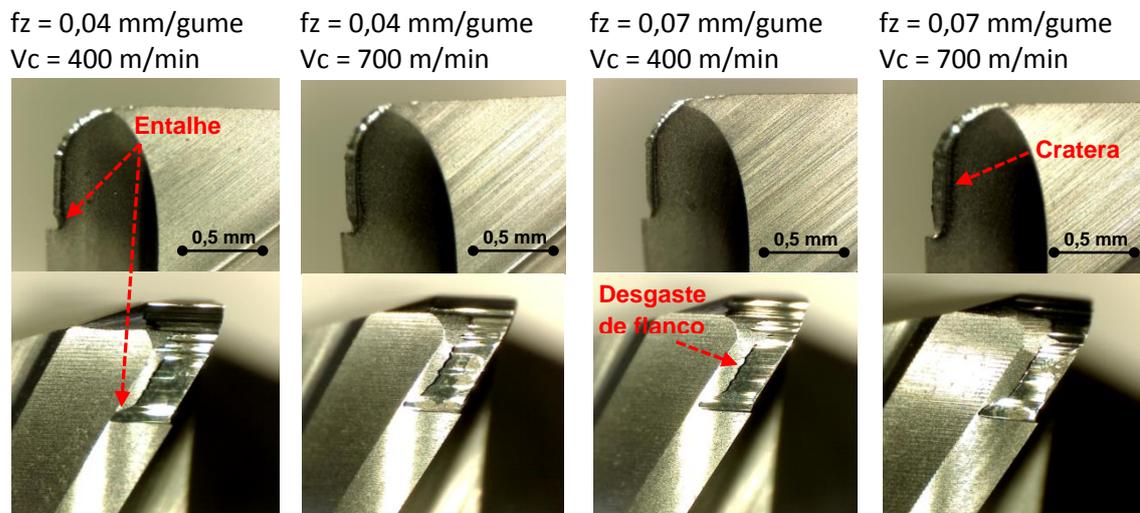
Constata-se que a utilização das ferramentas com revestimento TiAlN e a redução do avanço por gume e da velocidade de corte, elevam o desgaste de flanco. Contudo, o revestimento foi o fator de controle que mais oscilou em torno da média, indicando que foi o mais significativo no desgaste.

4.1.1 Avaliação dos desgastes das ferramentas

A fim de se compreender melhor os resultados obtidos com cada ferramenta e detectar os principais tipos e mecanismos de desgaste predominantes na usinagem do grafite, esta seção traz as imagens e avaliações das ferramentas ensaiadas.

A Figura 22 apresenta as imagens da face e do gume das ferramentas com revestimento TiAlN na fase final dos testes.

Figura 22 – Imagens dos desgastes das ferramentas de metal duro com revestimento TiAlN



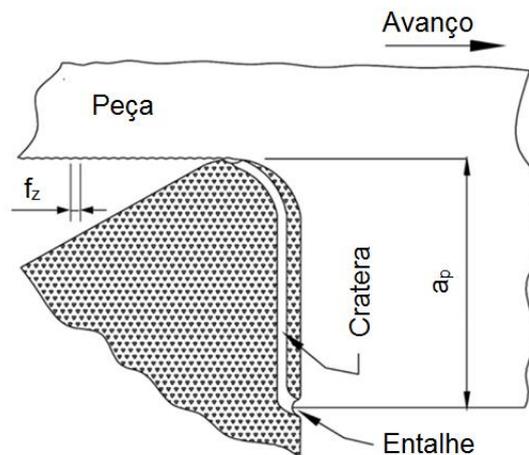
Fonte: O autor

Examinando a Figura 22, é possível constatar que em todas as combinações de parâmetros de corte, ocorreu o desgaste de flanco. Este desgaste é comum ocorrer na usinagem de grafite e é gerado predominantemente pela abrasão que ocorre através do fluxo de pó ultrafino, conforme foi observado por diversos pesquisadores (KLOCKE E KÖNIG, 2008; ALMEIDA et al., 2008; CABRAL et al., 2006; KRATOCHVIL, 2004).

Nesta figura é possível identificar também a geração de um desgaste por abrasão bem característico na usinagem de grafite, conhecido como desgaste em forma de pente, que gera sulcos na ferramenta com a passagem do fluxo de material (KÖNIG, 1997 apud KRATOCHVIL, 2004).

Por último, são identificados os desgastes de entalhe e de cratera, onde o último consiste em uma secção côncava na face inclinada da ferramenta, formada pela ação do pó de grafite que entra em contato deslizante contra a face da ferramenta durante a usinagem. Este desgaste conduz não só à formação de uma cratera, mas também a geração dos entalhes, que funcionam como vias alternativas para o fluxo de pó de grafite a partir dos gumes de corte (CABRAL et al., 2008; CABRAL et al., 2006; ALMEIDA et al., 2008). A representação esquemática deste efeito pode ser visualizada na Figura 23.

Figura 23 – Representação esquemática do desgaste de cratera e entalhe gerados durante a usinagem

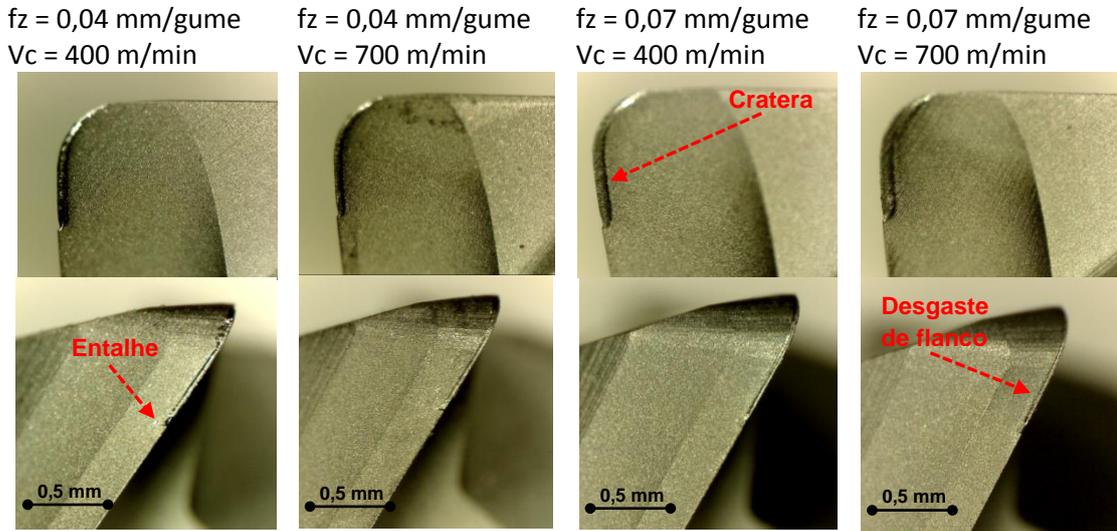


Fonte: Adaptado de Cabral et al. (2008)

A Figura 24 apresenta as imagens da face e do gume das ferramentas com revestimento PCD na fase final dos testes.

Analisando estas imagens, é possível identificar os mesmos desgastes apresentados nas ferramentas com revestimento TiAlN (desgaste de flanco, desgaste de cratera e entalhe), porém todos estes se apresentam em uma quantidade reduzida.

Figura 24 – Imagens dos desgastes das ferramentas de metal duro com revestimento PCD

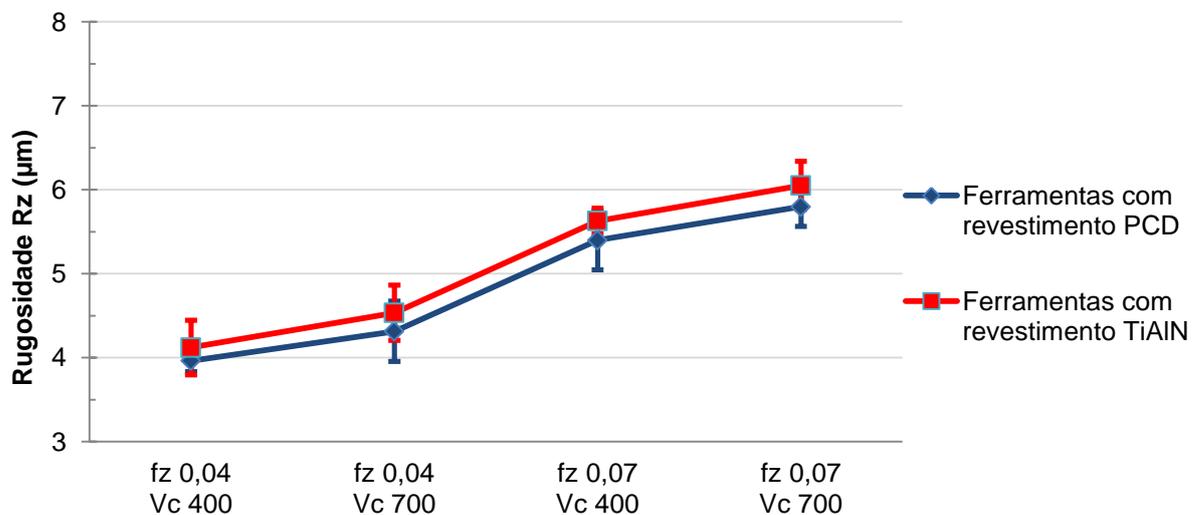


Fonte: O autor

4.2 ACABAMENTO

A Figura 25 apresenta os resultados do comportamento das rugosidades dos blocos de grafite para os quatro parâmetros testados com as ferramentas com revestimento TiAlN e PCD, sendo realizadas as medições no sentido longitudinal em relação ao sentido de avanço da ferramenta.

Figura 25 – Comportamento das rugosidades dos blocos de grafite



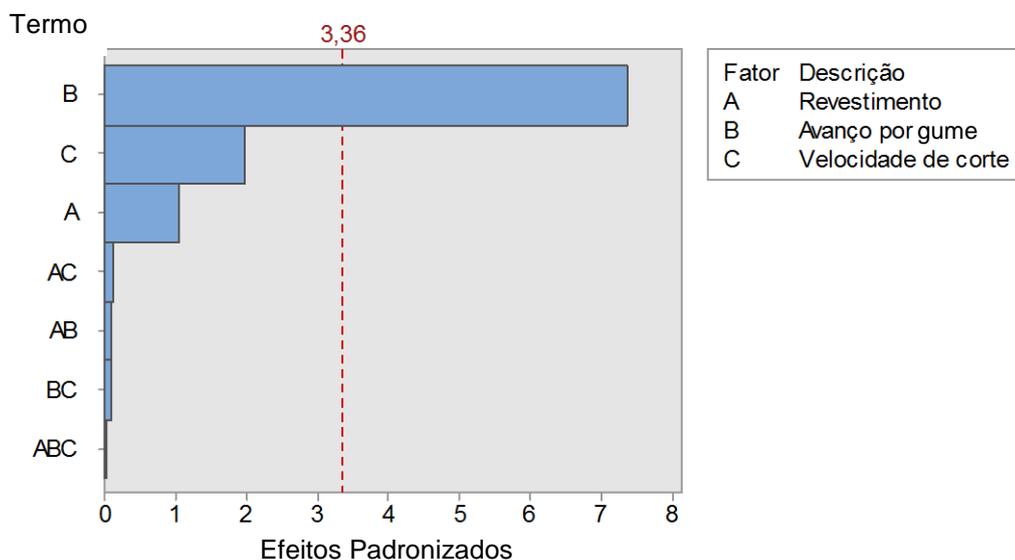
Fonte: O autor

Examinando esta figura, é possível identificar que as rugosidades das superfícies fresadas com as ferramentas com revestimento TiAlN e PCD ficaram muito semelhantes, uma vez que, considerando as variações das medidas encontradas, os valores das duas curvas acabam se coincidindo. Isto ocorreu, pois as medições foram realizadas logo após a primeira retirada de um plano de material, objetivando uma influência não muito grande nos resultados devido ao desgaste das ferramentas. Contudo, conforme Klocke e König (2008), o resultado levemente maior para as ferramentas com revestimento TiAlN pode ser explicado devido ao seu rápido desgaste, onde o arredondamento do gume causa lascas de partículas de grafite que conduzem a uma qualidade superficial um pouco pior.

Verifica-se também que os menores valores para as rugosidades ocorreram com as combinações dos parâmetros nos níveis baixos e, conforme o avanço por gume ou a velocidade de corte aumentam a rugosidade também aumenta. Isto ocorre, pois a rugosidade aumenta com o aumento da secção transversal do cavaco, onde este é influenciado principalmente pelo avanço por gume, passo lateral e profundidade de corte (KLOCKE E KÖNIG, 2008).

Como forma de validar estatisticamente os efeitos dos fatores de controle no acabamento e se definir quais foram os mais significativos no experimento, gerou-se o gráfico de Pareto dos efeitos padronizados para o acabamento, conforme Figura 26.

Figura 26 – Gráfico de Pareto dos efeitos padronizados para o acabamento

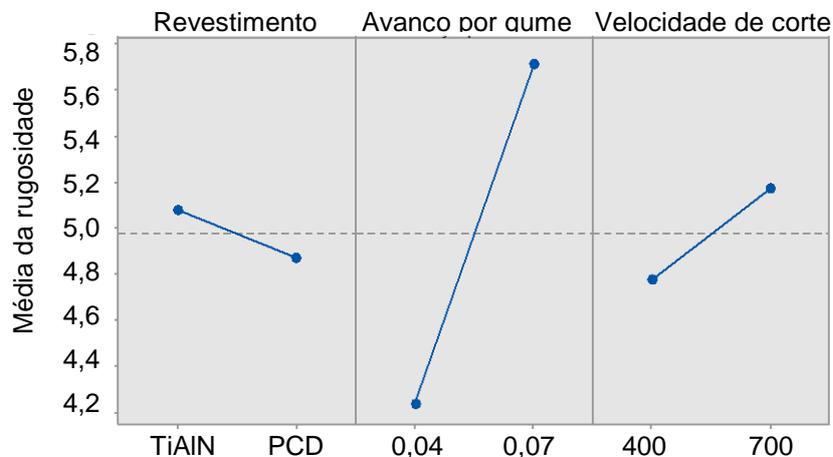


Fonte: Software MINITAB V.17

Através deste gráfico, observa-se que o parâmetro de corte influente no acabamento é o avanço por gume, confirmando o que foi citado por Yang, Chuang e Lin (2009).

De forma análoga ao Gráfico de Pareto, a Figura 27 identifica de forma qualitativa o comportamento da rugosidade diante da variação dos parâmetros de corte.

Figura 27 – Influência do revestimento, avanço por gume e velocidade de corte no acabamento



Fonte: Software MINITAB V.17

Constata-se que a utilização das ferramentas com revestimento TiAlN e o aumento do avanço por gume e da velocidade de corte, elevam a rugosidade. Contudo, o avanço por gume foi o fator de controle que mais oscilou em torno da média, indicando que foi o mais significativo no desgaste de flanco.

4.2 CUSTOS E TEMPOS DE USINAGEM

Além da redução do desgaste das fresas, outra vantagem na utilização dos parâmetros avanço por gume e velocidade de corte nos níveis mais altos é a redução no tempo de usinagem o que influencia diretamente no custo do eletrodo. Como exemplo, a combinação dos parâmetros avanço por gume 0,04 mm/gume e velocidade de corte 400 m/min, fez com que o tempo para usinagem do bloco de grafite fosse de 55 minutos, enquanto a combinação do avanço por gume de 0,07 mm/gume e velocidade de corte de 700 m/min levou apenas 18 minutos. Isto

representa 3 vezes menos tempo para a usinagem utilizando os parâmetros nos níveis altos.

Se considerarmos o valor hora da máquina que foi utilizada para a realização dos experimentos, que é de R\$ 85,00/hora, a usinagem do bloco com a combinação de parâmetros que levou 55 minutos teve um custo de R\$ 77,92, enquanto a usinagem que levou 18 minutos teve um custo de R\$ 21,25.

Deve-se considerar também que, com estes parâmetros, enquanto as fresas com revestimento TiAlN já haviam chegado ao final da vida útil, desgaste de flanco de 0,3 mm, as fresas com revestimento PCD haviam tido apenas um desgaste de no máximo 0,042 mm. Considerando também que as fresas com revestimento TiAlN possuem um custo de R\$ 145,00, enquanto que as fresas com revestimento PCD custam R\$ 285,00, isto representa aproximadamente 2x mais.

5 CONCLUSÕES

O presente trabalho proporcionou a compreensão de inúmeros conceitos acerca do fresamento de eletrodos de grafite, através da realização de ensaios experimentais.

A partir da abrangência do objetivo do estudo, analisaram-se os desgastes gerados nas ferramentas através da variação da velocidade de corte, do avanço por gume e do revestimento das ferramentas. Analisou-se também o acabamento do grafite levando-se em conta a variação destes mesmos parâmetros.

Com relação aos desgastes das ferramentas, pode-se concluir que a utilização do menor avanço por gume, 0,04 mm/gume, combinado à menor velocidade de corte, 400 m/min, gerou o maior desgaste de flanco, tanto nas ferramentas com revestimento TiAlN quanto nas ferramentas com revestimento PCD.

As ferramentas com revestimento PCD apresentaram os menores desgastes de flanco se comparadas às ferramentas com revestimento TiAlN, o que corrobora com o que inúmeros pesquisadores obtiveram e, analisando-se os resultados identificou-se que o revestimento é o parâmetro que mais influenciou o desgaste de flanco, seguido pelo avanço por gume e após pela velocidade de corte.

De maneira geral todas as ferramentas ensaiadas obtiveram os mesmos mecanismos e tipos de desgastes, sendo que a abrasão foi o principal mecanismo de desgaste apresentado, o que ocasionou o desgaste de flanco, desgaste de cratera e o desgaste de entalhe. Estes mesmos desgastes e mecanismo de desgaste foram observados por Klocke e König (2008), Cabral et al. (2006) e Almeida et al (2008).

Analisando-se apenas o desgaste de flanco, dentre os parâmetros testados, a combinação que gerou o menor resultado foi obtido com a utilização da ferramenta de metal duro com revestimento PCD, avanço por gume de 0,07 mm/gume e uma velocidade de corte de 700 m/min.

A respeito dos acabamentos, pode-se concluir que a utilização do avanço por gume e da velocidade de corte nos seus níveis baixos gerou os acabamentos com as rugosidades menores, sendo que, conforme análise feita, o parâmetro que mais influenciou o acabamento foi o avanço por gume.

Analisando-se apenas o acabamento, dentre os parâmetros testados, a combinação que gerou o menor resultado para a rugosidade foi obtido com a utilização da ferramenta de metal duro com revestimento PCD, avanço por gume de 0,04 mm/gume e uma velocidade de corte de 400 m/min.

6 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Baseando-se nos resultados obtidos, são sugeridos os seguintes tópicos como linhas de pesquisas que podem ser complementares a este trabalho:

- a) realizar testes completos de vida para as ferramentas com revestimento PCD a fim de realizar um comparativo com relação ao custo das ferramentas;
- b) avaliar o comportamento das ferramentas com avanços por gume e velocidades de corte maiores;
- c) testar as ferramentas com diferentes estratégias de usinagem, como por exemplo, utilizando sentido discordante de corte;
- d) avaliar os resultados de rugosidade relacionados ao batimento da ferramenta;
- e) averiguar o desgaste das ferramentas com relação ao tamanho de grão do grafite; e
- f) realizar testes com ferramentas de diamante monocristalino para verificação de desempenho.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ALMEIDA, F.A.; SACRAMENTO, J.; OLIVEIRA, F.J.; SILVA, R. F. Micro and nano-crystalline CVD Diamond coated tools in the turning of EDM graphite. **Journal of Surface and Coatings Technology**. v. 203, p. 271-276, 2008.
- ARIAS, L. M. **Análise do comportamento de diferentes sistemas CAM na usinagem de superfícies complexas utilizando altas velocidades**. 2009. 100 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Instituto Superior Tupy, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Joinville, 2009.
- 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.
- BOUJELBENE, M.; MOISAN, A.; TOUNSI, A.; BRENIER, B. Productivity enhancement in dies and molds manufacturing by the use C¹ continuous tool path. **International Journal of Machine Tools e Manufacturing**, v. 44, n. 44, p. 101-107, 2003.
- CABRAL, G.; REIS, P.; POLINI, R.; TITUS, E.; ALI, N.; DAVIM, J. P.; GRÁCIO, J. Cutting performance of time-modulated chemical vapour deposited diamond coated tool inserts during machining graphite. **Journal of Diamond and Related Materials**, v. 15, p. 1753 - 1758, 2006.
- CABRAL, G.; GÄBLER, J.; LIDNER, J.; GRÁCIO, J.; POLINI, R. A study of diamond film deposition on WC-co inserts for graphite machining: Effectiveness of SiC interlayers prepared by HFCVD. **Journal of Diamond and Related Materials**, v. 17, p. 1008 - 1014, 2008.
- CHEN, J. S.; HUANG, Y. K.; CHEM, M. S. A study of the surface scallop generating mechanism in the ball-end milling process. **International Journal of Machine Tools e Manufacture**, v. 46, p. 1077-1084, 2005.
- DINIZ, A. E.; MARCONDES, F. C.; COPPINI, N. L. **Tecnologia da usinagem dos materiais**. 4. ed. São Paulo: Artliber, 2003. 248 p.
- FERRARESI, D. **Fundamentos da usinagem dos metais**. 5 ed. São Paulo: Ed. Blücher, 1977. 751 p.
- GUERRA, G. Fornecedores do setor automotivo projetam dobrar produção no Rio Grande do Sul. **Clic RBS**. Rio Grande do Sul, 03 jun. 2014. Negócios. Disponível em <<http://wp.clicrbs.com.br/acertodecontas/2014/06/03/fornecedores-do-setor-automotivo-projetam-dobrar-producao-no-rio-grande-dosul/?topo=52,1,1,,171,e171>>. Acesso em 14 maio 2014.
- HAMDAM, A.; SARHAN, A. A. D.; HAMDY, M. An optimization method of the machining parameters in high-speed machining of stainless steel using coated carbide tool for best surface finish. **International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, v. 58, p. 81-91, 2012.

HELLENO, A. L.; SCHUTZER, K. Fatores que influenciam a usinagem de moldes e matrizes. **Revista de ciência e tecnologia**, Santa Bárbara do Oeste, v. 12, nº 23, p. 7-14, jan./jun. 2004.

KRATOCHVIL, R. **Fresamento de acabamento em altas velocidades de corte para eletrodos de grafita industrial**. 2004. Qualificação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Pós-graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis.

KLOCKE, F.; KÖNIG, W. **Fertigungsverfahren 1: Drehen, Fräsen, Bohren**. 8 ed. Aachen, Alemanha: Springer Verlag, 2008. 504 p.

LIMA, R. O. C.; MELO, A. C. A. Análise do desgaste e das avarias em insertos de metal duro após o fresamento com ar quente. **Associação Brasileira de Engenharia e Ciências Mecânicas**, Rio de Janeiro, Brasil, 2013.

LU, C. Study on prediction of surface quality in machining process. **Journal of Materials Processing Technology**, v. 205, p. 329-450, 2008.

MARKUS, W. **Aspectos tecnológicos da minimização e eliminação de fluido de corte no processo de torneamento com insertos de metal-duro revestidos com TiN**. 2001. Qualificação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Pós-graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis.

MATOS, M. R.; BOBROVNITCHII, G. S.; DIAS, C. A.; GUIMARÃES, R. S.; PLÁCIDO, R. J. C.; FILGUEIRA, M. Estudo do desgaste de cortadores PCD (Polycrystalline Diamond). **Revista Matéria**, v. 14, p. 759-766, 2009.

MONTGOMERY, D. C.; RUNGER, G. C. **Applied Statistics and Probability for Engineers**. 3 ed. Nova York, Estados Unidos: John Wiley e Sons, 2003. 976 p.

NICOLA, G. L. **Análise de superfícies fresadas por diferentes estratégias em aço H13 endurecido**. 2008. Qualificação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Pós-graduação em Engenharia Mecânica, Universidade de Caxias do Sul, Caxias do Sul.

NIEMINEM, I; PARO, J.; KAUPPINEN, V. High-speed milling of advanced materials. **Journal of Materials Processing Technology**, n. 56, p. 24-36, 1996.

POCO Graphite. EDM Technical Manual. Disponível em: < <http://edmttechman.com/>>. Acesso em: 16 de setembro de 2014.

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.

SECO Tools. Catálogo Machining Navigator 2012 – Jabro. Disponível em: <http://www.secotools.com/pt-BR/Global/Services--Support/Machining-Navigator/>. Acesso em: 20 de outubro de 2014.

STEMMER, C. E. **Ferramentas de corte 1**. 4 ed. Florianópolis, Santa Catarina: Ed. Da UFSC, 1995. v. 1. 249 p.

STEMMER, C. E. **Ferramentas de corte 2**: Brocas, alargadores, ferramentas de roscar, fresas, brochas, rebolos, abrasivos. 2 ed. Florianópolis, Santa Catarina: Ed. Da UFSC, 1995. v. 2. 326 p.

TOKAY Carbon. Graphite Electrode. Disponível em: <<http://www.tokaicarbon.co.jp>>. Acesso em: 22 de setembro de 2014.

VACARO, T. **Otimização do fresamento de topo esférico de planos inclinados aplicando o método de algoritmos genéticos**. 2013. Qualificação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Pós-graduação em Engenharia Mecânica, Universidade de Caxias do Sul, Caxias do Sul.

VAKONDIOS, D.; KYRATIS, P.; YALDIZ, S.; ANTONIADIS, A. Influence of milling strategy on the surface roughness in ball end milling of the aluminum alloy Al7075-T6. **Measurement**, v. 45, p.1480-1488, 2012.

WEINGAERTNER, W. L. Qualidade superficial e formação de cavacos na usinagem de Al e Cu. **Máquinas e Metais**, p.82-89, 1994.

YANG, Y. K.; CHUANG, M. T.; LIN, S. S. Optimization of dry machining parameters for high-purity graphite in end milling process via design of experiments methods. **Journal of Materials Processing Technology**, n. 209, p. 4395-4400, 2009.

**APÊNDICE A – MATRIZ DE PLANEJAMENTO E RESULTADOS DOS
EXPERIMENTOS**

Sequência Padrão	Ordem do Teste	Tipo de Revestimento	Avanço por gume (mm/gume)	Velocidade de corte (m/min)	Desgaste de flanco final (mm)	Rugosidade R_z Média (μm)
1	15	TiAlN	0,04	400	0,340	3,798
2	13	TiAlN	0,04	700	0,341	4,207
3	10	TiAlN	0,07	400	0,308	5,478
4	7	TiAlN	0,07	700	0,344	6,339
5	4	PCD	0,04	400	0,058	3,835
6	11	PCD	0,04	700	0,055	4,673
7	9	PCD	0,07	400	0,043	5,752
8	12	PCD	0,07	700	0,034	5,566
9	2	TiAlN	0,04	400	0,330	4,448
10	16	TiAlN	0,04	700	0,345	4,863
11	3	TiAlN	0,07	400	0,328	5,783
12	6	TiAlN	0,07	700	0,302	5,767
13	8	PCD	0,04	400	0,054	4,095
14	1	PCD	0,04	700	0,045	3,957
15	14	PCD	0,07	400	0,049	5,048
16	5	PCD	0,07	700	0,042	6,034

Fonte: O autor