

**UNIVERSIDADE DE CAXIAS DO SUL
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA – PPGMEC
MESTRADO PROFISSIONAL**

**EFEITO DO TRATAMENTO DA MICROGEOMETRIA DE FERRAMENTAS COM
REVESTIMENTO DIAMANTADO NO FRESAMENTO DE ELETRODO DE
GRAFITE**

CASSIANO ZANELLA

**CAXIAS DO SUL
2018**

**UNIVERSIDADE DE CAXIAS DO SUL
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA – PPGMEC
MESTRADO PROFISSIONAL**

CASSIANO ZANELLA

**EFEITO DO TRATAMENTO DA MICROGEOMETRIA DE FERRAMENTAS COM
REVESTIMENTO DIAMANTADO NO FRESAMENTO DE ELETRODO DE
GRAFITE**

Dissertação apresentada ao Programa de Mestrado Profissional em Engenharia Mecânica da Universidade de Caxias do Sul, visando à obtenção de grau de Mestre em Engenharia Mecânica.

Área de concentração: Projeto e fabricação.

CAXIAS DO SUL

2018

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)
Universidade de Caxias do Sul
UCS - BICE - Processamento Técnico

Z28e Zanella, Cassiano, 1989-
Efeito do tratamento da microgeometria de ferramentas com
revestimento diamantado no fresamento de eletrodo de grafite / Cassiano
Zanella. – 2018.
84 f. : il. ; 30 cm

Apresenta bibliografia.
Dissertação (Mestrado) – Universidade de Caxias do Sul, Programa de
Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, 2018.
Orientação: Prof. Dr. Rodrigo Panosso Zeilmann.

1. Usinagem. 2. Ferramentas. 3. Desgaste mecânico. 4. Grafita. I.
Zeilmann, Rodrigo Panosso, orient. II. Título.

CDU 2. ed.: 621.98

Índice para o catálogo sistemático:

1. Usinagem	621.98
2. Ferramentas	67.05
3. Desgaste mecânico	620.193.95
4. Grafita	549.21

Catalogação na fonte elaborada pela bibliotecária
Paula Fernanda Fedatto Leal – CRB 10/2291

**“EFEITO DO TRATAMENTO DA MICROGEOMETRIA DE FERRAMENTAS COM
REVESTIMENTO DIAMANTADO NO FRESAMENTO DE ELETRODO DE
GRAFITE.”**

Cassiano Zanella

Dissertação de Mestrado submetida à Banca Examinadora designada pelo Colegiado do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade de Caxias do Sul, como parte dos requisitos necessários para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Mecânica, Área de Concentração: Projeto e Fabricação.

Caxias do Sul, 21 de março de 2018.

Banca Examinadora:

Prof. Dr. Rodrigo Panosso Zeilmann
Orientador
Universidade de Caxias do Sul

Prof. Dr. Alexandre Fassini Michels
Universidade de Caxias do Sul

Prof. Dr. Frank Patrick Missell
Universidade de Caxias do Sul

Prof. Dr. Sidnei Moura e Silva
Universidade de Caxias do Sul

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 noiva 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.

À Universidade de Caxias do Sul, pela disponibilização dos laboratórios para a execução dos ensaios e análises.

Ao Me. Eng. Israel Krindges pelo auxílio na execução das análises do MEV e EDS no Laboratório Central de Microscopia da Universidade de Caxias do Sul.

À empresa Secta Tools pela disponibilização e auxílio no processo de acabamento por arraste. Também ao Sr. Bruno Ballardin pelo auxílio prestado durante o processo de polimento.

Ao amigo Eng. Tiago Scopel pelo apoio, amizade e contribuição para a realização deste trabalho.

Aos bolsistas do Grupo de Usinagem de Caxias do Sul, Sr. Ramiro Kramer Silva, Me. Eng. Charles Ost e à Me. Eng. Fernanda Fontanive pelo auxílio na execução deste trabalho.

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

“A mente que se abre a uma nova ideia jamais voltará ao seu estado original.”

Albert Einstein

RESUMO

A crescente necessidade de fabricação de moldes com prazos e custos cada vez menores exige das ferramentarias a personalização e melhoria de seus processos de fabricação. Uma das maneiras de atingir isso é através da melhoria na usinagem dos eletrodos, já que esse processo afetará diretamente a precisão dimensional e tempo de produção de um molde. O uso de grafite como matéria-prima para esses eletrodos é altamente satisfatório, pois esse material apresenta a vantagem de ser usinado mais rapidamente e permitir uma grande variedade de formas geométricas, contudo, sua principal desvantagem é o alto poder abrasivo o que ocasiona desgastes elevados nas ferramentas. Os processos de tratamentos de gume são aplicados a fim de reduzir o efeito deste problema, aumentando a durabilidade das ferramentas. Com isso em vista, este trabalho realizou o estudo sobre o efeito de tratamentos de gume no desgaste de ferramentas com revestimento de diamante policristalino (PCD), no fresamento de eletrodos em grafite. Foram realizados ensaios experimentais com fresas sem tratamento, com tratamentos pelo método de polimento com cerdas abrasivas e por acabamento por arraste. Os testes consistiram em usinar eletrodos com parâmetros definidos e verificar o desgaste gerado nas fresas a cada 200 metros de comprimento usinado. Foram realizados também, análises de rugosidade e caracterização das fresas após os tratamentos, caracterização da mídia e da esponja utilizadas nos polimentos e caracterização do grafite usinado. Os resultados apontam que os tratamentos de gume resultam em alterações na superfície do revestimento, reduzindo o valor da rugosidade em média de 23%, e, no caso do processo de acabamento por arraste, uma redução na variação dos valores, já que este processo é considerado mais confiável e reprodutível. A caracterização da mídia e da esponja utilizadas indicou a presença de Silício como material abrasivo, o que provavelmente pode caracterizar um material de carbeto de silício. Com relação ao desgaste das ferramentas, pela curva de vida das mesmas, foi evidente ganhos como redução do desgaste de flanco e um aumento no comprimento usinado de até 63% em comparação com as ferramentas originais. Todas as ferramentas passaram pelos Estágios I e II da curva de desgaste e não chegaram ao Estágio III, conhecido como Desgaste Catastrófico. O mecanismo de desgaste, aparentemente, mais presente no processo foi a abrasão, apresentando como características os desgastes de flanco, cratera e entalhe. De forma geral, os dois processos de polimento apresentaram ganhos e demonstraram seus potenciais para serem aplicados em ferramentas de produção.

Palavras-chave: Tratamento de gume, Revestimento PCD, Grafite, Desgaste.

ABSTRACT

The rising need for manufacturing molds with increasingly smaller deadlines and costs is demanding from the toolmakers to customize and enhance their fabrication processes. One of the ways to achieve that is by improving their electrode machining, since this process will affect directly in the result of the dimensional precision and production time of the mold. The usage of graphite as raw material for electrodes is known to be highly satisfactory since the graphite has the advantage of machining faster and allowing a great variety of geometrical forms, however, its main disadvantage is that the graphite also has a high level of wearing during the machining process. The cutting edge preparations are used in order to reduce the effects of this problem, increasing the durability of the tools. In that interest, this paper has researched the effect of edge preparations on the wear of tools with polycrystalline diamond coating (PCD), in the milling of graphite electrodes. Therefore, experimental tests were performed with untreated tools, tools polished with abrasive brushes and tools treated by the polishing method with drag finishing. The tests consisted in machining electrodes with defined parameters and checking the wear generated on the cutters every 200 meters of machined length. Analysis of roughness, characterization of the tools after the treatments, characterization of the media and the brush used in the polishes and characterization of the machined graphite were also performed. The findings indicate that the edge preparation results in modifications on the coating surface, reducing the roughness value by a mean of 23%, and in the case of drag finishing process, a variation of the values reduction, since this process is more reliable and reproducible. The media and brush characterization indicated the silicon presence as an abrasive material, which may characterize a silicon carbide material. With regard to the tools wear, due to their life curve, gains such as reduction of flank wear and a length-machined increase of up to 63% were noticed, in comparison to the original tools. All tools passed through Stages I and II of Wear Curve, and did not reach Stage III, known as Catastrophic Wear. Abrasion was, apparently, the most present wear mechanism in the process, presenting as characteristics the flank wear, crater wear and notch wear. In conclusion, the two polishing processes showed gains and demonstrated their potential to be applied in tools production.

Keywords: Edge preparation, PCD coating, Graphite, Wear.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Avarias e desgastes nas ferramentas de corte	20
Figura 2 – Formas de desgastes e grandezas na cunha de corte.....	21
Figura 3 – Mecanismos de degaste	22
Figura 4 – Comportamento da curva de vida padrão	24
Figura 5 – Formação de cavaco no grafite	25
Figura 6 – Resultante de forças na formação do cavaco	25
Figura 7 – Força de corte no fresamento concordante e discordante	26
Figura 8 – Desgaste em forma de pente em uma ferramenta com revestimento PCD	28
Figura 9 – Diagrama das forças que atuam em uma partícula em contato com uma superfície sólida	29
Figura 10 – Estrutura do grafite.....	30
Figura 11 – Principais efeitos dos tratamentos de gumes.....	33
Figura 12 – Processos de tratamentos de gume.....	34
Figura 13 – (a) Superfície sem polimento; (b) Superfície após polimento.....	36
Figura 14 – Cinemática do polimento por cerdas abrasivas.....	37
Figura 15 – Cinemática do processo de acabamento por arraste	38
Figura 16 – Processo de polimento.....	44
Figura 17 – Região de medição da rugosidade.....	46
Figura 18 – (a) Comportamento da curva de vida das ferramentas de metal duro com revestimento TiAlN e (b) comportamento da curva de vida das ferramentas de metal duro com revestimento de PCD.	50
Figura 19 – Boxplot do desgaste de flanco para a remoção de 15 planos de material	51
Figura 20 – Gráfico de Pareto para os Efeitos Padronizados (resposta é Desgaste, Alpha = 0,01).....	52
Figura 21 – Imagens dos desgastes das ferramentas do pré-teste.....	53
Figura 22 – Grãos de carbetto de silício.....	53
Figura 23 – Análise por EDS da mídia abrasiva.....	54
Figura 24 – Vista detalhada da esponja de polimento.....	55
Figura 25 – Análise por EDS da esponja	55
Figura 26 – Medições de diâmetro, ângulo de hélice e raio de quina	56

Figura 27 – Análise MEV das superfícies das ferramentas com diferentes tratamentos	57
Figura 28 – Valores de rugosidade para as ferramentas	59
Figura 29 – Análise por Fischer dos valores de rugosidade.....	59
Figura 30 – Espessura do revestimento.....	60
Figura 31 – Superfícies do grafite fraturada e usinada.....	61
Figura 32 – Estrutura do grafite.....	62
Figura 33 – Comportamento de vida das ferramentas	64
Figura 34 – Vista do desgaste de flanco máximo das ferramentas testadas	65
Figura 35 – Comprimento de corte por processo	65
Figura 36 – Análise por Fischer do comprimento usinado	66
Figura 37 – Imagens das ferramentas.....	68
Figura 38 – Desgaste em forma de pente	69
Figura 39 – Representação esquemática do desgaste de cratera e entalhe gerados durante a usinagem.....	69
Figura 40 – Sistema de centragem e fixação Erowa ITS®.....	81
Figura 41 – Centro de Usinagem Rödgers RXP 801.....	81
Figura 42 – Microscópio Digital de mão Micro Zoom (a) e Sistema de Medição Óptico e Vídeo Swift Duo (b)	82
Figura 43 – Equipamento MEV - TESCAN.....	82
Figura 44 – Rugosímetro Mahr S2	83
Figura 45 – Centro de Usinagem Dyna Myte DM4500.....	83
Figura 46 – Equipamento para o acabamento por arraste DF3 tool.....	84

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Propriedades dos revestimentos TiAlN e PCD.....	30
Tabela 2 – Relação de trabalhos com tratamentos de gumes	34
Tabela 3 – Sequência para realização dos testes.....	41
Tabela 4 – Propriedades do grafite utilizado	43
Tabela 5 – Características da ferramenta	44
Tabela 6 – Tabela dos fatores e seus níveis	48
Tabela 7 – Tabela ANOVA para o desgaste de flanco do pré-teste.....	80

LISTA DE ABREVIATURAS

AA	Acabamento por arraste	
ANOVA	Análise de variância	
CBN	Nitreto cúbico de boro	
CNC	Comando numérico computadorizado	
CVD	<i>Chemical vapour deposition</i>	Deposição química de vapor
DIN	<i>Deutches Institut für Normung</i>	Instituto Alemão de Normas
EDS	<i>Energy dispersive x-ray detector</i>	Análise por espectrometria de energia dispersiva de raios-x
EDM	<i>Electrical discharge machining</i>	Eletro erosão
FAN	Filamento abrasivo de nylon	
FO	Ferramenta original	
HSM	<i>High Speed Machining</i>	Usinagem de alta velocidade
MEV	Microscopia eletrônica de varredura	
PCA	Polimento com cerdas abrasivas	
PCD	<i>Polycrystalline diamond</i>	Diamante policristalino
RPM	Rotações por minuto	
TiAlN	Nitreto de Titânio Alumínio	

LISTA DE SÍMBOLOS

α	nível de significância [%]
α	ângulo de folga [graus]
λ	ângulo de hélice [graus]
λ_c	<i>cut-off</i> [mm]
Ω	ângulo do cantilever [graus]
Ω_c	ângulo de contato do cantilever [graus]
Ω_r	ângulo de desprendimento do cantilever [graus]
γ	ângulo de saída [graus]
a_e	profundidade de corte radial [mm]
a_p	profundidade de corte axial [mm]
F_{bs}	força cisalhante de escovamento [N]
F_{bn}	força normal de escovamento [N]
f	avanço [mm]
f_z	avanço por gume [mm/gume]
L	comprimento do filamento [mm]
n	rotação [RPM]
r_β	raio do gume [mm]
r_ϵ	raio de quina [mm]
r_h	raio do cantilever [mm]
S	superfície da peça
SV_α	deslocamento do gume no sentido do flanco
SV_γ	deslocamento do gume no sentido da face
V_B	desgaste de flanco [mm]
V_{Bmax}	desgaste de flanco máximo [mm]
v_c	velocidade de corte [m/min]
y_b	profundidade de penetração [mm]
Z_n	número de gumes

SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO.....	15
1.1	JUSTIFICATIVA	15
1.2	OBJETIVOS	17
1.2.1	Objetivo geral	17
1.2.2	Objetivos específicos.....	17
2.	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	18
2.2	FRESAMENTO	18
2.2.1	Formação de cavaco	18
2.2.2	Mecanismos e tipos de desgastes.....	19
2.2.2.1	Vida da ferramenta.....	23
2.2.3	Fresamento de grafite	24
2.2.3.1	Mecanismos e tipos de desgastes no grafite.....	27
2.2.3.2	Ferramentas para usinagem de grafite.....	29
2.3	GRAFITE COMO MATERIAL DE ENGENHARIA	30
2.4	TRATAMENTO DE GUME	32
2.4.1	Polimento com cerdas abrasivas.....	36
2.4.2	Acabamento por arraste	37
3.	METODOLOGIA EXPERIMENTAL	40
3.1	PLANEJAMENTO EXPERIMENTAL.....	40
3.1.1	Variáveis de entrada.....	40
3.1.2	Variáveis de saída	41
3.2	MÁQUINAS E EQUIPAMENTOS	42
3.3	MATERIAL DOS ELETRODOS	43
3.4	FERRAMENTAS	43
3.4.1	Processo de polimento com cerdas abrasivas.....	44
3.4.2	Processo de acabamento por arraste.....	45
3.4.3	Caracterização da mídia e das cerdas abrasivas	45
3.4.4	Caracterização das ferramentas	46
3.4.5	Caracterização do grafite.....	46
3.5	PRÉ-TESTE	47
4.	RESULTADOS	49
4.1	PRÉ-TESTE	49
4.2	CARACTERIZAÇÃO DA MÍDIA DO ACABAMENTO POR ARRASTE	53

4.3	CARACTERIZAÇÃO DA ESPONJA DE POLIMENTO.....	54
4.4	CARACTERIZAÇÃO DAS FERRAMENTAS.....	56
4.5	CARACTERIZAÇÃO DO GRAFITE	60
4.6	DESGASTES DAS FERRAMENTAS	63
4.6.1	Curva de vida das ferramentas	63
4.6.2	Mecanismos de desgaste	67
5.	CONCLUSÃO	71
6.	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	73
7.	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	74
8.	APÊNDICE A – ANÁLISE ESTATÍSTICA.....	80
9.	ANEXO A – EQUIPAMENTOS UTILIZADOS	81

1. INTRODUÇÃO

1.1 JUSTIFICATIVA

Devido à elevada competitividade apresentada no mercado global, menores tempos de processos e baixos custos de fabricação são necessários para que as organizações atendam seus prazos de lançamentos e continuem obtendo um lucro satisfatório (RYU, CHOI e CHU, 2006; HELLENO, 2004).

De acordo com Santanna (2015) e Kaplan e Norton (1997), na era da informação, as empresas estão baseadas em um conjunto de premissas operacionais, onde os ciclos de vida dos produtos são cada vez menores. Isso leva à uma necessidade de melhoria contínua nos processos e produtos de uma organização a fim de obter sucesso a longo prazo.

Neste cenário, a confecção de moldes e matrizes para injeção de polímeros conquista espaço gradativamente, uma vez que a injeção de peças possibilita uma produção seriada, com alto grau de confiabilidade e baixos prazos de entrega.

Como exemplo, de acordo com Arias (2009), a demanda por produtos plásticos cresceu de forma expressiva e representa um consumo de 35% de todo o polímero produzido no país.

A imprescindibilidade das ferramentarias se expandirem rapidamente, ocorre em função da necessidade constante de aperfeiçoamento de soluções para a fabricação e os menores ciclos de vida dos produtos, em função de uma maior concorrência do mercado (CUNHA, 2016; VENTURA, 2010).

Conforme Alves (2017) e Santanna (2015), mesmo com a crise que ocorre no Brasil, as ferramentarias tem apresentado um desempenho positivo devido ao programa federal Inovar-Auto, que incentivou a nacionalização de automóveis por parte das montadoras, e a alta do dólar, o que torna os preços dos moldes nacionais mais competitivos.

Em virtude da alta solicitação das ferramentarias, uma forma destas melhorarem seus prazos de entrega e serem mais competitivas no mercado global, é atuar na redução dos tempos e melhorias nos processos de fabricação dos moldes, uma vez que, conforme Boujelbene et al. (2003), Sandvik (2002) e Altan, Lilly e Yen (2001), o custo de usinagem pode chegar a 30% do custo total do molde.

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, elevado tempo gasto para a confecção dos mesmos e exigência de qualidade superficial. Esta alta precisão se deve ao fato de ser o eletrodo a ferramenta utilizada na EDM.

Na sua grande parte, os eletrodos são fabricados em grafite ou cobre, devido à alta condutividade elétrica destes materiais, o que auxilia a elevar as taxas de remoção de material na EDM (AMORIM, 2002).

Contudo, conforme Klocke e König (2008), Almeida et al. (2008), Cabral et al. (2006) e Kratochvil (2004), para a usinagem de grafite, devido ao elevado desgaste por abrasão gerado no fresamento, são utilizadas fresas com geometrias específicas e revestimentos de diamante policristalino (PCD - *Polycrystalline Diamond*), dedicadas para esta aplicação.

Estas características tornam as ferramentas mais caras, se comparadas às fresas utilizadas na usinagem de aços comuns, e acabam dificultando as suas aquisições pelas ferramentarias.

A melhoria das características destas fresas específicas, com o objetivo de aumentar a vida útil e reduzir a quantidade de trocas nas máquinas, é uma das soluções encontradas para tornar a sua utilização mais factível nas empresas.

Como exemplo da importância destas melhorias, conforme Zeilmann et al. (2013) e Bhattacharyya et al. (2007), as falhas das ferramentas de corte (desgastes e quebras), representam cerca de 20% do tempo de inatividade de uma máquina-ferramenta.

Além disso, conforme Xu et al. (2016), o custo de fabricação irá diminuir 15% quando a eficiência de corte melhorar 20%.

Basicamente, os desenvolvimentos de novos conceitos em ferramentas de corte estão focados em quatro aspectos: tecnologias em revestimentos, otimização das geometrias das ferramentas, novos substratos para estas e novas abordagens para os tratamentos de gumes (RODRIGUEZ, 2009).

Na última década houve um aumento significativo em pesquisas relacionadas aos efeitos positivos dos tratamentos de gumes, onde o principal objetivo deste

processo é gerar uma geometria específica no contorno do gume e produzir uma melhora na micro topografia da ferramenta (RODRIGUEZ, 2009).

O projeto proposto visa analisar a influência de diferentes condições de tratamentos de gume em fresas de metal duro com revestimento PCD, na usinagem de grafite.

1.2 OBJETIVOS

1.2.1 Objetivo geral

O presente trabalho possui como objetivo estudar e compreender os efeitos dos tratamentos de gume sobre os desgastes apresentados em fresas com revestimento de diamante policristalino (PCD), na usinagem de fresamento de eletrodos de grafite.

1.2.2 Objetivos específicos

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

- a) estudar e compreender os métodos usuais utilizados para os tratamentos de gume, principalmente em revestimentos com durezas mais elevadas;
- b) aplicar os métodos de tratamentos de gume de acabamento por arraste e polimento com cerdas abrasivas em fresas de metal duro com revestimento de diamante policristalino (PCD);
- c) caracterizar o acabamento gerado pelos dois tratamentos de gume no revestimento PCD;
- d) avaliar através de ensaios experimentais a influência dos dois tratamentos de gume na vida útil da fresa e realizar comparação com a fresa original durante produção;
- e) verificar os mecanismos e tipos de desgastes presentes nas fresas após a realização dos ensaios experimentais.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.2 FRESAMENTO

De acordo com a norma DIN 8580, a usinagem pode ser definida como todas as variações do processo de corte, onde a forma é alterada através da redução da coesão de um material.

A deformação do material é atingida por meio de um movimento relativo entre a ferramenta e a peça de trabalho que produz uma transferência de energia (KLOCKE e KÖNIG, 2008).

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

O fresamento é uma variação deste processo de corte, que possui como característica a remoção de cavaco por intermédio do movimento de corte circular da ferramenta com um ou mais gumes para a geração de superfícies (SCHROETER e WEINGAERTNER, 2002).

2.2.1 Formação de cavaco

No processo de usinagem, a formação do cavaco envolve elevadas taxas de deformações e temperaturas. O fluxo plástico de material ocasiona tensões locais nas ferramentas, distribuições de temperaturas na interface cavaco-ferramenta e determina as condições do material da peça após a remoção do cavaco (DAVIES, 1999 apud POLLI, 2002).

Estas quantidades locais 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).

Na usinagem de materiais dúcteis, os quais possuem uma grande zona plástica, em condições normais de usinagem com ferramentas de metal duro ou de aço rápido, a formação do cavaco apresenta-se da seguinte forma (DINIZ, MARCONDES e COPPINI, 2003):

1. Uma parcela do material, que ainda não foi desprendida da peça, é recalçada (deformações plásticas e elásticas), contra a superfície de saída da ferramenta;
2. A deformação plástica aumenta de forma progressiva, até que as tensões de cisalhamento se tornem elevadas ao ponto de ocorrer 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 do cavaco, podendo ser parcial ou completo, o que 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 atrito 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 pequena, as fases 1 e 2 descritas acima são bem reduzidas (DINIZ, MARCONDES e COPPINI, 2003).

Na fase 3 a ruptura do cavaco é total, tanto da peça como também das porções anteriores e posteriores do cavaco. A fase 4 ainda ocorre devido ao atrito do cavaco durante a saída (DINIZ, MARCONDES e COPPINI, 2003).

Os cavacos gerados podem apresentar aspectos distintos, o que depende da velocidade de corte (v_c), da velocidade de avanço (v_f), profundidade de corte (a_p), geometria da ferramenta, fluido de corte, material da peça, entre outros fatores (STEMMER, 1995).

As formas dos cavacos podem ser classificadas em três tipos básicos: cavaco cisalhado, cavaco de ruptura e cavaco contínuo (FERRARESI, 1977).

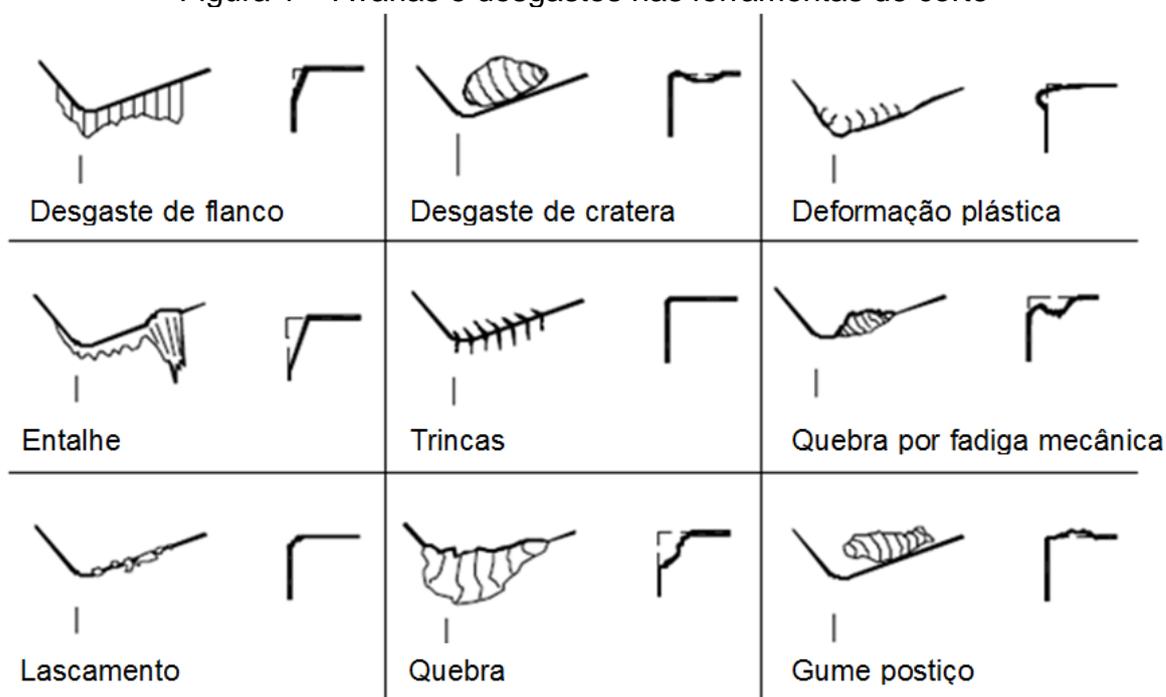
O fator determinante do tipo de cavaco a ser gerado é o material da peça usinada. De forma geral, materiais dúcteis, como aços, formam cavacos contínuos ou de cisalhamento, e materiais frágeis, como grafites, formam cavacos de ruptura (DINIZ, MARCONDES e COPPINI, 2003).

2.2.2 Mecanismos e tipos de desgastes

De acordo com Diniz, Marcondes e Coppini (2003), a ferramenta de corte é solicitada mecânica e termicamente durante o processo de usinagem.

Devido ao material da peça e da ferramenta não serem homogêneos, diversas avarias e desgastes podem ocorrer na ferramenta de corte durante a sua utilização, como pode ser visualizado na Figura 1. Dentre elas, as principais são: lascamento, trinca, deformação plástica do gume, desgaste de entalhe, desgaste de flanco e desgaste de cratera.

Figura 1 – Avarias e desgastes nas ferramentas de corte



Fonte: Adaptado de Sandvik apud Markus (2001)

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

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

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).

O desgaste de entalhe ocorre na região de interface peça/ferramenta/cavaco, no lado exposto da superfície de corte. Este desgaste é decorrência da ação das rebarbas produzidas nas bordas dos cavacos, as quais apresentam uma taxa de encruamento maior que na parte central do mesmo (KLOCKE e KÖNIG, 2008).

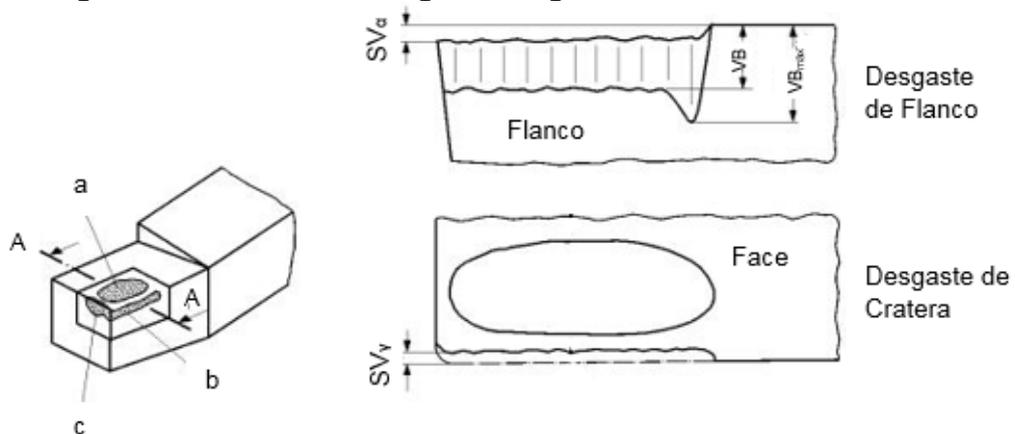
Esta região possui uma dureza mais elevada, o que envolve um mecanismo de aderência e remoção. Na região da formação do entalhe, a ferramenta também é submetida à ação oxidante da atmosfera (KLOCKE e KÖNIG, 2008).

O desgaste de flanco ocorre na superfície de folga da ferramenta, causado pelo contato entre ferramenta e peça (DINIZ, MARCONDES e COPPINI, 2003).

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

Segundo Klocke e König (2008), na região do flanco da ferramenta, onde ocorre o desgaste de flanco, são medidas a largura média do desgaste V_B e a largura máxima da marca de desgaste $V_{B_{máx}}$. As grandezas de desgastes avaliadas estão representadas na Figura 2.

Figura 2 – Formas de desgastes e grandezas na cunha de corte



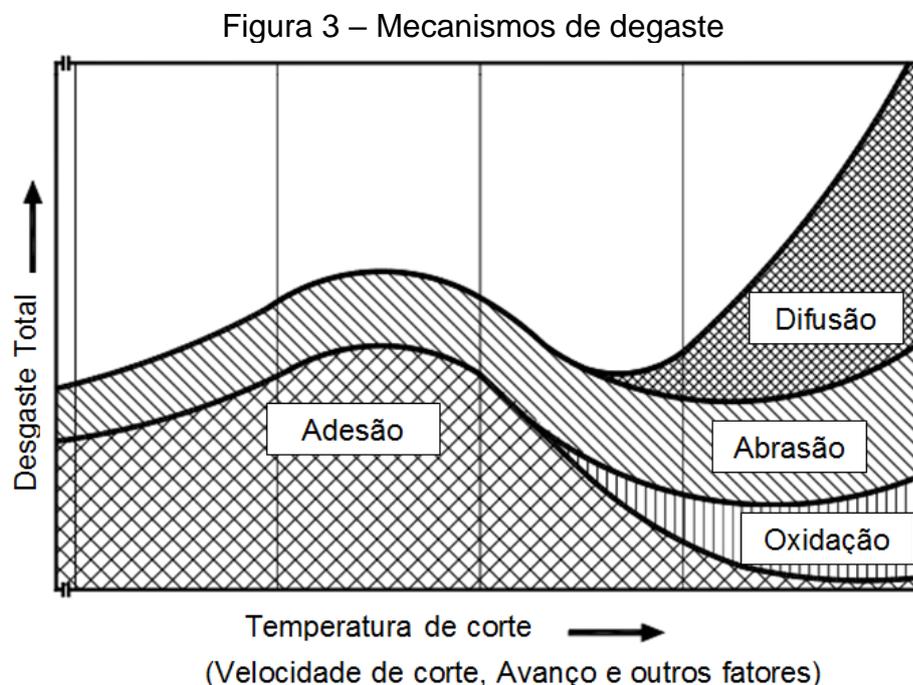
- a Desgaste de cratera
- b Desgaste de flanco no gume principal
- c Desgaste de flanco no gume secundário

- SV_γ Deslocamento do gume no sentido da face
- SV_α Deslocamento do gume no sentido do flanco
- VB Desgaste de flanco

Fonte: Kratochvil (2004)

Conforme Klocke e König (2008), os principais mecanismos causadores dos desgastes nas ferramentas são: adesão, oxidação, difusão e abrasão mecânica. A

Figura 3 aponta a faixa de temperatura de corte em que cada mecanismo tem maior atividade.



Fonte: Adaptado de Klocke e König (2008)

Conforme Stemmer (1995), a adesão entre as asperezas superficiais da ferramenta e o material da peça ocorre devido à ação da temperatura e das altas pressões presentes na zona do corte. Este processo ocorre, pois, a superfície inferior do cavaco, recém arrancado, apresenta-se limpa, sem camadas protetoras de óxidos e, portanto, quimicamente muito ativa.

Um exemplo da adesão 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 (STEMMER, 1995).

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 extraídas. Este desprendimento pode acabar arrastando partes da ferramenta, ocasionando o desgaste da mesma (STEMMER, 1995).

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 (STEMMER, 1995).

O mecanismo de difusão é um fenômeno 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 (KLOCKE e KÖNIG, 2008; DINIZ, MARCONDES e COPPINI, 2003).

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. (KLOCKE e KÖNIG, 2008; DINIZ, MARCONDES e COPPINI, 2003).

A abrasão mecânica acontece devido ao efeito abrasivo de partículas fixas na superfície de contato da peça ou no cavaco, em decorrência das altas pressões e temperaturas entre a peça e a ferramenta. (KLOCKE e KÖNIG, 2008; STEMMER, 1995).

Esse tipo de desgaste prejudica o acabamento superficial da peça, pois altera a forma do gume da ferramenta, o que pode ocasionar mudanças dimensionais e afetar as tolerâncias do produto (DINIZ, MARCONDES e COPPINI, 2003).

2.2.2.1 Vida da ferramenta

A vida da ferramenta pode ser definida como sendo o tempo em que a mesma trabalha efetivamente sem perder a sua capacidade de corte, até que um critério de fim de vida seja atingido (FERRARESI, 1977).

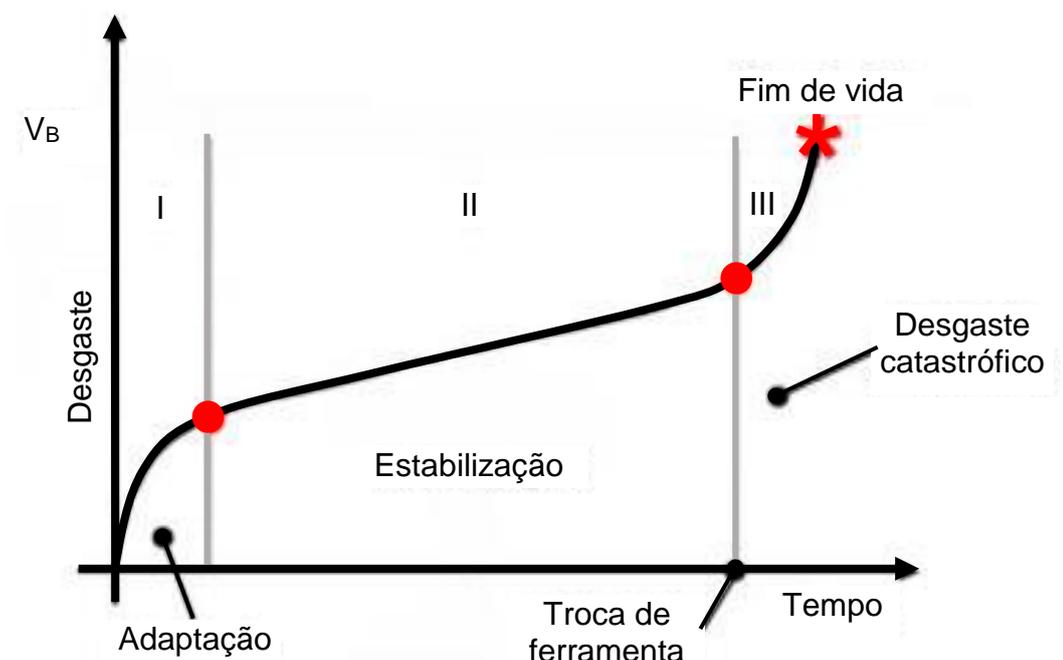
A ferramenta deve ser substituída quando este critério for atingido, pois a não substituição no momento adequado traz como consequência o aumento excessivo das forças de usinagem, o acabamento superficial não adequado e a possível quebra da ferramenta (FERRARESI, 1977).

Em condições de corte adequadas, a curva de vida de uma ferramenta tende a seguir um padrão conforme mostrado na Figura 4.

A evolução do desgaste apresenta-se em três formas: no estágio I ocorre um desgaste mais acentuado natural da adequação ao sistema tribológico envolvido; no estágio II o desgaste segue uma taxa constante de aumento, com um processo de corte mais estável; já o estágio III apresenta uma aceleração do desgaste, onde as temperaturas e tensões envolvidas promoverão o colapso da ferramenta com a continuidade do corte (MACHADO et al. 2009).

Os critérios mais usuais utilizados para a definição do final de vida das ferramentas, são a atribuição de valores limites para os desgastes de flanco e desgaste de flanco máximos, o tempo efetivo de trabalho, o percurso de corte, o número de peças produzidas e a rugosidade da peça (DINIZ, MARCONDES e COPPINI, 2003).

Figura 4 – Comportamento da curva de vida padrão



Fonte: Ost (2016)

2.2.3 Fresamento de grafite

Conforme Klocke e König (2008) e Astakhov, Shvets e Osman (1997), devido a estrutura policristalina do grafite, ao invés de deformação plástica, o corte ocorre por processo de fratura desta estrutura, fundamentalmente isto implica na dificuldade de relacionar a usinagem de grafite com a usinagem de aço.

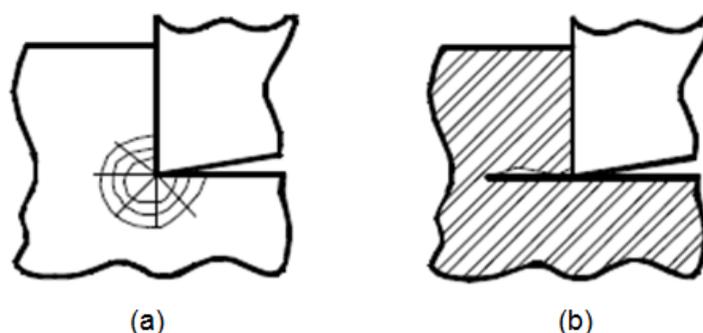
Durante o avanço da ferramenta através do material, a região de corte fratura o grafite logo à frente do gume da ferramenta. Este processo gera pequenas partículas que resultam em pó de grafite, ao invés de cavacos, conforme verificado na usinagem de metais (CABRAL et al., 2006).

Ao ocorrer a penetração do gume, a tensão no material da peça inicia-se à frente do gume, de acordo com a Figura 5 (a). Ao atingir o seu limite, uma trinca se forma na frente do gume, Figura 5 (b). Neste estágio, apenas tensões de

compressão existem na zona de deformação (ASTAKHOV, SHVETS e OSMAN, 1997)

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 e OSMAN, 1997).

Figura 5 – Formação de cavaco no grafite

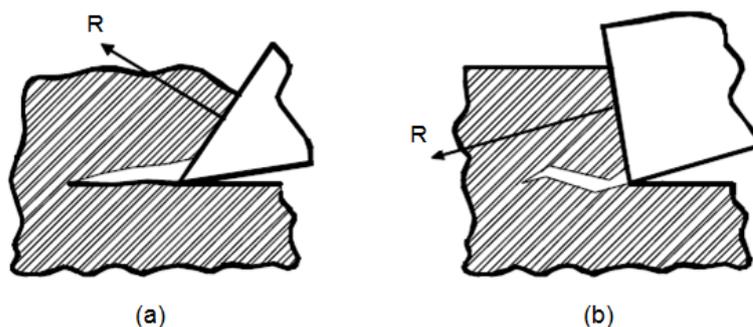


Fonte: Adaptado de Astakhov, Shvets e Osman (1997)

Na usinagem de grafite, fundamentalmente duas situações podem ser identificadas na formação do cavaco. A primeira ocorre quando a tensão de flexão atua de forma ativa. Este processo acontece quando a força resultante R intercepta o eixo de formação da trinca, Figura 6 (a) (ASTAKHOV, SHVETS e OSMAN, 1997).

A segunda situação acontece quando a força resultante atua de forma tão direta que não há tensão de flexão na formação do cavaco, Figura 6 (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 e OSMAN, 1997).

Figura 6 – Resultante de forças na formação do cavaco



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

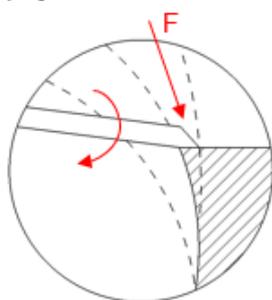
À vista disso, a forma como o cavaco é gerado pode ser um parâmetro controlável no corte do grafite, pois quando a compressão e a flexão atuam de forma conjunta, melhores condições de trabalho, como menor geração de pó, podem ser alcançadas, além do fornecimento de menos energia à zona de corte (KLOCKE e KÖNIG, 2008).

No fresamento de grafite, devido à possibilidade de fratura da borda da peça, a direção de corte também deve ser levada em consideração.

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, conforme a Figura 7. (SCHROETER et al. 2006).

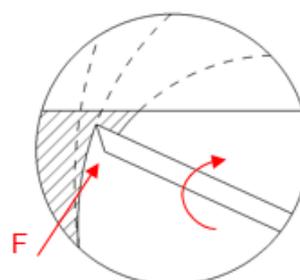
Figura 7 – Força de corte no fresamento concordante e discordante

Vetor da força de corte entrando na peça – Sentido concordante

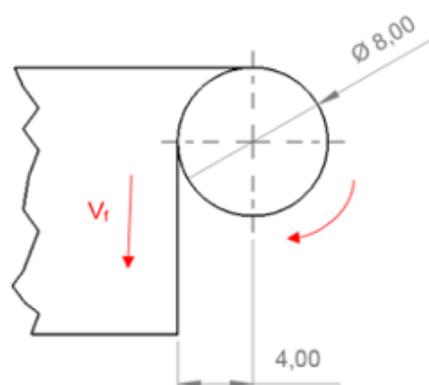
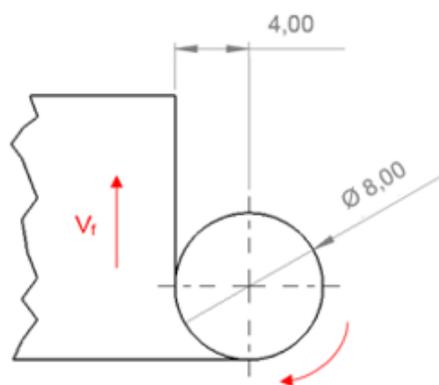


Estratégia não crítica

Vetor da força de corte saindo da peça – Sentido discordante



Estratégia crítica



Fonte: Adaptado de Kratochvil (2004)

Adicionalmente, esta quebra é proporcional à quantidade de material removido pela força atuante. Com profundidades de corte maiores, a condição para que ocorram as fraturas é mais favorável (SCHROETER et al. 2006).

2.2.3.1 Mecanismos e tipos de desgastes no grafite

Conforme Klocke e König (2008), Almeida et al. (2008) e Cabral et al. (2006), o mecanismo de desgaste prevaemente na usinagem de grafite é a abrasão, que advém pelo atrito do fluxo do pó ultrafino. Esse tipo de desgaste ocorre tanto na face da ferramenta como no flanco principal.

Esta abrasão está relacionada ao coeficiente de atrito do grafite que sob condições ambientais normais e com os planos basais do grafite paralelos à superfície fica em aproximadamente $\mu = 0,3$ (BERMAN et al., 2014; FOUQUEST et al., 2008).

Contudo, se for provocado um dano ao plano basal, regiões de alta energia são expostas, com maior capacidade de abrasão, havendo um aumento expressivo no coeficiente de atrito, podendo chegar a valores entre 0,4 e 0,6. O que ocorre especialmente durante a formação do cavaco devido às quebras das ligações covalentes entre os átomos de carbono (BERMAN et al., 2014; FOUQUEST et al., 2008; HUTCHINGS, 1992; SKINNER, GANE E TABOR, 1971).

Como comparativo, a energia de ligação interplanar é cerca de um décimo a um centésimo daquela entre átomos dentro das camadas, sendo muito menos resistente ao cisalhamento no plano basal (paralelo aos planos atômicos), do que em outras direções (HUTCHINGS, 1992).

Tradicionalmente, as propriedades lubrificantes do grafite são atribuídas à fraca interação entre as camadas de grafite adjacentes. A ideia intuitiva de que isso levaria ao cisalhamento fácil é considerada insatisfatória (BRAGG, 1928).

Bowden et al. (1951), indicou que a ruptura simultânea de todas as ligações em um plano, isto é, a clivagem, exige uma energia muito alta. Isso é suportado pelo fato de que o grafite não cisalha prontamente, a menos que uma alta compressão seja sobreposta.

O desgaste sobre o flanco e a face da ferramenta pode ser determinado através de dois tipos de efeitos, que estão dependentes da região da superfície envolvida no corte (KÖNIG, 1997 apud KRATOCHVIL, 2004).

O primeiro efeito, conhecido 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

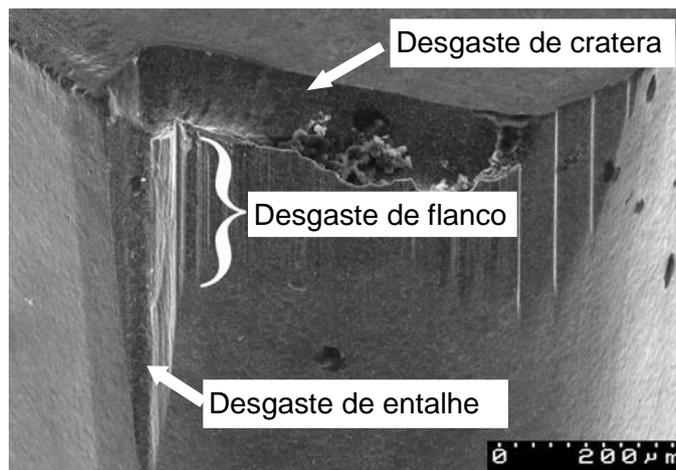
flanco, a parte que está em atrito constante com o material (KÖNIG, 1997 apud KRATOCHVIL, 2004).

Este efeito tem como característica a geração do desgaste de cratera, que consiste em uma seção 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 (CABRAL et al., 2006).

Este desgaste conduz também a geração de entalhes, que funcionam como vias alternativas para o fluxo de pó de grafite a partir dos gumes de corte (CABRAL et al., 2008; ALMEIDA et al., 2008; CABRAL et al., 2006).

A Figura 8 traz uma representação dos desgastes na usinagem de grafite com uma ferramenta com revestimento PCD.

Figura 8 – Desgaste em forma de pente em uma ferramenta com revestimento PCD



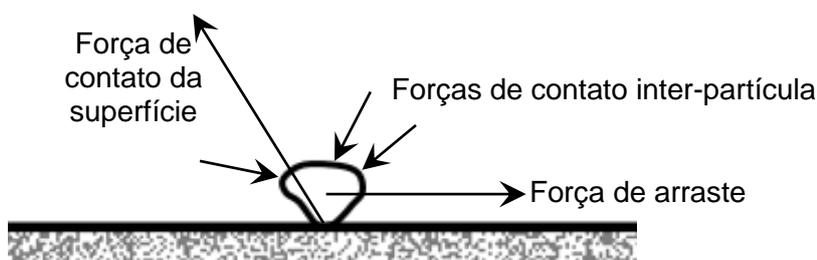
Fonte: Cabral et al. (2006)

O segundo efeito é denominado efeito de jato livre de partículas, que está presente também na face ou no flanco da ferramenta. As partículas de pó de grafite formam um fluxo de material removido que incide sobre um ângulo plano da superfície, que não está em contato com o material (KÖNIG, 1997 apud KRATOCHVIL, 2004).

Estas incidências e fluxos de partículas promovem um desgaste por abrasão característico, conhecido como desgaste em forma de pente (KÖNIG, 1997 apud KRATOCHVIL, 2004).

Este desgaste causado pelo impacto das partículas do grafite, conforme Figura 9, possui relação com a força de contato das partículas, com a distância deslocada e com a velocidade de impacto (HUTCHINGS, 1992).

Figura 9 – Diagrama das forças que atuam em uma partícula em contato com uma superfície sólida



Fonte: Adaptado de HUTCHINGS (1992)

2.2.3.2 Ferramentas para usinagem de grafite

Conforme Klocke e König (2008), as ferramentas de metal duro com revestimento de PCD e TiAlN (Nitreto de Alumínio Titânio), são as mais indicadas para a usinagem de grafite devido às suas altas resistências à abrasão.

As principais aplicações do revestimento TiAlN são na usinagem a seco e HSM (*High Speed Machining*). Neste revestimento uma fina camada de óxido de alumínio é formada sobre a superfície do mesmo, sendo constantemente renovada durante o processo de corte, retardando assim o progresso do desgaste (KLOCKE e KÖNIG, 2008).

O revestimento PCD 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 (KLOCKE e KÖNIG, 2008).

Este revestimento possui como principal vantagem a alta dureza da camada, sendo o revestimento com mais efetiva resistência ao efeito abrasivo na usinagem de grafite (MATOS et al. 2009; KLOCKE e KÖNIG, 2008).

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

Tabela 1 – Propriedades dos revestimentos 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

Fonte: Adaptado de Klocke e König (2008)

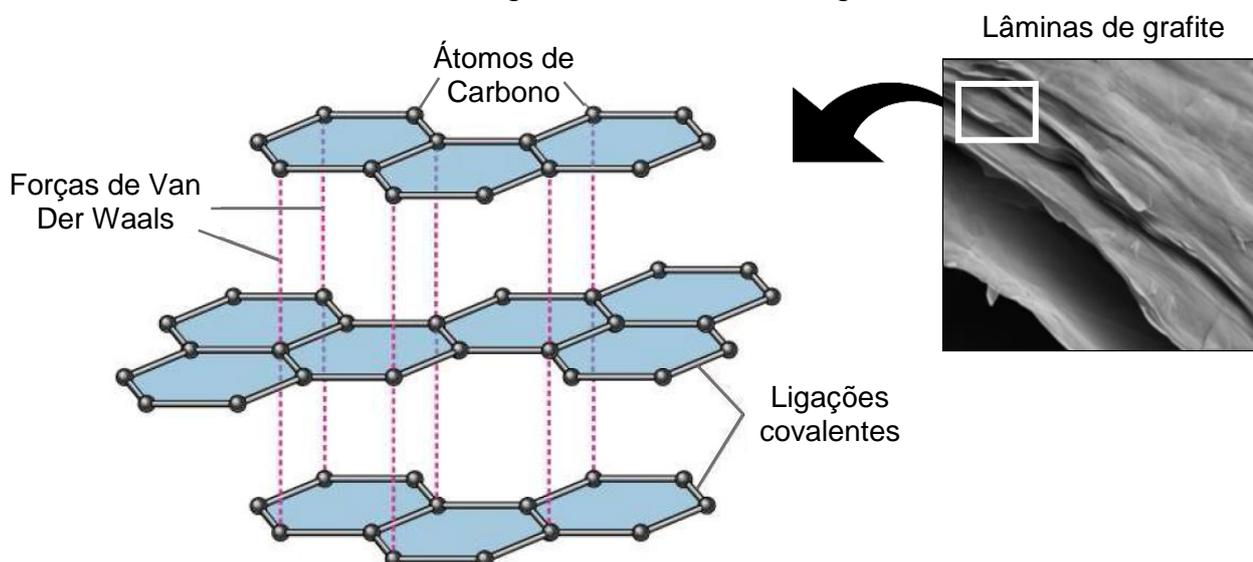
2.3 GRAFITE COMO MATERIAL DE ENGENHARIA

O grafite industrial é caracterizado pela baixa resistividade elétrica e resistência 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 e KÖNIG, 2008; ALMEIDA et al., 2008).

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 paralelas ao plano basal dos átomos de carbono, conforme Figura 10 (ALMEIDA et al., 2008; KRATOCHVIL, 2004).

Dentro de cada plano, o átomo de carbono está ligado a outros três, formando uma série de hexágonos contínuos no que pode ser considerado como uma molécula bidimensional essencialmente infinita. A ligação é covalente, possui um comprimento de 0,141 nm, e resistência de 524 kJ/mol (PIERSON, 1993).

Figura 10 – Estrutura do grafite



Fonte: Hutchings (1992) e Paulchamy et al. (2015)

O 4º elétron de valência é emparelhado com outro elétron deslocado do plano adjacente por fracas forças de Van Der Waals (uma ligação secundária resultante de polarização estrutural), de apenas 7 kJ/mol (PIERSON, 1993).

O processo de fabricação do grafite 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 que começam por serem moídos, peneirados e adicionados a um ligante (KRATOCHVIL, 2004).

A pasta obtida desta mistura é homogeneizada e disposta em moldes ou introduzida em feiras, através de alta compactação (KRATOCHVIL, 2004).

De acordo com a *American Carbon Society* e a *European Carbon Association*, a utilização do grafite vem crescendo de forma expressiva no mundo todo, sendo estimado a utilização de aproximadamente 700.000 toneladas de grafite por ano (MEDINA, et al., 2016).

Atualmente, aproximadamente 70% do mercado mundial utiliza o grafite como material para confecção de eletrodos. (POCO, 2017).

Entanto, no Brasil tradicionalmente são fabricados mais eletrodos em cobre eletrolítico, contudo há uma tendência para que nos próximos anos a utilização do grafite aumente, já que este material apresenta algumas vantagens em relação ao cobre (POCO, 2017).

Para realizar uma comparação entre estes dois materiais, algumas observações podem ser feitas:

- a) o grafite possui menor dilatação térmica que o cobre, 3×10^{-6} para o grafite enquanto 16×10^{-6} para o cobre. Isto representa menores deformações durante o processo de eletroerosão, principalmente na usinagem de cavidades profundas (HELLENO, 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 (com medidas maiores que $150 \times 150 \times 60 \text{ mm}$, por exemplo), mais leves do que aqueles em cobre (densidade média de $8,93 \text{ g/cm}^3$), 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; WILLIAMS, MORRIST e BALL, 1997; METALS HANDBOOK, 1990);

- c) outra vantagem é em relação ao custo, uma vez que, enquanto um bloco de grafite com as mesmas medidas descritas acima custa em torno de R\$ 225,00, o mesmo bloco em cobre custa R\$ 435,00, o que representa quase o dobro do valor;
- d) o grafite possui uma resistividade elétrica menor que o cobre, $12,7 \mu\Omega.m$ para o grafite enquanto $17,1 \mu\Omega.m$ para o cobre (TOKAY, 2017; METALS HANDBOOK, 1990); e
- e) 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 (HELLENO, 2004).

Segundo Xu et al. (2016), Almeida et al. (2008) e Klocke e König (2008), o grafite é um dos materiais mais amplamente utilizados na confecção de eletrodos para EDM.

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

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

2.4 TRATAMENTO DE GUME

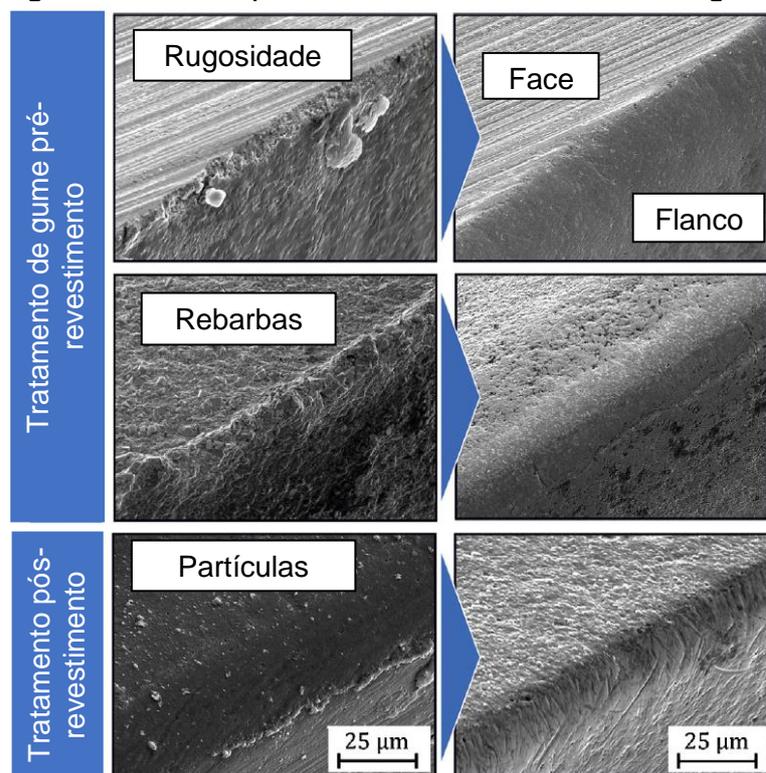
O tratamento de gume tem como objetivo gerar uma geometria no gume, modificar a micro topografia e alterar a rugosidade e textura das superfícies da ferramenta, a fim de aprimorar o desempenho da mesma (RODRIGUEZ, 2009).

Na Figura 11, os principais efeitos dos tratamentos de gume são sumarizados, onde, além da redução da rugosidade após a retífica e das saliências após a sinterização, este pode ser usado como um tratamento pós revestimento (DENKENA e BIERMANN, 2014).

Os tratamentos de gume influenciam a topografia da superfície e as tensões residuais no substrato.

Algumas pesquisas como Bouzakis et al. (2012) e Denkena e Breidenstein (2011), mostram que estes tratamentos levam a um desempenho de corte mais satisfatório devido a uma estabilidade de corte melhorada e a redução de fissuras ao longo da borda da ferramenta.

Figura 11 – Principais efeitos dos tratamentos de gumes

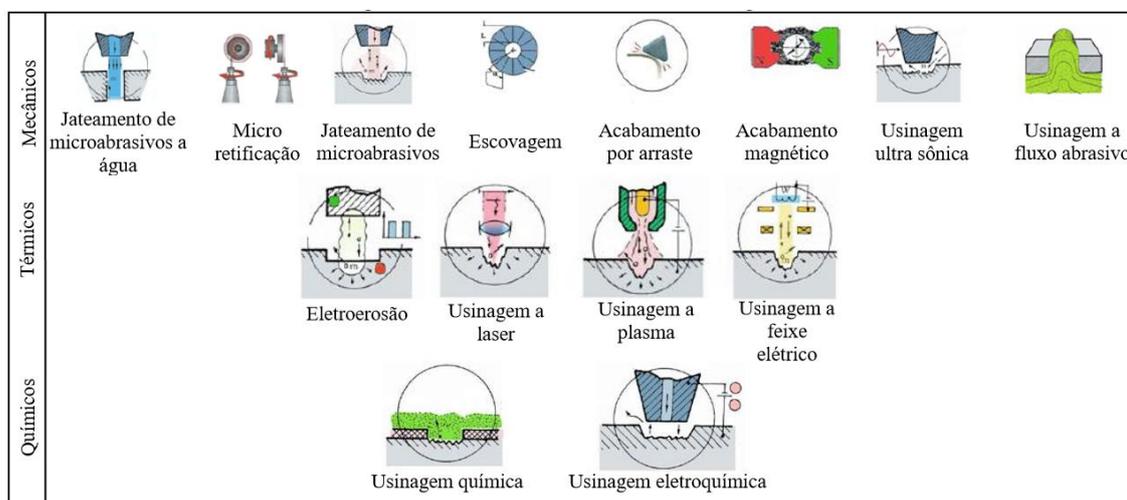


Fonte: Bassett, Köhler, Denkena (2012).

Atualmente, existem diferentes processos utilizados para os tratamentos de gume em ferramentas, sendo estes classificados conforme a fonte de energia utilizada para a remoção de material, podendo ser mecânica, térmica ou química. A

Figura 12 ilustra alguns processos dentre cada tipo de energia utilizada na remoção (BORDIN, 2013).

Figura 12 – Processos de tratamentos de gume



Fonte: Bordin (2013)

A utilização dos tratamentos de gume demonstra resultados em relação à vida das ferramentas, tanto em ferramentas sem revestimento, quanto com ferramentas com revestimentos diversos e ferramentas com revestimento PCD, como pode ser verificado na Tabela 2. Contudo não foram encontradas pesquisas relacionadas a estes tratamentos em fresas com revestimento PCD para usinagem de grafite.

Tabela 2 – Relação de trabalhos com tratamentos de gumes (continua)

Aplicação	Tipo de energia utilizada na remoção	Método utilizado	Material usinado	Resultados (comparados às ferramentas sem tratamento)	Autores
Ferramentas sem revestimento	Mecânica	Acabamento por arraste	Aço P20	Aumento da vida útil da ferramenta em até 5%	Ost (2016)
	Mecânica	Polimento com cerdas abrasivas	Aço P20	Aumento da vida útil da ferramenta entre 13 e 20%	Ost (2016)
	Mecânica	Acabamento por arraste	AISI P20	Redução no $V_{Bmáx}$ de 50%	Zeilmann et al. (2013)

	Mecânica	Acabamento por arraste	Aço P20	Redução no $V_{B\text{máx}}$ de 14%	Uhlmann (2014)
	Mecânica	Jateamento de microabrasivos	CK45 (1.1191)	Redução no V_B entre 20% e 27%	Rodrigues (2009)
	Mecânica	Polimento com cerdas abrasivas	CK45 (1.1191)	Redução no V_B entre 50% e 54%	Rodrigues (2009)
	Mecânica	Jateamento de microabrasivos a água	AISI 1045	Redução no $V_{B\text{máx}}$ de até 322%	Biermann e Terwey (2008)
	Mecânica	Polimento com cerdas abrasivas	Inconel 718	Aumento da vida útil da ferramenta de 30%	Bouzakis et al (2014)
Ferramentas com revestimentos diversos	Mecânica	Acabamento por arraste	Liga Ti6A14V	Aumento da vida útil da ferramenta de 41%	Bouzakis et al (2014)
	Mecânica	Acabamento por arraste	AISI P20	Redução de micro-defeitos no gume	Bordin (2013)
	Mecânica	Polimento com cerdas abrasivas	AISI P20	Acabamento da peça usinada mais homogênea	Bordin (2013)
	Mecânica	Polimento ultrassônico	-	Redução da rugosidade do revestimento de 5 μm para 0,5 μm Ra	Ralchenko et al. (2016)
Ferramentas com revestimento PCD	Mecânica e química	Polimento por atrito dinâmico	-	Redução da rugosidade do revestimento de 4 μm para 0,3 μm Ra	Chen, Zhang e Tang (2012)
	Mecânica	Micro retificação	-	Redução da rugosidade do revestimento de 1,2 μm para 0,9 μm Ra	Tsai et al. (2006)
	Mecânica	Micro retificação	Liga de alumínio JIS A2017	Redução da rugosidade do revestimento de 0,16 μm para 0,09 μm Ra	Murakawa et al. (1996)

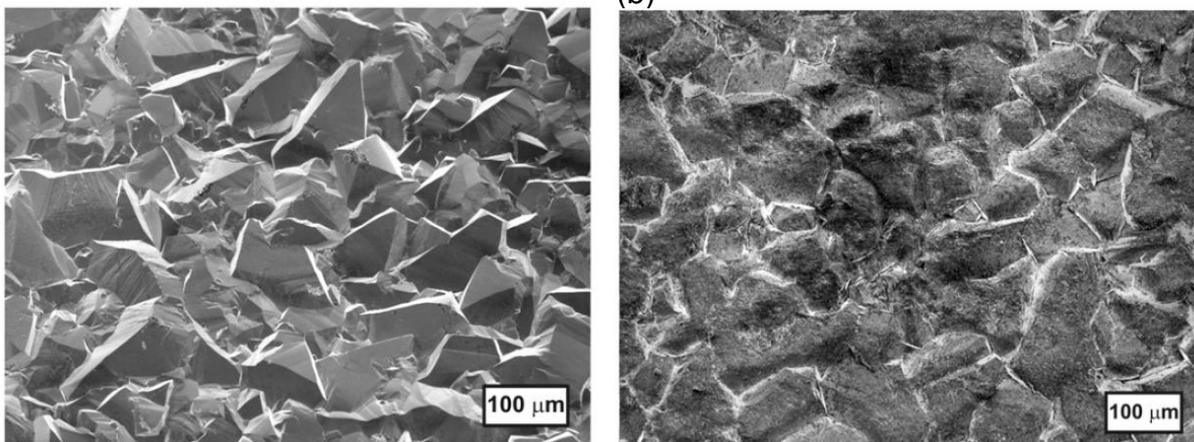
Fonte: o autor.

Embora o revestimento PCD possua propriedades proeminentes, ele apresenta espessuras e tamanhos de grãos não-uniformes, orientação randômica de

cristais e alta rugosidade superficial o que pode ser melhorado através dos processos de tratamentos de gume (RALCHENKO et al., 2016; TSAI, et al., 2006; MURAKAWA et al. 1996).

A Figura 13 traz uma imagem da superfície de uma ferramenta com revestimento de PCD sem polimento (a), e a mesma superfície após o polimento (b).

Figura 13 – (a) Superfície sem polimento; (b) Superfície após polimento



Fonte: Ralchenko et al. (2016)

Os processos de tratamentos de gume mais utilizados em ferramentas já finalizadas com revestimento são os processos mecânicos de polimento com cerdas abrasivas, e de acabamento por arraste, pois estes são tratamentos que obtêm um aperfeiçoamento no acabamento do revestimento e possuem uma aplicação mais simples (OST, 2016; RODRIGUEZ, 2009).

2.4.1 Polimento com cerdas abrasivas

Este método é utilizado em aplicações que necessitem de requisitos específicos de raios de gumes e aprimoramento do acabamento superficial.

Durante o polimento, novos grãos abrasivos dos filamentos de nylon são constantemente expostos com o avanço do desgaste. Isso proporciona uma ação de polimento consistente ao longo da vida útil das cerdas (RODRIGUEZ, 2009; OVERHOLSER et al. 2003).

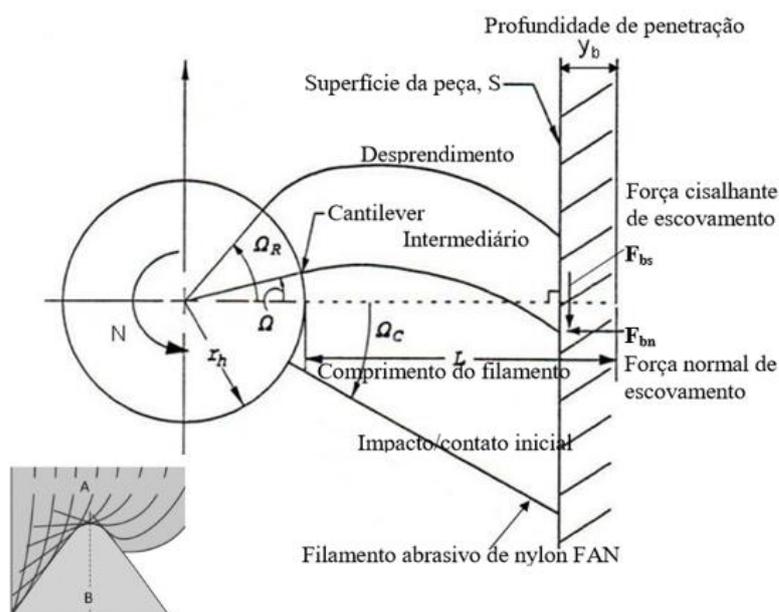
O contato entre o filamento e a superfície, conforme representado na Figura 14, é realizado de forma ortogonal em três diferentes posições: local inicial, intermediário e de desprendimento (OVERHOLSER et al., 2003).

O contato dos filamentos com a forma do gume também é exemplificado à esquerda, onde A representa as cerdas e B o gume da ferramenta, mostrando como se dá a deformação das cerdas (OST, 2016).

Contudo, pouco se sabe sobre os mecanismos envolvidos durante a remoção de material por esse processo, devido à grande dificuldade de modelagem da complexa interação que ocorre na interface do filamento/peça (BASSET et al., 2012; RODRIGUEZ, 2009).

Em conjunto com a utilização de filamentos de nylon, grãos abrasivos comumente utilizados são o carбето de silício (SiC), o óxido de alumínio (Al_2O_3), o nitreto cúbico de boro (CBN) e o PCD (diamante policristalino).

Figura 14 – Cinemática do polimento por cerdas abrasivas



Fonte: Adaptado de Overholser et al. (2003)

2.4.2 Acabamento por arraste

Este processo tem como característica a imersão da ferramenta em meio abrasivo. Este meio contém elementos cerâmicos com granulometrias conhecidas, utilizadas de acordo com o polimento requerido (OTEC, 2008).

A remoção do material é o resultado do movimento relativo entre a peça de trabalho e o meio abrasivo, que ocorre devido ao impacto e contato dos grãos abrasivos na superfície da ferramenta (UHLMANN, 2014).

A maioria das máquinas utilizadas para este processo utilizam um sistema planetário, em que a ferramenta fixada para realizar o tratamento, gira em torno do seu eixo enquanto a máquina faz com que a ferramenta realize o movimento de translação (RISSE, 2006; OTEC, 2008).

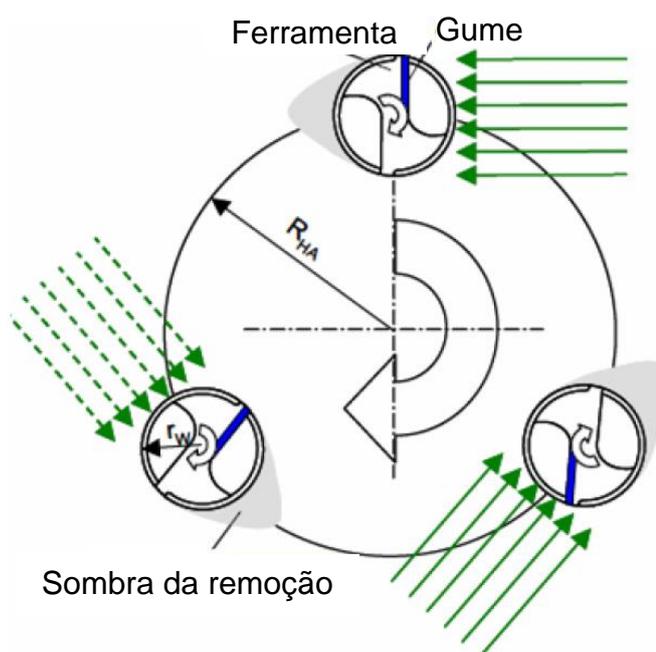
Através desta combinação de movimentos, o processo resulta em um tratamento uniforme de todas as áreas da ferramenta (RISSE, 2006; OTEC, 2008). A Figura 15 traz a cinemática do processo.

O gume considerado para a análise (identificado em azul) e os vetores (destacados em verde) indicam a direção eficaz de remoção promovido pelo meio no gume principal (RISSE, 2006).

A ferramenta rotaciona e translada no sentido escolhido deslocando-se através do meio abrasivo e sofrendo ação dos grãos (RISSE, 2006).

Devido à cinemática do processo, a ferramenta passa por uma fase que não existe remoção de material do gume principal da ferramenta, localizado na região de sombra de remoção. Durante esta fase, não existe a ação dos grãos. No caso do gume considerado, os vetores pontilhados indicam esta condição de não remoção (RISSE, 2006).

Figura 15 – Cinemática do processo de acabamento por arraste



Fonte: Adaptado de Risse (2006)

Devido o acabamento por arraste ser um processo confiável e reprodutível, ele é utilizado quando se precisa melhor distribuição de cargas, alta qualidade superficial ou um arredondamento bem definido (TIKAL, 2009).

3. METODOLOGIA EXPERIMENTAL

3.1 PLANEJAMENTO EXPERIMENTAL

O planejamento realizado para o experimento consiste na realização de testes durante a produção de eletrodos em grafite com ferramentas que possuem três microgeometrias diferentes.

A necessidade de realização dos testes durante a produção se deve ao fato da média de vida útil de cada ferramenta ser elevada, aproximadamente 5 horas, o que consumiria uma quantidade elevada de grafite.

Os testes ocorreram apenas nas etapas de desbaste dos eletrodos, devido a maior facilidade de padronizar os parâmetros de corte e a possibilidade de remover mais material.

3.1.1 Variáveis de entrada

Com o objetivo de compreender o desgaste apresentado nas ferramentas em função da microgeometria destas e reduzir o número de variáveis influentes no processo de usinagem, alguns parâmetros foram mantidos constantes.

A estratégia de usinagem utilizada nos testes é a concordante, com velocidade de corte (v_c) de 700 m/min, avanço (f_z) de 0,2 mm, profundidade axial (a_p) de 0,7 mm e profundidade lateral (a_e) de 4 mm.

Para a execução deste trabalho, foram utilizados dois processos de tratamentos de gume: o polimento com cerdas abrasivas (PCA) e o acabamento por arraste (AA).

A escolha destes métodos ocorreu devido a disponibilidade dos equipamentos específicos para estes processos e a simples aplicação, além da recomendação para o tratamento de ferramentas com revestimentos, conforme indicado na revisão bibliográfica por Rodrigues (2009).

Para os testes, também foi utilizada a ferramenta em seu estado original de fábrica (FO), com o objetivo de verificar a influência dos tratamentos de gumes sobre a vida útil das mesmas.

A fim de aumentar a confiabilidade dos resultados, para cada teste realizou-se duas réplicas, totalizando 09 testes. A Tabela 3 mostra a sequência e ordem dos testes.

Tabela 3 – Sequência para realização dos testes

Sequência	Tipo de tratamento	Ordem do teste
1	PCA	4
2	PCA	2
3	PCA	9
4	AA	8
5	AA	3
6	AA	6
7	FO	1
8	FO	5
9	FO	7

Fonte: O autor

3.1.2 Variáveis de saída

Como variável de saída dos testes foi verificado o desgaste das ferramentas através de medição do desgaste de flanco máximo (V_{Bmax}), a cada 200 metros de usinagem.

Esta medição do comprimento usinado ocorreu através do software do centro de usinagem que informa o comprimento usinado por ferramenta.

Os ensaios foram conduzidos até que uma das condições de fim de vida estivesse sido alcançadas, sendo estas o desgaste de flanco máximo de 0,2 mm ou o lascamento da ferramenta.

3.1.2.1 Análise estatística dos dados

Com o objetivo de quantificar estatisticamente os resultados obtidos, a Análise de Variância (ANOVA), foi empregada, com um nível de confiança de 99%, ou seja, nível de significância “ α ” de 1%, a fim de obter um suporte estatístico na análise dos resultados. A avaliação e a plotagem dos dados foram realizados com o auxílio do software MINITAB V.17.

O Teste de Fischer também foi aplicado com o objetivo de comparar os pares de médias e verificar se houve ou não diferença nos valores obtidos. Foi utilizando um nível de significância “ α ” de 1%.

Os gráficos foram apresentados na forma de *boxplot*, de barras e dispersão.

3.2 MÁQUINAS E EQUIPAMENTOS

Os testes ocorreram durante a produção de eletrodos em grafite fixados no sistema de centragem e fixação Erowa ITS® em um centro de usinagem CNC da marca Röders, 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 pertence à empresa Sulbras Moldes e Plásticos.

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 μ m e zoom máximo de 100 vezes.

Devido a melhor qualidade de imagem, as imagens em cada etapa de medição foram geradas utilizando o Microscópio Digital de mão Micro Zoom, da marca Star Open com resolução de 1280x960 pixels e ampliação máxima de 200 vezes.

A caracterização das ferramentas, mídia, esponja e grafite foram realizadas com o auxílio do microscópio eletrônico de varredura por emissão de campo, marca Tescan, modelo Mira 3, situado no laboratório central de microscopia, dentro da Universidade de Caxias do Sul.

Para as análises do MEV foram utilizados o princípio de funcionamento de detectores de elétrons secundários (SE), e um modo de alto vácuo (HV) de 15 kV.

As análises da composição química da mídia e da esponja de polimento foram realizadas através de espectrometria de energia dispersiva de raios-x (EDS), com o mesmo equipamento utilizado no MEV. Estas análises foram conduzidas com uma tensão de aceleração de 20 kV.

Para a análise da rugosidade das ferramentas foi utilizado o rugosímetro Perthometer S2 da Marca Mahr, com capacidade de obter medições a uma resolução de 0,01 μ m com uma força de medição de 0,7 mN.

O processo de polimento com cerdas abrasivas foi realizado no centro de usinagem Dyna DM 4500, com rotação máxima de 6.000 rpm e potência de 7,5 KW, situado no bloco D, no laboratório de novas tecnologias de produção, nas dependências da Universidade de Caxias do Sul.

O processo de acabamento por arraste foi realizado em uma máquina OTEC, modelo DF-3 Tool, em parceria com a empresa Lesi. Esta máquina possui duas unidades independentes.

A unidade principal move o rotor com uma velocidade de rotação de até 50 RPM. A segunda unidade gira o suporte das ferramentas, bem como as ferramentas, usando uma engrenagem planetária. A velocidade do suporte das ferramentas pode ser de até 200 RPM.

As imagens de todos os equipamentos utilizados neste trabalho podem ser visualizadas no ANEXO A.

3.3 MATERIAL DOS ELETRODOS

Os eletrodos em grafite foram usinados a partir de blocos de grafite com as medições de acordo com os eletrodos da produção, da marca Tokay Carbon e classificados através do tamanho de grão como superfinos. As principais características deste grafite estão expostas na Tabela 4.

Tabela 4 – Propriedades do grafite utilizado

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 TOKAY (2017)

3.4 FERRAMENTAS

As fresas utilizadas são em metal duro inteiriço com diâmetro de 8 mm, comprimento total de 100 mm, com 4 gumes (z_n), e revestimentos de PCD. As características da ferramenta estão apresentadas na Tabela 5.

Tabela 5 – Características da ferramenta

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

Fonte: Adaptado de Walter (2017)

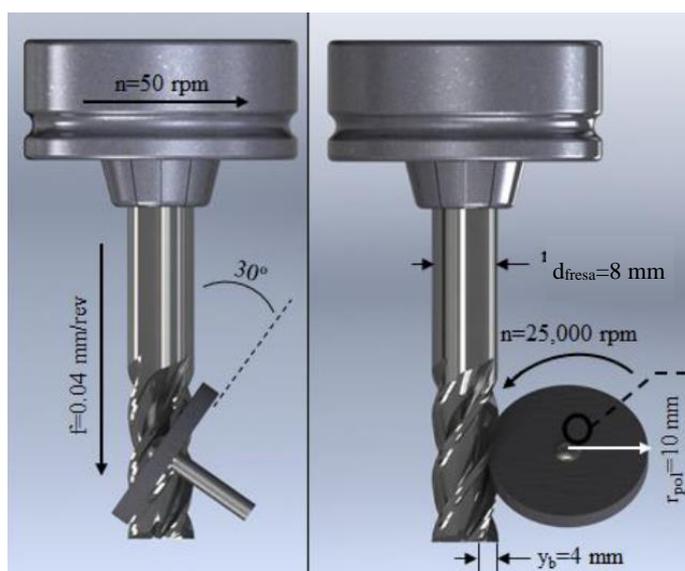
A fixação das mesmas ocorreu através de um mandril térmico (*Shrink fit Chuck*), da marca Haimer, modelo de fixação HSK-E40, com um balanceamento fino G2.5, o que garante um batimento máximo de 3 μ m.

3.4.1 Processo de polimento com cerdas abrasivas

O processo de polimento com cerdas abrasivas foi realizado com uma esponja nas dependências da UCS, no mesmo formato do polimento realizado por OST (2016).

A esponja foi fixada em uma mini retífica manual pneumática com uma velocidade de 25.000 rpm. Esta mini retífica foi presa na mesa de um centro de usinagem. A Figura 16 ilustra como ocorreu o procedimento de polimento.

Figura 16 – Processo de polimento



Fonte: Adaptado de Ost (2016)

A ferramenta foi fixada em uma pinça no centro de usinagem, com velocidade de 50 rpm, no sentido contrário ao corte da ferramenta, e avanço (f) de 0,04 mm.

A esponja ficou em um ângulo de 30°, devido este ser o ângulo da hélice da ferramenta. O tempo do processo foi de 5 min.

A esponja abrasiva foi caracterizada através de imagens de MEV.

3.4.2 Processo de acabamento por arraste

O acabamento por arraste foi realizado na empresa Lesi com uma mídia abrasiva HSC 1/300, indicada para obtenção de alta qualidade superficial, aproximadamente 0,5 Rz, e para processo de polimento em ferramentas com revestimento (OTEC, 2017).

A mídia utilizada é constituída por uma mistura de 30% de Carbetto de Silício (SiC), com um diâmetro de grão de 200 µm, e 70% de grãos de casca de noz com diâmetros entre 0,8 mm e 1,3 mm (OTEC, 2017).

Ambas as rotações da ferramenta e da árvore foram de 40 rpm. As ferramentas permaneceram rotacionando na mídia abrasiva, no sentido de corte, por 10 minutos.

3.4.3 Caracterização da mídia e das cerdas abrasivas

A caracterização da mídia ocorreu no microscópio eletrônico de varredura, onde os grãos do material abrasivo foram fixados em uma base e cobertos com um filme de ouro, devido a aspectos técnicos da análise. As ampliações utilizadas foram de 200 e 10.000 vezes.

Uma análise por espectrometria de energia dispersiva de raios-x, o EDS (energy dispersive x-ray detector), foi realizada também com o objetivo de identificar as substâncias que constituem o material.

A caracterização das cerdas abrasivas foi realizada no MEV com ampliação de 150 e 5.000 vezes, com o intuito de verificar a superfície e a disposição das cerdas e do material abrasivo. A análise por EDS também foi realizada.

Tanto para a análise da mídia quanto para as cerdas abrasivas, foram utilizadas amostras novas, sem terem sido utilizadas para outro fim, com o propósito de não ter havido modificação nas estruturas e nem a contaminação com outros materiais.

3.4.4 Caracterização das ferramentas

A caracterização das ferramentas foi realizada através do Microscópio digital de mão, com ampliação de 150 vezes, e por microscopia eletrônica de varredura, com ampliações de 250 e 2500 vezes.

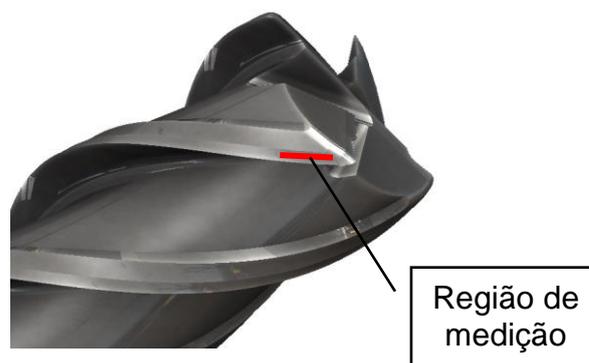
As ferramentas foram posicionadas no MEV através de um dispositivo fixador com ajuste de posicionamento para a vista do gume, face e flanco das mesmas.

A superfície de cada ferramenta foi limpa através da utilização de imersão das mesmas em acetona e utilização de um aparelho de ultrassom por um tempo de 10 minutos.

Com o objetivo de avaliar os efeitos dos tratamentos sobre a superfície das ferramentas, foram realizadas medidas de rugosidade na região do flanco, próximo ao gume principal, conforme a Figura 17.

O *cut-off* (λ_c), escolhido para as medições foi de 0,25 mm, pois, apesar dos valores de rugosidade R_a serem superiores à faixa normal de trabalho, o comprimento total de medição inviabiliza a medição com um *cut-off* superior, tendo em vista que o perfil da hélice da ferramenta é curvilíneo e superior à máxima curvatura permitida pelo rugosímetro.

Figura 17 – Região de medição da rugosidade



Fonte: O autor

Para as medições, foram utilizadas três repetições para cada região analisada, sendo duas regiões por ferramenta, o que representa seis valores de rugosidade, totalizando 18 medições para cada tratamento de ferramenta.

3.4.5 Caracterização do grafite

A fim de caracterizar o grafite e analisar de forma qualitativa a superfície do mesmo antes e após a usinagem com o objetivo de verificar as alterações nos planos basais, foi realizado imagens através da microscopia eletrônica de varredura em duas superfícies de um bloco de grafite, sendo uma superfície usinada e uma fraturada.

Esta caracterização tem por objetivo auxiliar na compreensão do alto poder abrasivo do material, devido às diferenças de resistências nas ligações estruturais do grafite. Devido este objetivo, a análise da superfície usinada foi realizada apenas com a fresa original de fábrica.

3.5 PRÉ-TESTE

Com o propósito de definir a ferramenta e os parâmetros de corte utilizados para os testes definitivos, foram realizados pré-testes com a variação do revestimento da ferramenta, a velocidade de corte e o avanço por gume.

Estes pré-testes ocorreram em parte durante a realização do trabalho de conclusão do curso de Engenharia Mecânica desse autor, no que diz respeito aos experimentos e às curvas de vida das ferramentas (ZANELLA, 2015).

As análises no MEV e análises em gráficos boxplot e de Pareto, bem como uma melhor interpretação dos desgastes foram realizadas durante o mestrado.

Os dois revestimentos utilizados foram os mais indicados pela literatura para a usinagem de grafite, TiAlN e PCD.

Já os parâmetros de velocidade de corte e avanço por gume foram definidos como, para o nível baixo, o indicado por catálogo pelo fabricante, e o nível alto como sendo 75% mais alto. A relação destes parâmetros pode ser visualizada na Tabela 6.

Para estes testes foram utilizadas fresas de metal duro de diâmetro de 6 mm com dois gumes durante a usinagem de um bloco de grafite nas medidas de 100x100x60 mm do mesmo modelo utilizado para os testes definitivos.

Cada ferramenta poderia realizar a remoção de um volume máximo de 300 cm³, o que corresponde a um comprimento total de usinagem de 93.840 mm ou 30 planos de material do bloco, sendo o monitoramento do desgaste das mesmas a cada 15.640 mm de comprimento usinado.

Como critérios de fim de vida, foram adotados a falha catastrófica, o desgaste de flanco máximo de 0,3 mm ou o fim do teste após a remoção dos 30 planos de material.

Tabela 6 – Tabela dos fatores e seus níveis

	Nome do fator	Níveis dos fatores		Unidade
		Baixo	Alto	
Fator A	Revestimento	TiAlN	PCD	-
Fator B	Avanço	0,04	0,07	mm/gume
Fator C	Velocidade de corte	400	700	m/min

Fonte: Zanella (2015)

Através da escolha dos fatores mencionados na Tabela 6 e, considerando um planejamento fatorial completo 2^k com uma réplica, tem-se o total de 16 combinações.

Para se definir quais foram as variáveis que mais influenciaram no desgaste, utilizou-se a análise de variância, com um nível de significância $\alpha = 0,01$, o que representa uma confiabilidade de 99%.

4. RESULTADOS

Neste capítulo são apresentados os resultados obtidos em decorrência dos tratamentos realizados nas ferramentas e dos experimentos.

A primeira parte trata dos resultados do pré-teste realizado, a fim de direcionar e justificar as abordagens nos testes definitivos.

Na sequência é abordado a caracterização da mídia e da esponja de polimento a fim de entender melhor a ação do tratamento de gume sobre as ferramentas.

Após é apresentada a caracterização dos acabamentos das ferramentas após os tratamentos de gume bem como a análise macrogeométrica das mesmas.

Por fim, é tratado sobre a análise dos desgastes das ferramentas na usinagem e a análise estatística dos resultados.

4.1 PRÉ-TESTE

A Figura 18 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, sendo a imagem (a) para as revestidas com TiAlN e a imagem (b) para as revestidas com PCD.

Através da análise dos gráficos da Figura 18 é possível identificar que o desgaste gerado nas ferramentas com revestimento PCD foi bem menor se comparadas às ferramentas com revestimento TiAlN.

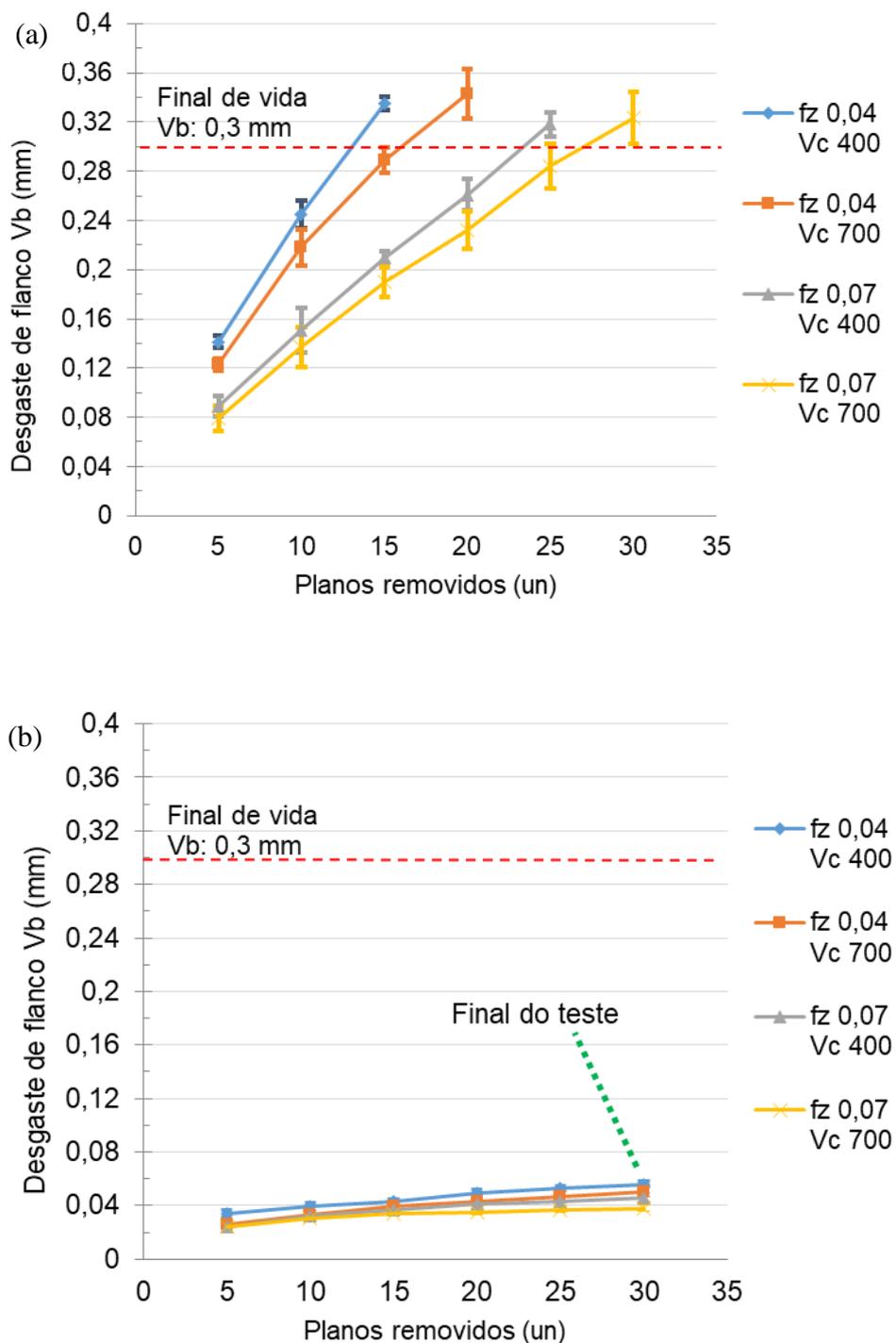
A variação do desgaste, conforme visualizado no gráfico de boxplot da Figura 19, tendo-se como referência os valores para os parâmetros de velocidade de corte 700 m/min, avanço por gume de 0,07 mm/gume e 15 planos de material removido, foi 6x menor para as ferramentas com revestimento PCD.

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.

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,

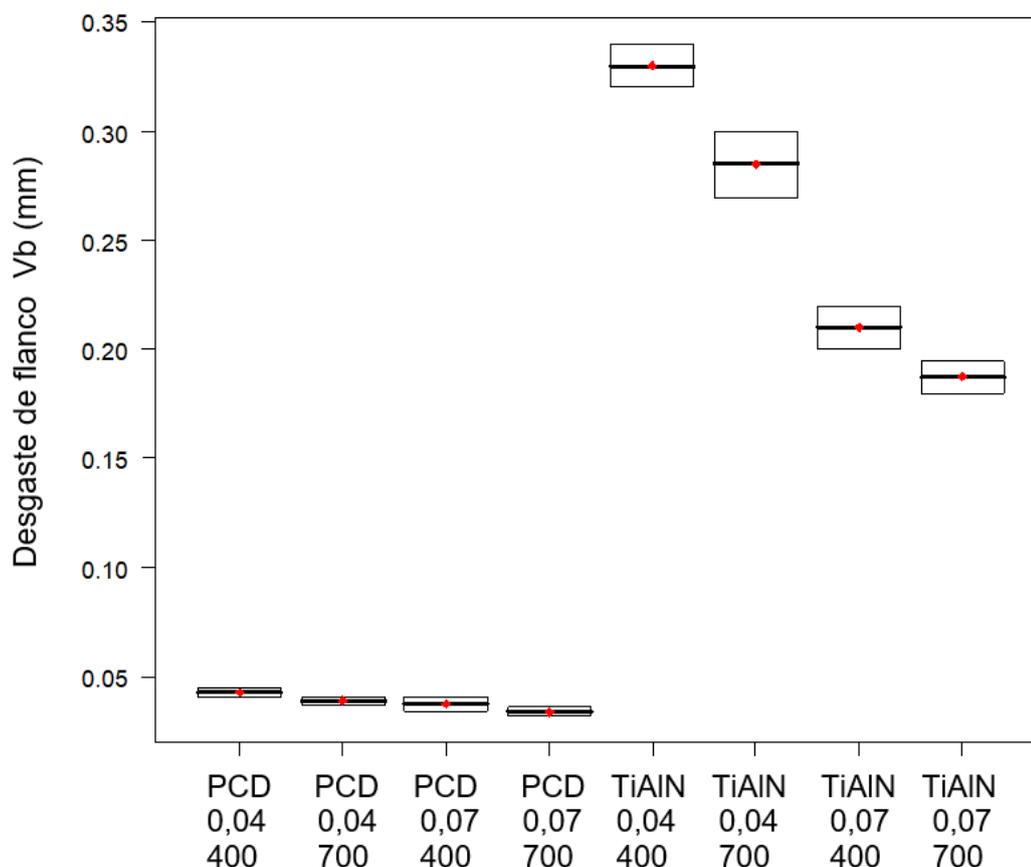
gerou-se o gráfico de Pareto dos efeitos padronizados para o desgaste de flanco, Figura 20.

Figura 18 – (a) Comportamento da curva de vida das ferramentas de metal duro com revestimento TiAlN e (b) comportamento da curva de vida das ferramentas de metal duro com revestimento de PCD.



Fonte: Adaptado de Zanella (2015)

Figura 19 – Boxplot do desgaste de flanco para a remoção de 15 planos de material



Fonte: O autor

O gráfico de Pareto apresenta os valores dos efeitos padronizados, que, conforme Montgomery e Runger (2003), são a magnitude de cada efeito dividida pelo desvio padrão da variável de resultado, e a interação entre duas variáveis (interações bidirecionais).

A linha vertical em vermelho define o limite dos principais fatores e interações bidirecionais que são significativos considerando o nível selecionado Alpha.

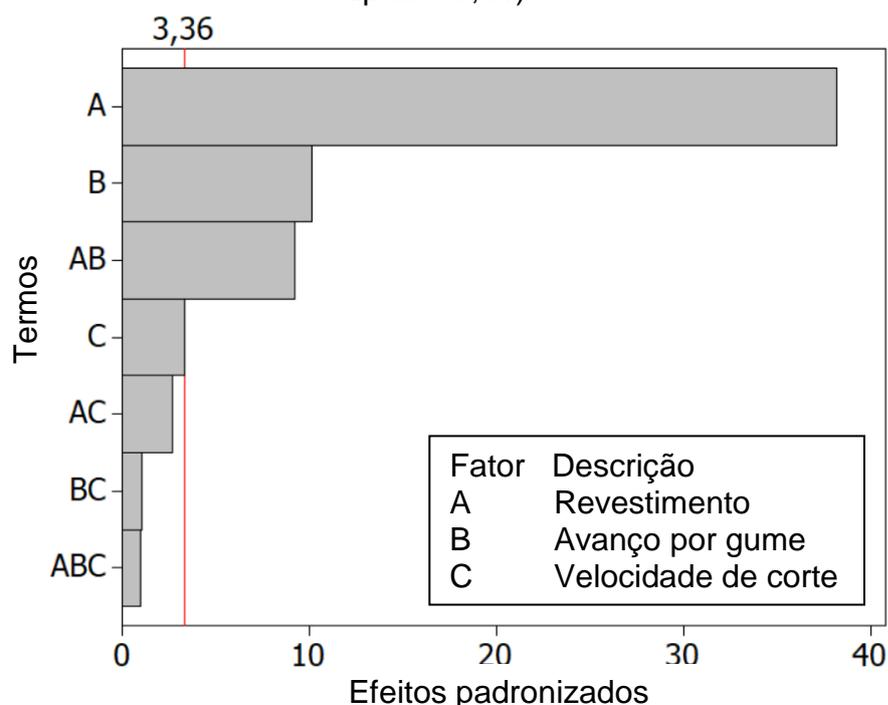
Os fatores que se estendem para o lado direito além do limite são considerados significativos.

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 também é confirmado através da Tabela 7 da Análise de Variância no Apêndice A. Pelo ANOVA é possível identificar que os fatores A, B e a relação AB afetam o desgaste de flanco, uma vez que os valores F0 destes fatores

foram maiores que o valor F da tabela de distribuição F dos autores Montgomery e Runger, 2003.

Figura 20 – Gráfico de Pareto para os Efeitos Padronizados (resposta é Desgaste, Alpha = 0,01)



Fonte: O autor

A Figura 21 traz as imagens de duas ferramentas utilizadas nos pré-testes com a finalidade de demonstrar a diferença no nível do desgaste apresentado. A fresa da esquerda possui revestimento de TiAlN e a da direita revestimento PCD.

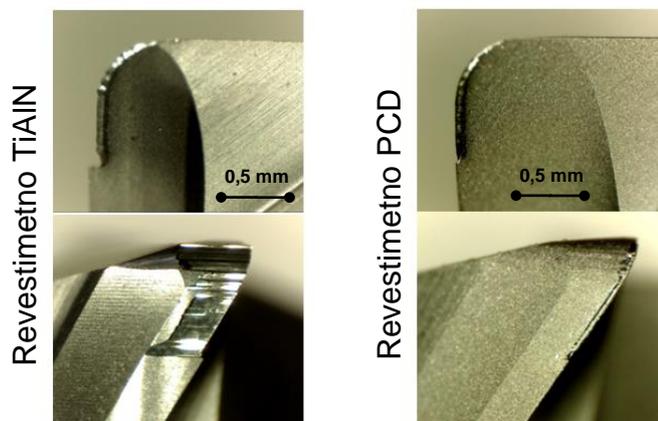
Os parâmetros utilizados com estas ferramentas foram os mesmos, avanço por gume de 0,04 mm/gume e velocidade de corte de 400 m/min.

Esta imagem demonstra a grande diferença no nível de desgaste apresentado nas análises acima entre os dois tipos de revestimento de ferramenta.

Com os resultados do pré-teste foi possível definir que a ferramenta com revestimento de PCD seria a utilizada nos testes definitivos, já que esta é a que apresentou a melhor vida útil.

Do mesmo modo, a velocidade de corte escolhida foi a de 700 m/min também por apresentar o menor desgaste de flanco. Com relação ao avanço por gume, devido este ser o segundo parâmetro mais influente na vida útil da ferramenta e a capacidade do equipamento, foi definido o aumento dele para 0,2 mm/gume.

Figura 21 – Imagens dos desgastes das ferramentas do pré-teste



Fonte: Adaptado de Zanella (2015)

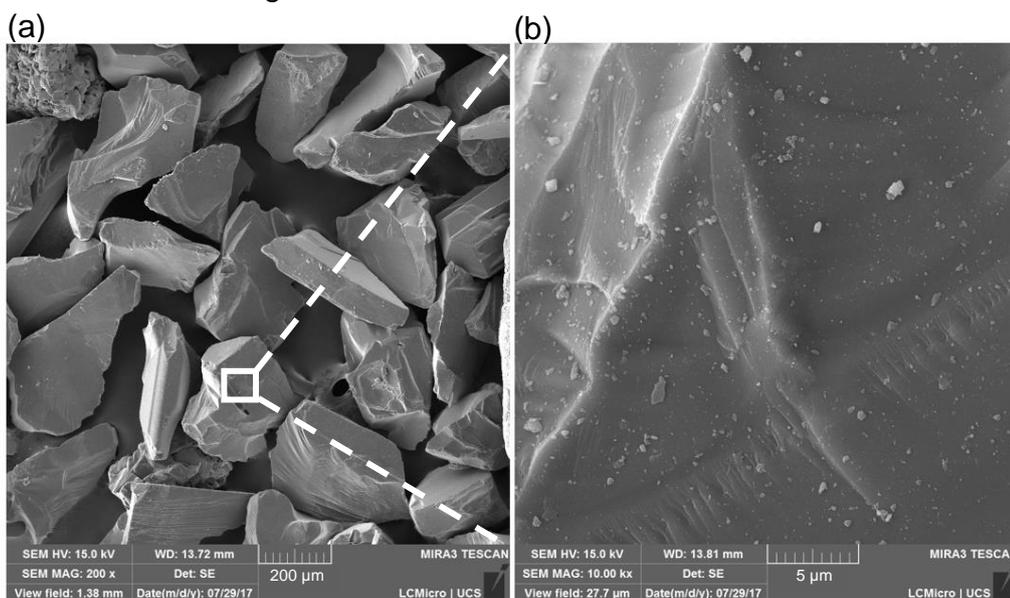
4.2 CARACTERIZAÇÃO DA MÍDIA DO ACABAMENTO POR ARRASTE

A mília analisada, conhecida comercialmente como HSC 1/300, é constituída por grãos de casca de noz gerados com tamanho homogêneo e grãos de carbeto de silício (SiC).

Os grãos de carbeto de silício possuem em sua maioria ângulos agudos com tamanho médio de 300 μm , que, conforme Tikal (2009), são indicados para melhora do acabamento e remoção de droplets.

A Figura 22 traz a imagem dos perfis dos grãos de carbeto de silício (a), e uma vista em detalhe da superfície dos mesmos (b).

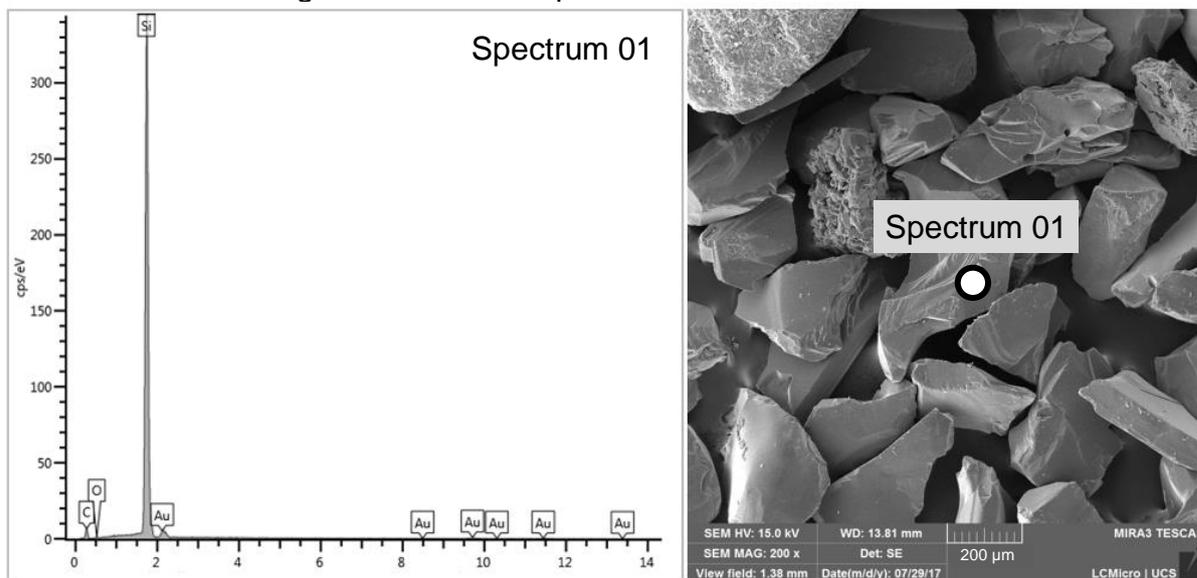
Figura 22 – Grãos de carbeto de silício



Fonte: O autor

Com o objetivo de confirmar o material da mídia abrasiva, foi realizado a análise por espectrometria de energia dispersiva de raios-x, o EDS (*energy dispersive x-ray detector*), Figura 23.

Figura 23 – Análise por EDS da mídia abrasiva



Fonte: O autor

4.3 CARACTERIZAÇÃO DA ESPONJA DE POLIMENTO

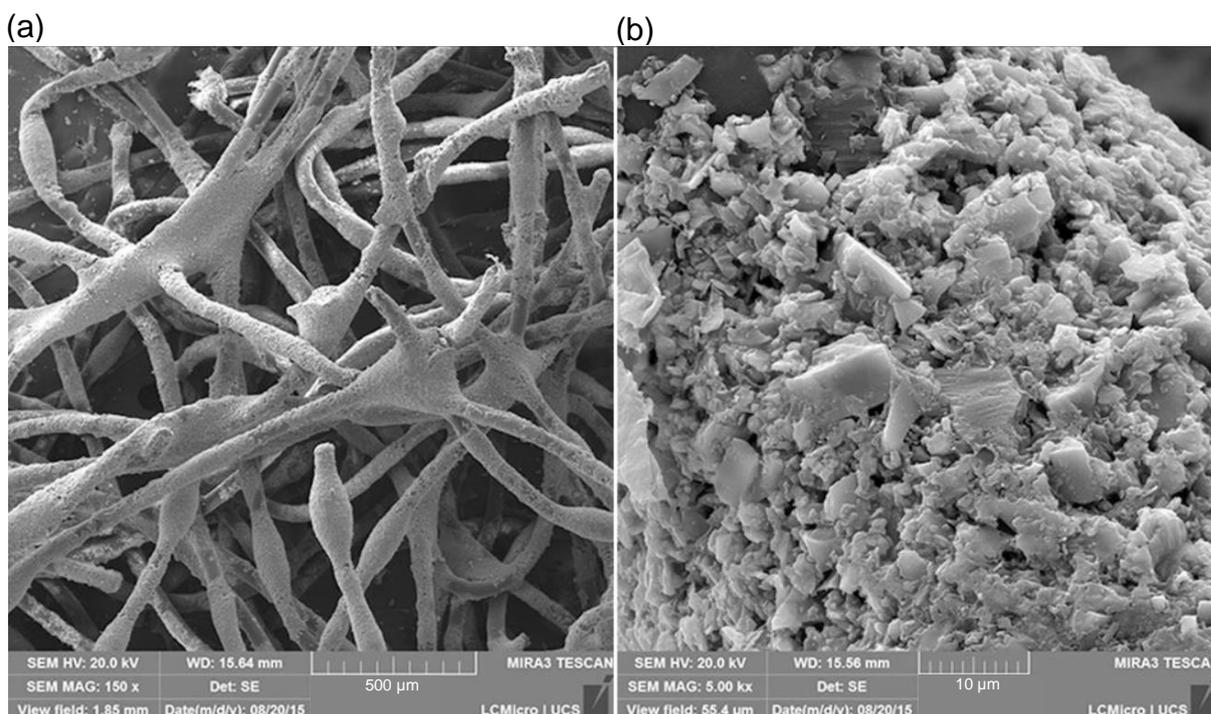
Com a caracterização do material da esponja através do MEV, conforme Figura 24, é possível observar a sua geometria, construção e forma do material abrasivo.

Pela imagem à esquerda da Figura 24 é possível identificar de forma mais macro a estrutura da esponja (a), sendo esta constituída de uma malha de fios de aproximadamente 50 µm de diâmetro com um material abrasivo aderido.

Pela imagem à direita (b), é possível observar de forma mais focada os cristais do material abrasivo, estes que se apresentam com dimensões variadas, indo de aproximadamente 1 a 10 µm, com um aspecto fragmentado.

Uma análise por EDS foi realizada a fim de definir quais são os materiais que compõem a esponja, conforme Figura 25. Por aspectos técnicos da análise, os materiais foram cobertos por ouro.

Figura 24 – Vista detalhada da esponja de polimento

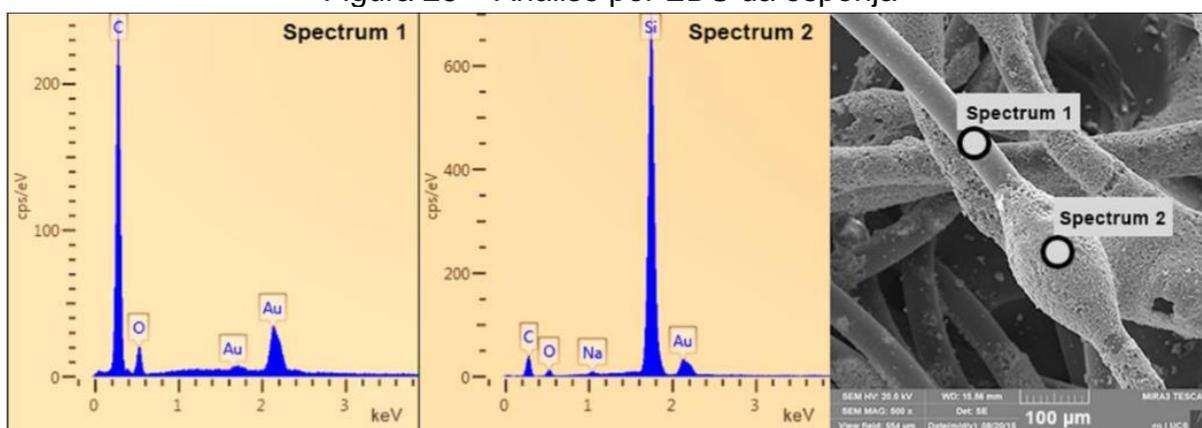


Fonte: Ost (2016)

A primeira análise realizada na região do *Spectrum 1*, foi realizada no local onde a fibra encontra-se exposta. Nesta posição, a análise sustenta que a fibra é constituída basicamente por carbono, o que suporta a afirmação do fabricante da esponja de ser um nylon.

A segunda análise realizada na região do *Spectrum 2*, foi realizada onde o material abrasivo foi depositado. O resultado indica uma concentração alta de silício, o que provavelmente pode caracterizar um material de carbeto de silício.

Figura 25 – Análise por EDS da esponja



Fonte: Ost (2016)

4.4 CARACTERIZAÇÃO DAS FERRAMENTAS

Com o objetivo de mapear e validar as ferramentas para os testes, removendo possíveis ferramentas que estivessem com defeitos, estas foram caracterizadas de duas formas.

A primeira de forma macro geométrica, sendo realizada as dimensões de diâmetro, ângulo de hélice e raio de quina das mesmas, e a segunda de forma superficial, através da rugosidade e das imagens obtidas por MEV.

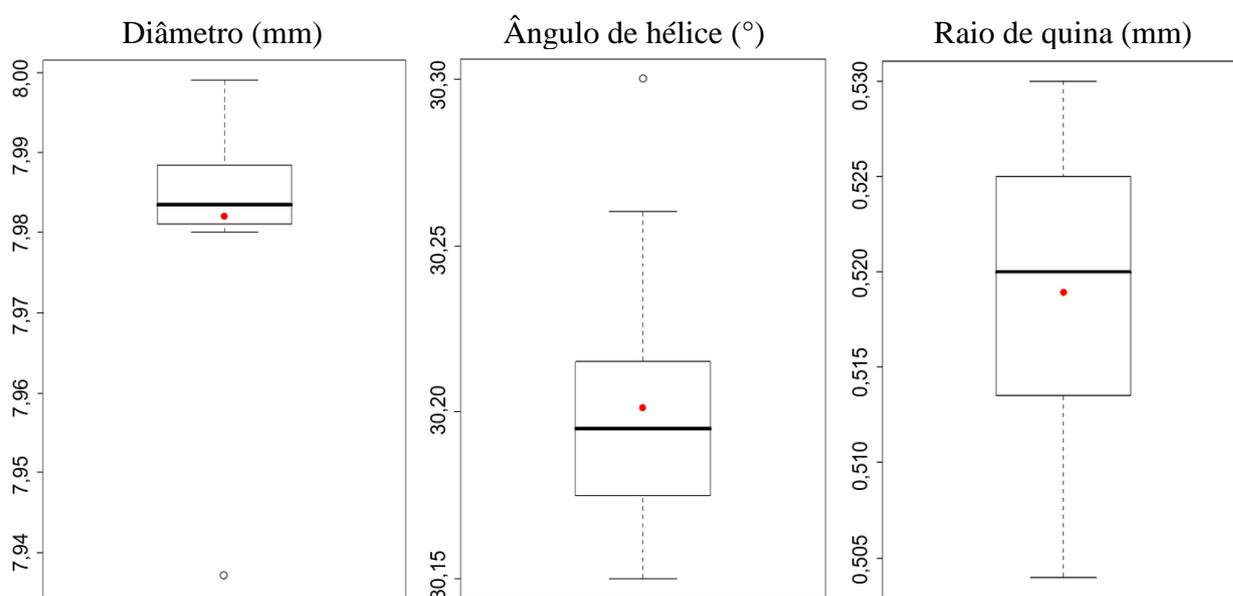
A caracterização macro geométrica, conforme visualizada nos gráficos *boxplot* da Figura 26, traz os dados para uma amostra de 12 ferramentas.

Estes dados informam que as ferramentas possuem as dimensões próximas entre si, sendo o valor médio do diâmetro ficando em torno de 7,98 mm, o ângulo da hélice em torno de 30,20° e o raio de quina em 0,52 mm.

Dois ferramentas apresentaram valores *outliers*, uma com relação ao diâmetro, que ficou com o valor de 7,94 mm, e outra com relação ao ângulo de hélice, este apresentou o valor de 30,30°.

Estas duas ferramentas foram descartadas e não foram utilizadas nos experimentos, já que esta variação pode ser oriunda de um defeito na fabricação e poderiam alterar os resultados dos testes.

Figura 26 – Medições de diâmetro, ângulo de hélice e raio de quina

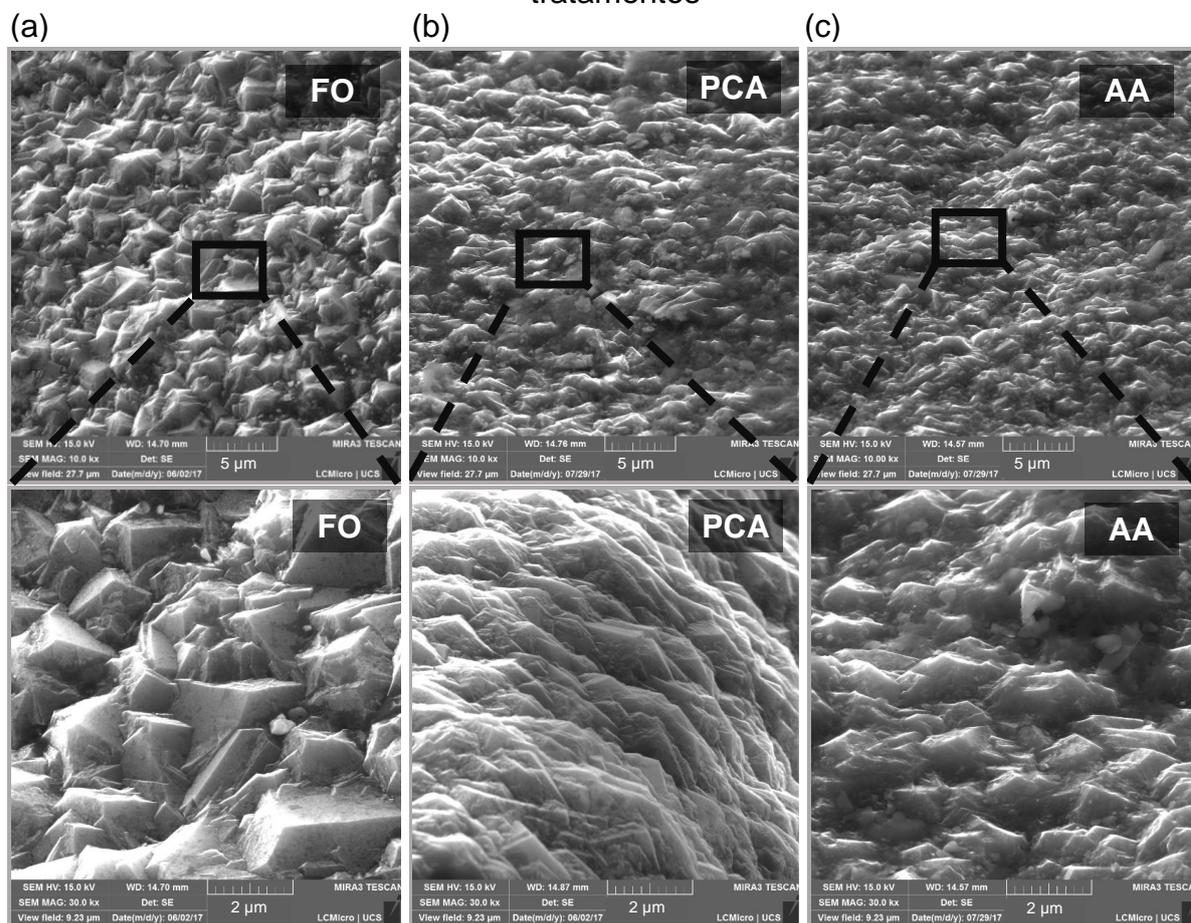


Fonte: O autor

Com relação a caracterização superficial das ferramentas, a Figura 27 traz uma vista da superfície do flanco das mesmas com os três processos: original (FO), polimento com cerdas abrasivas (PCA), e acabamento por arraste (AA).

Observando as imagens da Figura 27 é possível distinguir os resultados provenientes dos diferentes tratamentos de gume: ferramenta original (a), polimento com cerdas abrasivas (b) e acabamento por arraste (c). A ferramenta original (FO), apresenta os cristais de PCD com uma aparente largura maior, sendo a média em torno de 2 μm .

Figura 27 – Análise MEV das superfícies das ferramentas com diferentes tratamentos



Fonte: o autor

É possível identificar também uma maior diferença entre os picos e vales na superfície, além da definição bem clara das arestas dos cristais.

Na imagem da ferramenta original fica bem evidente também que os cristais de PCD possuem uma orientação de crescimento perpendicular à superfície da ferramenta.

A topografia na ferramenta original se assemelha às análises realizadas por Ralchenko et al. (2016), devido aos grãos de diamante estarem com as faces bem definidas e arestas com cantos mais vivos. Essa característica, conforme Klocke e König (2008), faz com que a resistência a solicitações abrasivas no processo de usinagem não seja tão elevada se comparada com arestas arredondadas.

A ferramenta que passou pelo processo de polimento com cerdas abrasivas (PCA), apresenta uma redução, se comparada à original, nas medidas de largura dos cristais, menor que 1 μm , ocasionado possivelmente devido à clivagem dos cristais.

Fica evidente também a redução nas alturas dos cristais em comparação com a ferramenta original e a perda da definição clara das arestas dos mesmos.

Seguindo a tendência da ferramenta com polimento com cerdas abrasivas, a ferramenta na qual foi realizado o processo de acabamento por arraste (AA), apresentou uma redução nos tamanhos dos cristais. Contudo, esta demonstrou um maior arredondamento das arestas dos cristais além de uma menor definição de seus picos.

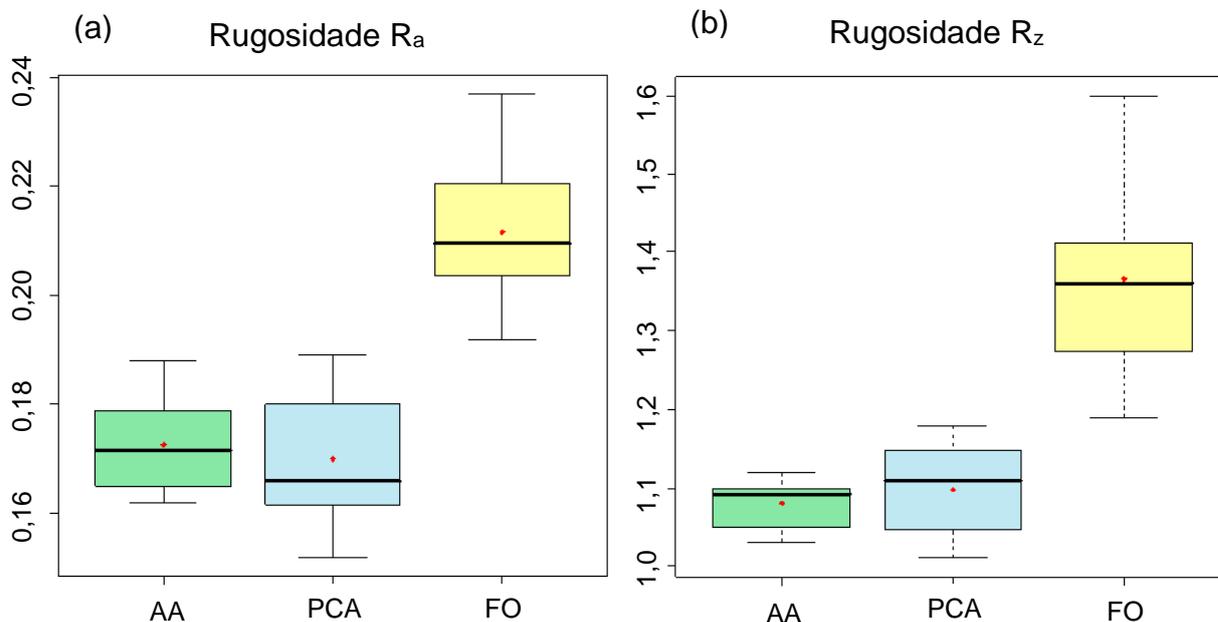
Todas as ferramentas apresentaram-se livres de micro lascamentos e micro defeitos.

Com o objetivo de evidenciar as alterações promovidas pelos processos de tratamento de gumes e a análise feita através do MEV, a Figura 28 apresenta os valores de rugosidade R_a (a), e R_z (b), para as ferramentas com o processo de acabamento por arraste (AA), polimento com cerdas abrasivas (PCA) e ferramenta original (FO), realizadas na região do flanco próximo ao gume principal das ferramentas.

Os boxplots desta figura mostram que a ferramenta original possui a maior variação e os maiores valores de rugosidade tanto para a rugosidade R_a quanto para a rugosidade R_z , o que acaba reforçando a análise realizada através das imagens de Figura 27 anterior.

As ferramentas com os processos de acabamento por arraste e polimento com cerdas abrasivas apresentaram estatisticamente os mesmos valores de rugosidade.

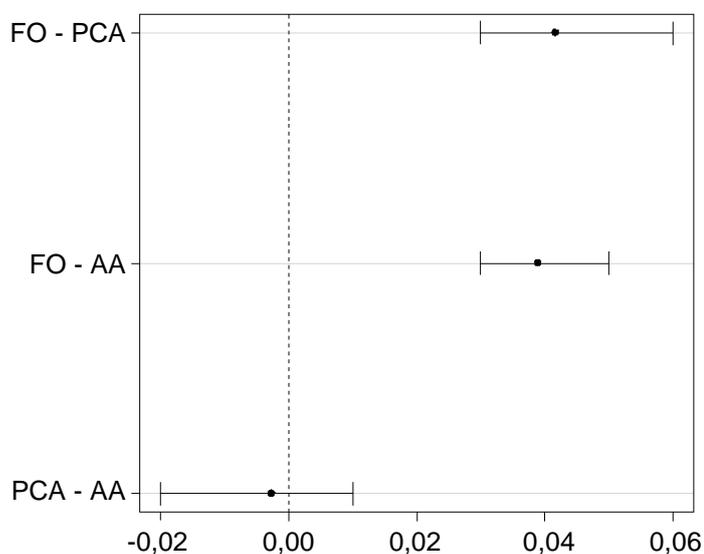
Figura 28 – Valores de rugosidade para as ferramentas



Fonte: o autor

A análise realizada através do Teste de Comparações Múltiplas de Fischer, Figura 29, corrobora com a análise realizada pelos boxplots da Figura 28, onde na primeira linha, comparação das médias das ferramentas FO com as PCA, e na segunda linha, comparação das médias das ferramentas FO e AA, indicam que elas possuem diferenças significativas, já que estas não estão cruzando a linha vertical no ponto zero.

Figura 29 – Análise por Fischer dos valores de rugosidade



Fonte: o autor

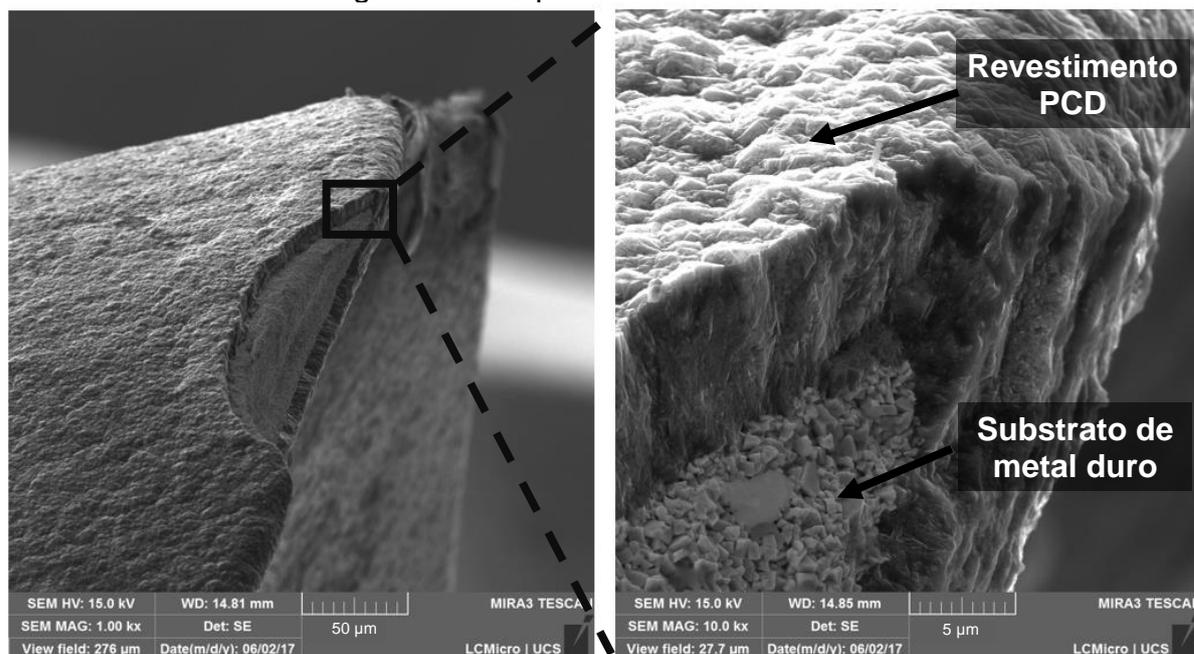
Já a comparação entre as ferramentas PCA e AA cruzam a linha pontilhada, o que indica que estas são estatisticamente similares.

A diferença que pode ser percebida através dos gráficos da Figura 28 é que o acabamento por arraste gerou uma superfície mais homogênea entre as ferramentas, já que a variação entre elas foi menor se comparada às ferramentas com o processo PCA. Conforme Tikal (2009), esta menor variação pode ser explicada devido este processo possuir mais controle sobre as variáveis.

A espessura da camada do revestimento também foi verificada através do Microscópio Eletrônico de Varredura, conforme Figura 30.

Nas medições do microscópio, a espessura média de 05 amostras ficou em $7,3 \mu\text{m}$, com um desvio padrão de $0,37 \mu\text{m}$, o que se enquadra na faixa de espessura para o revestimento PCD, conforme citado na revisão bibliográfica.

Figura 30 – Espessura do revestimento

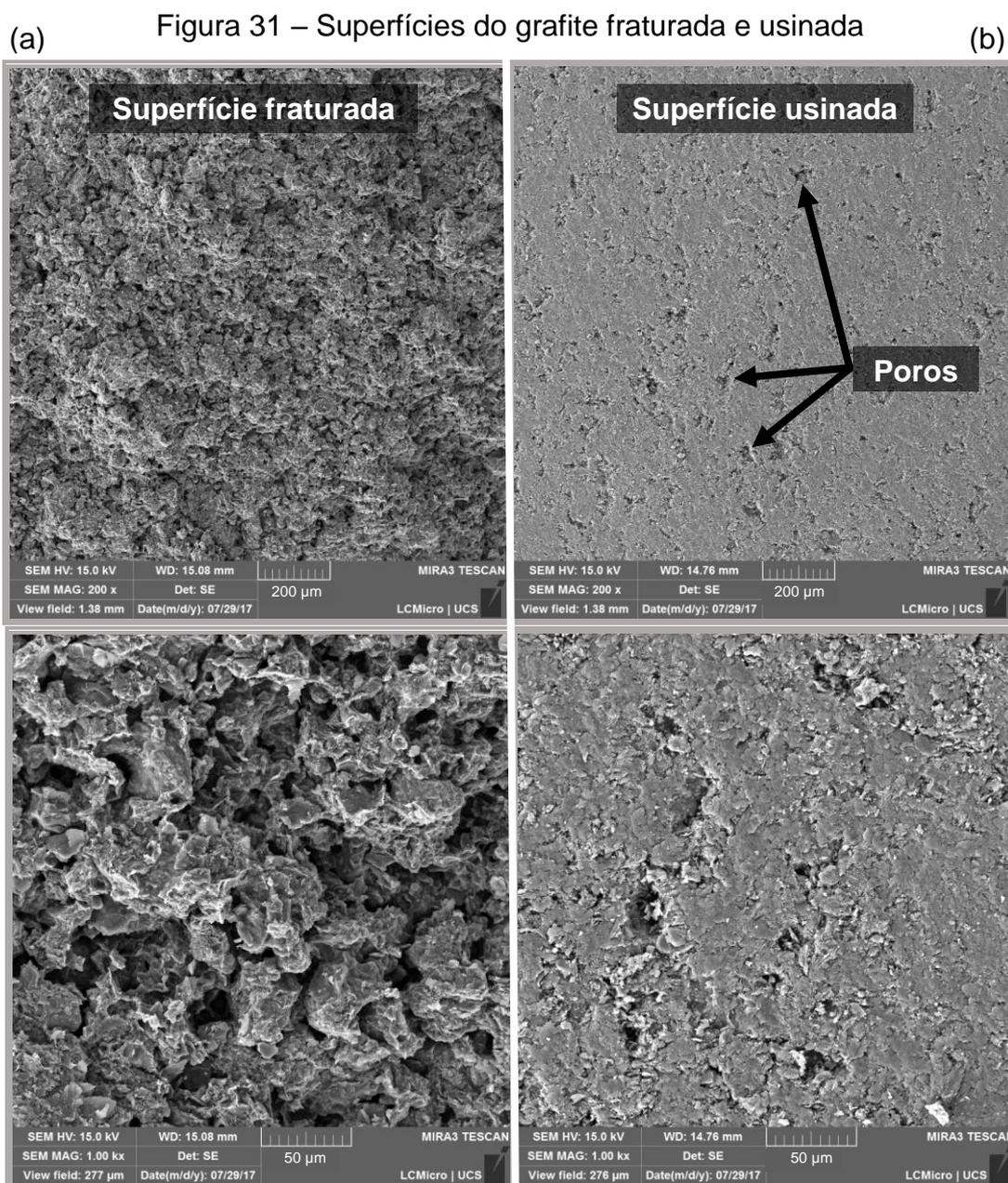


Fonte: o autor

4.5 CARACTERIZAÇÃO DO GRAFITE

Nesta seção são apresentadas as análises referentes ao grafite antes e após a usinagem a fim de compreender o alto poder abrasivo do material. São mostrados as texturas e os estados dos planos do grafite de forma qualitativa.

A análise foi realizada em um bloco de grafite onde uma das superfícies foi usinada com os parâmetros iguais aos utilizados durante os testes e com a fresa original de fábrica (b), e a outra superfície foi fraturada através de impacto externo (a), a fim de verificar a estrutura e a topografia do bloco sem ter sofrido processo de fresamento. As imagens destas superfícies podem ser verificadas na Figura 31.



Fonte: o autor

As duas imagens do lado esquerdo desta figura são referentes às superfícies fraturadas, a primeira com ampliação de 200x e a segunda com 1000x. Já as duas

imagens do lado direito são referentes às superfícies usinadas com as mesmas ampliações.

Na imagem da superfície fraturada é possível verificar, de forma qualitativa, a heterogeneidade dos grãos de grafite, a aspereza da superfície e a elevada quantidade de vazios presentes na estrutura do grafite provenientes do processo de fabricação do bloco, o que é responsável pela porosidade do material.

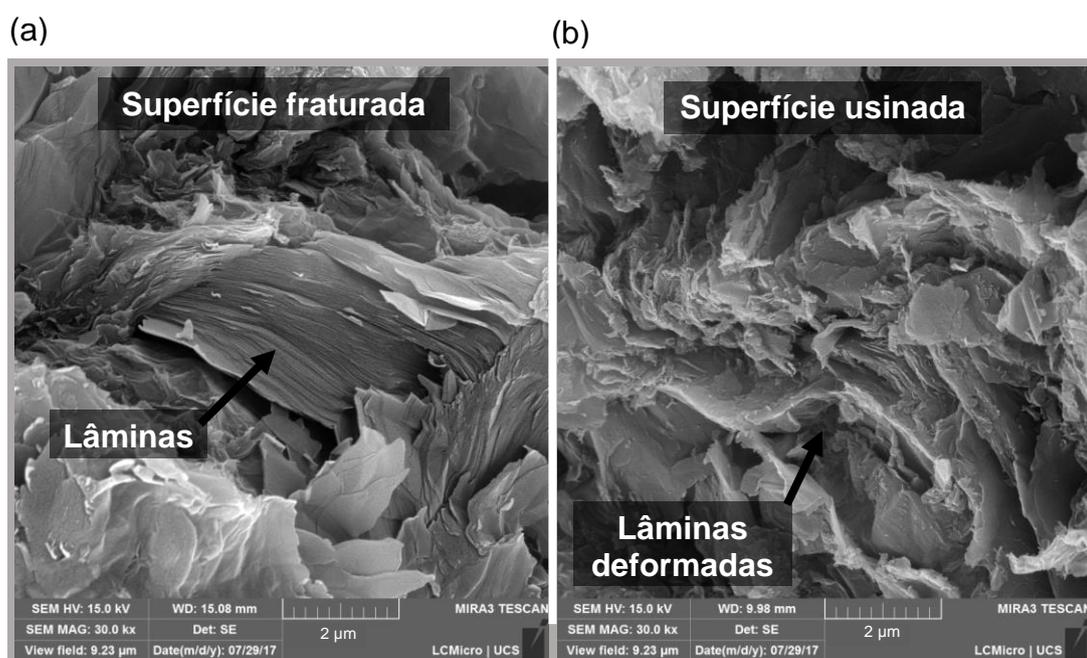
Já na superfície usinada há, aparentemente, uma maior planicidade da face proveniente do fresamento, se comparada à superfície fraturada.

A porosidade do material é visível também nesta condição, conforme identificado na Figura 31, no qual, as regiões escuras representam a porosidade enquanto as regiões mais claras representam a matriz do grafite.

É nesta matriz, composta de partículas menores unidas química e mecanicamente, que estão dispostas as lâminas de grafite.

Com o intuito de verificar as alterações provocadas na estrutura do grafite, mais especificamente no plano basal do mesmo devido ao fresamento, a Figura 32 traz as imagens das superfícies fraturadas (a), e usinadas (b), do grafite com uma ampliação de 30000x.

Figura 32 – Estrutura do grafite



Fonte: o autor

Na imagem da superfície fraturada, é possível identificar as lâminas do grafite similares às identificadas por Hutchings (1992) e Paulchamy et al. (2015), sobrepostas de forma mais simétricas comparadas às da imagem da superfície usinada.

Na imagem da superfície fraturada, é possível perceber também uma das propriedades do grafite, a fragilidade, devido à ruptura quase plana das lâminas do material.

Com relação à superfície usinada, a figura mostra que a região que passa pelo processo de corte, além de apresentar o cisalhamento do grafite, acaba gerando também altas deformações no material e uma elevada quantidade de quebra das lâminas, conforme Pierson (1993), exige uma alta quantidade de energia devido a ligação covalente dos átomos de carbono da estrutura do grafite, sendo esta uma possível causa para o poder abrasivo do grafite.

Este processo de usinagem do grafite se faz necessário devido às geometrias dos eletrodos e do acabamento necessário na superfície do mesmo, já que o processo de eletroerosão irá ter grande influência destas variáveis.

4.6 DESGASTES DAS FERRAMENTAS

Nesta seção são apresentados os resultados dos desgastes nas fresas utilizadas neste trabalho, através das curvas de vida relacionadas com o comprimento usinado para cada condição e as caracterizações dos mecanismos de desgaste.

4.6.1 Curva de vida das ferramentas

Primeiramente foram geradas as curvas de comportamento de vida das ferramentas testadas para as três condições de tratamento de gume, Figura 33.

Os pontos de medição refletem os desgastes de flanco máximo (V_{Bmax}) medidos nas ferramentas a cada 200 metros de comprimento usinado. Apenas as duas primeiras medições foram realizadas com um intervalo de 100 metros de comprimento com o objetivo de identificar melhor o primeiro estágio de desgaste.

As três curvas identificadas no gráfico foram resultantes de um teste e suas duas réplicas, estes conduzidos até o desgaste V_{Bmax} atingir o valor de 0,2 mm.

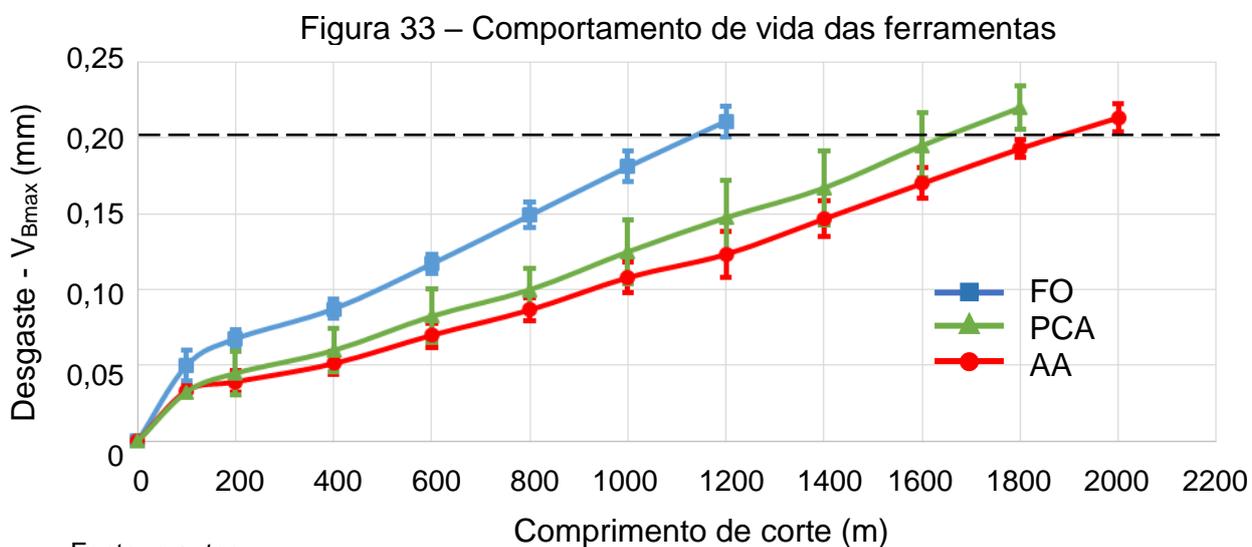
Como característica das três curvas, o início apresenta-se acentuado seguido de um crescimento mais estável próximo da linearidade.

Conforme Machado et al. (2009), este início acentuado é conhecido como Estágio I – Adaptação, que é uma adequação ao sistema tribológico envolvido. Na sequência, o Estágio II – Estabilização, é a fase de corte mais estável. Nenhuma das curvas entrou no Estágio III – Desgaste catastrófico.

Através das curvas do gráfico é possível perceber já nas primeiras medições que as ferramentas originais (FO), apresentaram um desgaste de flanco máximo maior que as ferramentas com tratamento (AA e PCA).

Pelo gráfico percebe-se também o comportamento muito similar entre as curvas das ferramentas com o processo de acabamento por arraste e o processo de polimento com cerdas abrasivas.

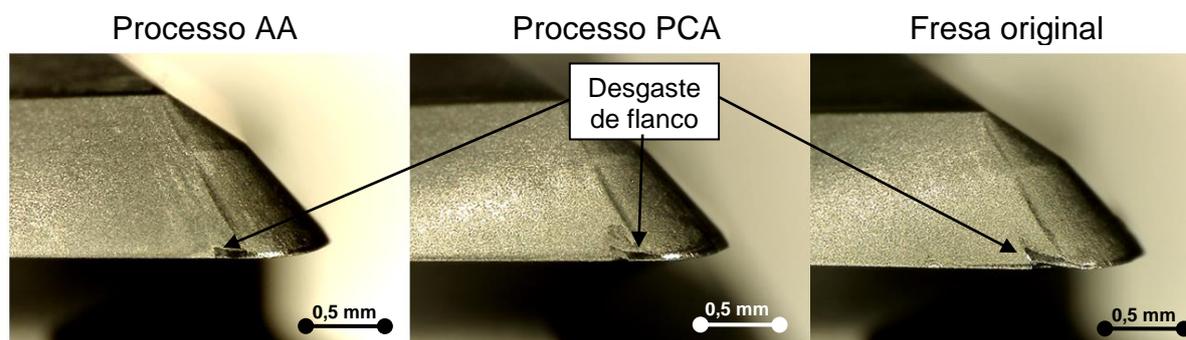
Contudo, as ferramentas PCA demonstraram uma variação maior entre os testes, se comparadas ao processo AA, mesmo assim ambas apresentaram desempenhos superiores às ferramentas FO.



A fim de ilustrar a variação do desgaste encontrada nas ferramentas apresentadas no gráfico anterior, a Figura 34 traz as imagens do flanco de uma amostra de cada processo testado no comprimento usinado de 1000 metros.

É visível que nas ferramentas com os processos AA e PCA o desgaste de flanco se comportou de forma similar, enquanto que na fresa original, comparando-se com os processos anteriores, o desgaste se apresentou mais avançado.

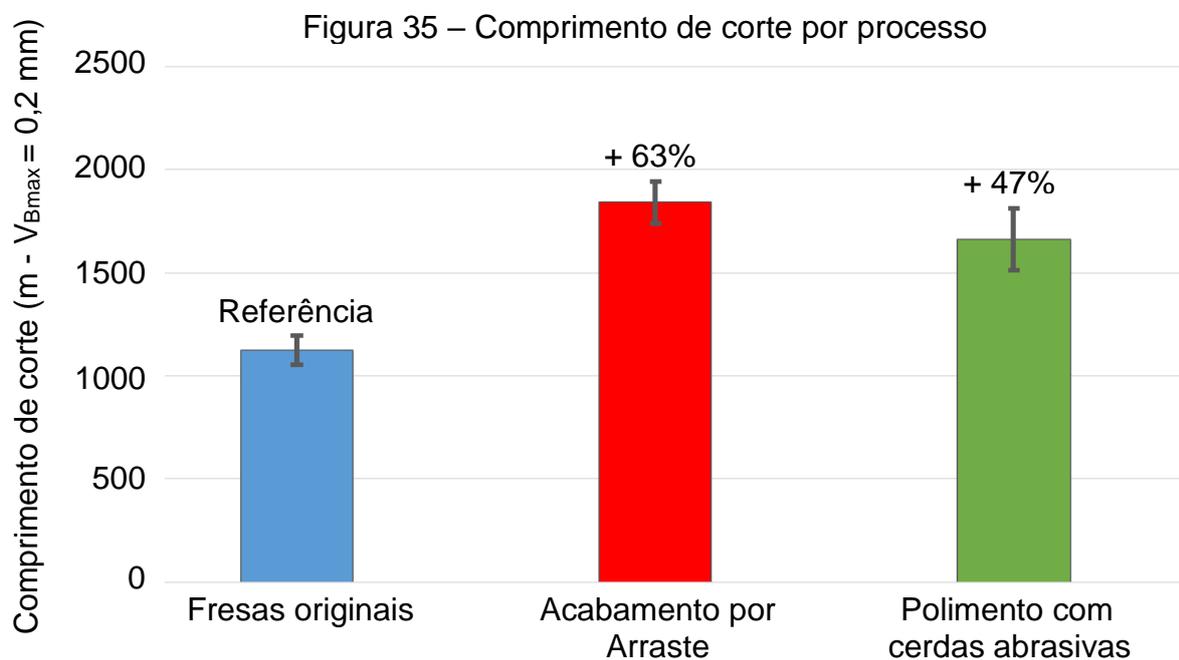
Figura 34 – Vista do desgaste de flanco máximo das ferramentas testadas



Fonte: o autor

Para comparar o desempenho de cada processo, na Figura 35 é apresentado um gráfico com o comprimento de corte médio realizado pelas ferramentas até estas atingirem o desgaste V_{Bmax} de 0,2 mm.

Devido a impossibilidade de ter finalizado os testes no exato instante do desgaste em 0,2 mm, os valores de comprimento de corte sofreram uma interpolação linear para o valor de 0,2 mm de desgaste.



Fonte: o autor

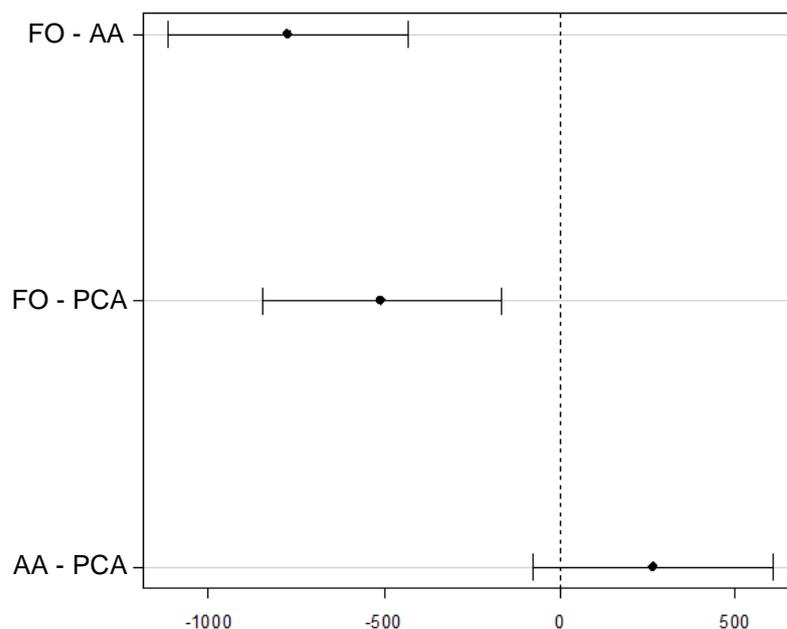
Nesta figura está identificado também o ganho em percentual do comprimento de corte utilizando-se as fresas originais como referência. Os dois processos de tratamento de gume apresentaram ganhos consideráveis, sendo o acabamento por

arraste com um aumento médio de 63% e o acabamento com cerdas abrasivas de 47%.

A análise realizada através do Teste de Comparações Múltiplas de Fischer, Figura 36, corrobora com a análise realizada pelo gráfico da Figura 35, onde na primeira linha, comparação das médias das ferramentas FO com as AA, e na segunda linha, comparação das médias das ferramentas FO e PCA, indicam que elas possuem diferenças significativas, já que estas não estão cruzando a linha vertical no ponto zero.

Já a comparação entre as ferramentas AA e PCA cruzam a linha pontilhada, o que indica que estas são estatisticamente similares.

Figura 36 – Análise por Fischer do comprimento usinado



Fonte: o autor

Uma possível relação deste ganho no comprimento usinado pelas ferramentas tratadas tendo-se como referência as não tratadas são os valores de rugosidade apresentados nas caracterizações das fresas.

As rugosidades dos dois tratamentos realizados apresentaram redução em comparação com a ferramenta original e, o processo de polimento com cerdas abrasivas apresentou também uma maior variação nas medições, comparando-se com o acabamento por arraste.

Como comparativo, no experimento realizado por Bouzakis et al. (2014), o processo de polimento por cerdas abrasivas em pastilhas de metal duro com revestimento de TiAlN no fresamento do Inconel 718 apresentou um aumento na vida da ferramenta em 30%, comparando-se com a ferramenta original sem tratamento.

No experimento de Zeilmann et al. (2013), o processo de acabamento por arraste em fresas de aço-rápido apresentou uma redução no V_{Bmax} de 50%, na usinagem de faceamento do material AISI P20, se comparado ao desgaste da mesma fresa sem tratamento de gume.

4.6.2 Mecanismos de desgaste

Com o objetivo de detectar os tipos e mecanismos de desgaste predominantes no processo durante os experimentos, esta seção apresenta as imagens geradas através da microscopia eletrônica e as respectivas análises das ferramentas ensaiadas.

As análises foram feitas em todas as ferramentas. As imagens de microscopia eletrônica foram feitas de apenas um gume, para cada condição (Figura 37).

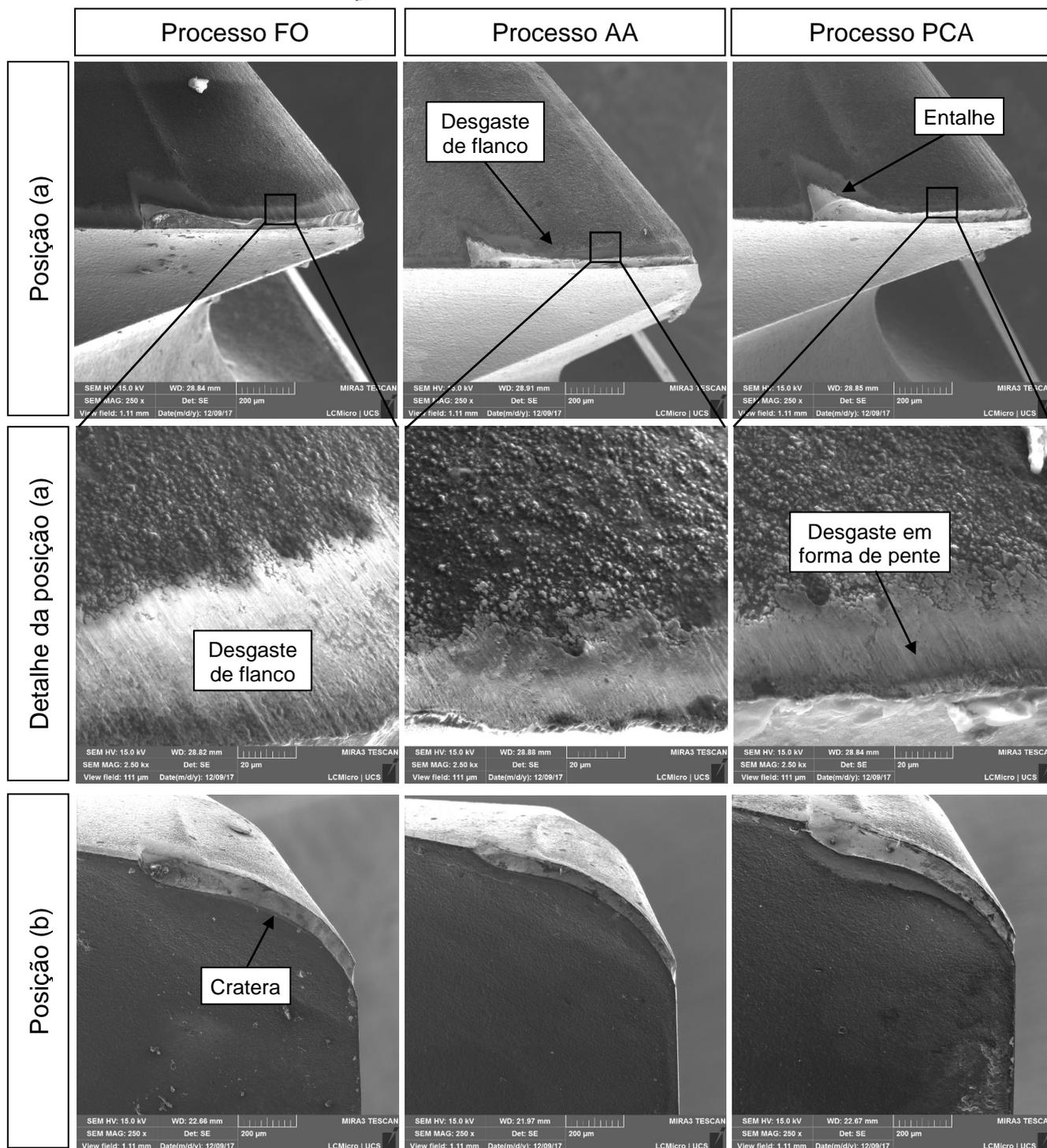
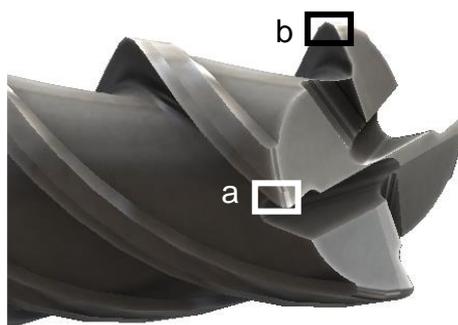
A primeira imagem desta figura traz as indicações nos quadros “a” e “b” das regiões do flanco e da face da ferramenta que foram feitas as verificações no microscópio. Contudo, estas regiões foram analisadas de um mesmo gume.

A maneira como os desgastes se apresentaram foi similar para todas as condições testadas. Aparentemente o mecanismo de desgaste mais presente foi a abrasão, que retrata como resultado o desgaste de flanco.

Este desgaste ocorre de forma comum na usinagem de grafite e é gerado predominantemente pelo fluxo de pó ultrafino do grafite, conforme constatado por diversos pesquisadores (KLOCKE E KÖNIG, 2008; ALMEIDA et al., 2008; CABRAL et al., 2006; SCHROETER et al., 2006).

Um desgaste característico na usinagem do grafite, gerado também devido ao mecanismo de abrasão, conhecido como desgaste em forma de pente, aparece de forma sutil nesta figura. Este desgaste gera sulcos na ferramenta devido a passagem e o atrito do fluxo do pó de grafite (KLOCKE E KÖNIG, 2008).

Figura 37 – Imagens das ferramentas

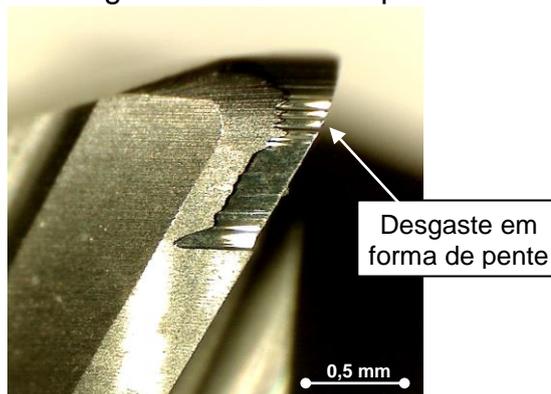


Fonte: o autor

Uma caracterização mais clara do desgaste em forma de pente pode ser visualizada na Figura 38, já que este tipo de desgaste fica evidente com o aumento dos sulcos de passagem do pó de grafite.

Esta figura retrata a ferramenta com revestimento TiAlN utilizada durante o pré-teste com uma ampliação de 150x.

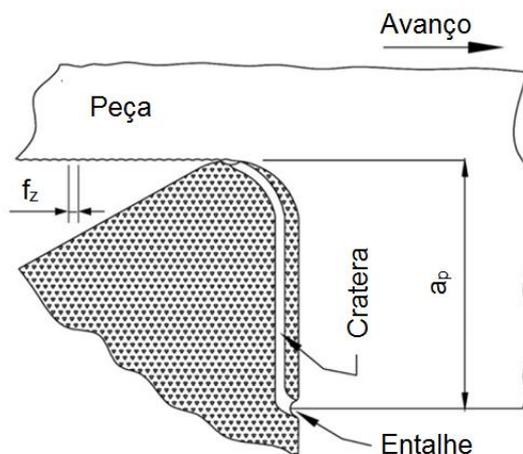
Figura 38 – Desgaste em forma de pente



Fonte: o autor

Por fim, são identificados os desgastes de entalhe e de cratera, onde o último consiste em uma seção côncava na face inclinada da ferramenta, formada pela ação do pó de grafite que entra em contato contra a face da ferramenta durante a usinagem. Este efeito está representado na Figura 39.

Figura 39 – Representação esquemática do desgaste de cratera e entalhe gerados durante a usinagem



Fonte: Adaptado de Cabral et al. (2008)

Este processo conduz não só à formação de uma cratera, mas também a geração dos entalhes, que funcionam como vias de saída 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).

5. CONCLUSÃO

Os resultados obtidos através da realização deste trabalho contribuíram para a melhor compreensão sobre os tratamentos de gume realizados em fresas e os seus impactos durante a usinagem de eletrodos em grafite.

A partir da abrangência do objetivo do estudo, avaliou-se as aplicações dos tratamentos de gume em fresas com revestimentos e a caracterização de fresas com revestimento PCD com o objetivo de verificar a influência destes tratamentos no acabamento das mesmas. Analisou-se também a atuação destes tratamentos na vida útil das fresas, além da verificação dos mecanismos e tipos de desgastes presentes durante os ensaios experimentais.

Diversos são os tratamentos de gume indicados para a melhora no acabamento de ferramentas já finalizadas com revestimento, porém, em ferramentas com geometrias mais complexas os processos de polimentos com cerdas abrasivas e de acabamento por arraste são os que obtém um aperfeiçoamento no acabamento do revestimento e possuem uma aplicação mais simples.

Através deste embasamento, os processos de polimentos com cerdas abrasivas e de acabamento por arraste foram aplicados através de seus devidos processos no tratamento de gume das fresas de metal duro com revestimento de diamante policristalino para a usinagem de grafite

A caracterização das ferramentas proporcionou a verificação e comparação de dados de forma macro geométrica, através da análise dos valores de diâmetro, ângulo de hélice e raio de quina das mesmas. Realizou-se também a análise da topografia das ferramentas, o que tornou possível a visualização dos resultados dos tratamentos nas superfícies e o comparativo com as ferramentas originais de fábrica.

As análises no MEV indicaram, tanto para as ferramentas que passaram pelo processo de polimento com cerdas abrasivas quanto para as que passaram pelo processo de acabamento por arraste, uma superfície com uma aparente redução na largura dos cristais, e, nas ferramentas com processo AA, ficou visível também um aparente arredondamento das arestas dos cristais.

As medições de rugosidade nas ferramentas apresentaram um ganho no acabamento das ferramentas tratadas, o que foi, em média, de 23%. Os dois processos de acabamento testados apresentaram, estatisticamente, os mesmos

valores de rugosidade, contudo o processo AA apresentou uma menor variação tanto na comparação com o processo PCA quanto com a ferramenta FO.

A caracterização do grafite demonstrou as alterações provocadas devido ao processo de usinagem na estrutura do material, sendo a mais relevante as deformações nas lâminas do plano basal do grafite, o que pode ser uma possível explicação para o alto poder abrasivo do material.

Pela curva de vida, é possível verificar a menor inclinação das curvas das ferramentas PCA e AA em comparação à da ferramenta FO, o que indicou o menor desgaste durante os testes. É visível também o comportamento similar destas duas curvas, porém um pouco mais elevado da curva PCA, contudo uma diferença visível é a menor variação dos resultados no que diz respeito à curva da ferramenta AA.

As ferramentas FO apresentaram o fim de vida com um comprimento médio usinado de 1126 metros, as ferramentas PCA com 1663 metros e as ferramentas AA com uma média de 1840 metros, o que apresenta um ganho de 47% e 63%, respectivamente.

Quanto ao desgaste, todas as ferramentas tiveram um comportamento semelhante, tendo os Estágios I e II da curva de desgaste bem definidos e nenhuma entrando no Estágio III. O mecanismo de desgaste, aparentemente, mais presente no processo foi a abrasão, apresentando como características os desgastes de flanco, cratera e entalhe. Outro desgaste bem característico na usinagem do grafite e presente neste experimento foi o desgaste em forma de pente, que apresenta marcas de abrasividade verticais.

De forma geral, os dois processos de polimento apresentaram ganhos e demonstraram seus potenciais para serem aplicados em ferramentas de produção.

6. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Tendo-se como base os resultados obtidos nos experimentos, são sugeridos os seguintes tópicos para a realização de trabalhos futuros:

- a) avaliar o processo de polimento com cerdas abrasivas através da utilização de outros materiais para a realização do polimento;
- b) avaliar a utilização de outras mídias no processo de acabamento por arraste;
- c) avaliar outros processos de tratamentos de gume na usinagem de grafite e verificar a influência no desgaste das ferramentas;
- d) avaliar o comportamento da rugosidade na superfície do grafite com relação aos diferentes processos de tratamentos de gume;
- e) averiguar a influência do tamanho do grão do grafite nos desgastes apresentados nas ferramentas;
- f) verificar a influência dos diferentes tratamentos de gume na estrutura do grafite após usinagem.

7. 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.

ALTAN, T.; LILLY, B.; YEN, Y. C. Manufacturing of dies and molds. **Annals of the CIRP**, v. 50, n. 2, p. 405-423, 2001.

ALVES, Janine. Loetz: Conferência Mundial de Ferramentarias reúne empresas de 14 países em Joinville. **A Notícia**, ClicRBS. Joinville, 28 jun. 2017. Disponível em: <<http://anoticia.clicrbs.com.br/sc/economia/noticia/2017/06/loetz-conferencia-mundial-de-ferramentarias-reune-empresas-de-14-paises-em-joinville-9826797.html/>> Acesso em: 08 de julho de 2017.

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. 175 f. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2002.

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.

BASSETT, E.; KÖHLER, J.; DENKENA, B. On the Honed Cutting Edge and its Side Effects During Orthogonal Turning Operations of AISI1045 with Coated WC-Co Inserts. **CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology**, n. 5, p. 108–126, 2012.

BHATTACHARYYA, P.; SENGUPTA D.; MUKHOPADHYAY S. Cutting force-based real-time estimation of tool wear in face milling using a combination of signal processing techniques, **Mechanical Systems and Signal Processing**, v. 21, pp. 2665-2683, 2007.

BERMAN, D. et al. Graphene: a new emerging lubricant. **Materials Today**, v. 17, p. 31-42, 2014.

BIERMANN, D.; TERWEY, I. Cutting edge preparation to improve drilling tools for HPC processes. **Journal of Manufacturing Science and Technology**. p. 76-90, 2008.

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 and Manufacturing, v. 44, n. 44, p. 101-107, 2003.

BOUZAKIS, K. D.; MICHAILEDIS, N.; SKORDARIS, G.; BOUZAKIS, E.; BIERMANN, D.; M'SAOUBI, R. Cutting with coated tools: coating technologies, characterization methods and performance optimization. **CIRP Annals** v. 61, p. 703–723, 2012.

BOUZAKIS, K. D.; BOUZAKIS, E.; KOMBOGIANNIS, S.; MAKRIMALLAKIS, S. Effect of cutting edge preparation of coated tools on their performance in milling various materials. **Journal of Manufacturing Science and Technology**. v. 7, p. 264-273, 2014.

BORDIN, F. M. **Efeito do tratamento da microgeometria de brocas helicoidais de metal-duro sobre a integridade superficial dos furos**. 2013. 128 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Universidade de Caxias do Sul, Caxias do Sul, 2013.

BOWDEN, F.; YOUNG, F. R. S.; YOUNG, J. E.; Friction of diamond, graphite, and carbon and the influence of surface films. **The Royal Society Publishing**, v. 208, p. 444-455, 1951.

BRAGG, W. **An introduction to crystal analysis**. G. Bell and Sons Ltda, London, p. 64, 1928.

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, Y.; ZHANG, L. C.; TANG, F. Surface integrity of PCD composites generated by dynamic friction polishing: effect of processing conditions. **Journal of Diamond and Related Materials**, v. 26, p. 25-31, 2012.

CUNHA, Joyce. Ferramentarias debatem desafios e oportunidades do setor. **ABC do ABC**. São Bernardo do Campo, 23 jul. 2016. Disponível em: Acesso em: <<http://www.abcdoabc.com.br/sao-bernardo/noticia/ferramentarias-debatem-desafios-oportunidades-setor-40868>>. Acesso em: 8 fev. 2017.

DENKENA, B.; BREIDENSTEIN, B. Cohesive damage of PVD-coated cutting tools – a result of the residual stress distribution. **9th Int. Conf. “THE A Coatings”**, Thessaloniki, Greece, 3–5 October, p. 89–97, 2011.

DENKENA B.; BIERMANN D. Cutting edge geometries. **CIRP Annals - Manufacturing Technology**, v.63, p. 631–653, 2014.

DINIZ, A. E.; MARCONDES, F. C.; COPPINI, N. L. **Tecnologia da usinagem dos materiais**. 4. ed. São Paulo: Artliber, 248 p. 2003.

FERRARESI, D. **Fundamentos da usinagem dos metais**. 5 ed. São Paulo: Ed. Blücher, 1977. 751 p.

FOUQUET, S. et al. Tribological behavior of composites made carbon fibres and ceramic matrix in the Si-C system. **Wear**, v. 264, p. 850-856, 2008.

HELLENO, A. L. **Investigação de métodos de interpolação para trajetória da ferramenta na usinagem de moldes e matrizes com alta velocidade**. 2004. 157 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Faculdade de Engenharia Mecânica e de Produção, Universidade Metodista de Piracicaba, Santa Bárbara d'Oeste. 2004.

HUTCHINGS, I. M. **Tribology – Friction and wear of engineering materials**. Department of materials science and metallurgy. University of Cambridge. London: Arnold. 278 p. 1992.

KAPLAN, R. S.; NORTON, D. P. **A estratégia em ação: balanced scorecard**. Rio de Janeiro: Elsevier, 1997.

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

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

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.

MACHADO A. R.; COELHO R. T.; ABRÃO A. M.; SILVA M. B., **Teoria da usinagem dos materiais**. 9. ed. São Paulo: Blucher, 384 p. 2009.

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.

MEDINA, N. F.; BARBERO-BARRERA, M. M.; BUSTAMANTE, R. Improvement of the properties of gypsum-based composites with recycled isostatic graphite powder from the milling production of molds for electrical discharge machining (EDM) used as a new filler. **Construction and Building Materials**. v. 107, p. 17-27, 2016.

METALS HANDBOOK. **Properties and selection: Nonferrous Alloys and Special Purpose Materials**, ASM International, Vol. 2, 1990.

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

MURAKAWA, M.; TAKEUCHI, S.; ALAHELISTEN, A.; KASUGAI, M. An efficient mechanical polishing method for diamond-coated inserts and testing of their performance. **Journal of Surface and Coatings Technology**. p. 686-691, 1996.

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

OST, C. A. **Análise da qualidade superficial no fresamento de aço P20 com diferentes tratamentos de ferramentas e condições de lubrificação**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Pós-graduação em engenharia Mecânica, Universidade de Caxias do Sul, Caxias do Sul, 2016.

OTEC, Edge Rounding and polishing of Tools. Apresentação, 2008.

OTEC. Mídias para processo a seco. Disponível em: <
<http://www.otec.de/pt/produtos/media/processo-a-seco/casca-de-noz-granulada/>>.
Acesso em: 04 de abril de 2017.

OVERHOLSER, R. W.; STANGO, R. J.; FOURNELLE. Morphology of metal surface generated by nylon/abrasive filament brush. **International Journal of Machine Tools and Manufacture**, n. 43, p. 193-202, 2003.

PAULCHAMY, B.; ARTHI, G.; LIGNESH, B. D. A simple approach to stepwise synthesis of graphene oxide nanomaterial. **Journal Nanomedicine e Nanotechnology**. v. 06, 2015.

PIERSON, H. O. Handbook of carbon, graphite, diamond and fullerenes: properties, processing and applications. New Jersey, EUA. Noyes Publications, 417 p. 1993.

POCO Graphite. EDM Technical Manual. Disponível em: <
<http://edmttechman.com/>>. Acesso em: 16 de fevereiro de 2017.

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.

RALCHENKO, V. G.; ASHKINAZI, E. E.; ZAVEDEEV, E. V.; KHAMICH, A. A.; BOLSHAKOV, A. P.; RYZHKOV, S. G.; SOVYK, D. N.; SHERSHULIN, V. A.; YUROV, V. YU.; RUDNEV, V. V. High-rate ultrasonic polishing of polycrystalline Diamond films. **Journal of Diamond and Related Materials**, v. 66, p. 171-176, 2016.

RISSE K., **Einflüsse von Werkzeugdurchmesser und Schneidkantenverrundung beim Bohren mit Wendelbohrern in Stahl**. Doctorate Thesis, RWTH Aachen, Aachen, 153p. 2006.

RODRIGUEZ, C.J.C. **Cutting edge preparation of precision cutting tools by applying micro-abrasive jet machining and brushing**. 2009. 205 f. Doctorate Thesis, Kassel University, Germany, 2009.

RYU, S. H.; CHOI, D. K.; CHU, C. N. Roughness and texture generation on end milled surfaces. **International Journal of Machine Tools & Manufacture**, v. 46, p. 404–412, 2006.

SANDVIK COROMANT. **Fabricação de moldes e matrizes, ferramentas e métodos**, CH02, v. 2, p. 258, 2002.

SANTANNA, J.P. Ferramentaria Moderna: Crise passa longe dos moldes. **Plástico**, São Paulo, 16 nov. 2015. Disponível em: < <http://www.plastico.com.br/ferramentaria-moderna-crise-passa-longo-dos-moldes/>> Acesso em: 31 de julho de 2016.

SCHROETER, R. B.; WEINGAERTNER, W, L. **Tecnologia da usinagem com ferramentas de corte de geometria definida – Parte II**. Laboratório de Mecânica de Precisão. Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis. 2002.

SCHROETER, R. B.; KRATOCHVIL, R.; GOMES, J. O. High-speed finishing milling of industrial graphite electrodes. **Journal of Materials Processing Technology**, v. 179, p. 128-132, 2006.

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

SKINNER, J.; GANE, N.; TABOR, D. Micro-friction of graphite. **Nature**, v. 232, p. 195–196, 1971.

WALTER tools. Catálogo Walter Prototyp. Disponível em: <<http://waltertools.blaetterkatalog.de/gc2012/>>. Acesso em: 01 de fevereiro de 2017.

WILLIAMS, J. A.; MORRIST, J. H.; BALL, A. The effect of transfer layers on the surface contact and wear of carbon-graphite materials. **Journal of Tribology International**, v. 30, p. 663-673, 1997.

TIKAL, F. **Schneidkantenpräparation: Ziele, Verfahren und Messmethoden**. Kassel University Press, 2009.

TOKAY Carbon. **Graphite Electrode**. Disponível em: <<http://www.tokaicarbon.co.jp>>. Acesso em: 22 de outubro de 2017.

TSAI, H. Y.; TING, C. J.; CHOU, C. P. Evaluation research of polishing methods for large area diamond films produced by chemical vapor deposition. **Journal of Diamond and Related Materials**, v. 16, p. 253-261, 2006.

UHLMANN, E.; OBERSCHMIDT, D.; KUCHE, Y.; LÖWENSTEIN, A. Cutting edge preparation of micro milling tools. **Procedia Cirp**. p. 349-354, 2014.

VENTURA, C. E. H. **Estudo dos esforços de corte no processo HSM aplicado à abertura de cavidades**. 2010. 185 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Pós-graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2010.

XU, Y.; CHEN, K.; WANG, S.; CHEN, S.; ZHU, C.; YU, X. Performance of AlTiN and diamond coated carbide tools in dry high-speed milling of electro discharge machining graphite. **Journal of Engineering Manufacture**. p. 1-10, 2016.

ZANELLA, C. Z.; **Avaliação da influência da velocidade de corte, avanço por gume e revestimento de ferramenta no fresamento de eletrodos de grafite**. Trabalho de conclusão de curso (Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade de Caxias do Sul, Caxias do Sul, 2015.

ZEILMANN, Z. P.; VACARO, T.; DOS REIS, E. S.; WESTPHAL, C. J. Desempenho de fresas de aço-rápido após tratamento superficial. In: **7º Congresso brasileiro de engenharia de fabricação**, Itatiaia, Rio de Janeiro, Brasil. 2013.

8. APÊNDICE A – ANÁLISE ESTATÍSTICA

Tabela 7 – Tabela ANOVA para o desgaste de flanco do pré-teste

Fonte de variação	Soma quadrática	Graus de liberdade	Média quadrática	F0	Fc	P
A	0,1845	1	0,1844703	1459,71	11,26	0,000000
B	0,0130	1	0,012996	102,84	11,26	0,000008
C	0,0014	1	0,0014063	11,13	11,26	0,010295
AB	0,0107	1	0,0107123	84,77	11,26	0,000016
AC	0,0009	1	0,0009	7,12	11,26	0,028422
BC	0,0001	1	0,0001322	1,05	11,26	0,336253
ABC	0,0001	1	0,000121	0,96	11,26	0,356485
Erro	0,0010	8	0,0001264			
Total	0,2117	15				

Fonte: O autor

9. ANEXO A – EQUIPAMENTOS UTILIZADOS

Os equipamentos utilizados neste trabalho estão apresentados nas Figuras 30 a 46.

Figura 40 – Sistema de centragem e fixação Erowa ITS®



Fonte: O autor

Figura 41 – Centro de Usinagem Rödgers RXP 801



Fonte: O autor

Figura 42 – Microscópio Digital de mão Micro Zoom (a) e Sistema de Medição Óptico e Vídeo Swift Duo (b)



Fonte: O autor

Figura 43 – Equipamento MEV - TESCAN



Fonte: Tescan, 2017

Figura 44 – Rugosímetro Mahr S2



Fonte: O autor

Figura 45 – Centro de Usinagem Dyna Myte DM4500



Fonte: O autor

Figura 46 – Equipamento para o acabamento por arraste DF3 tool



Fonte: Otec, 2017