

UNIVERSIDADE FEDERAL DO AMAZONAS
FACULDADE DE TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIA E
ENGENHARIA DE MATERIAIS

AVALIAÇÃO DA CONCENTRAÇÃO DE ALUMÍNIO NO DESGASTE DE
FERRAMENTAS DE CORTE RECOBERTAS COM TiAlN

Manaus–Amazonas

2017

ADRIANA ALENCAR SANTOS

**AVALIAÇÃO DA CONCENTRAÇÃO DE ALUMÍNIO NO DESGASTE DE
FERRAMENTAS DE CORTE RECOBERTAS COM TiAIN**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciência e Engenharia de Materiais da Faculdade de Tecnologia da Universidade Federal do Amazonas, como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Ciência e Engenharia de Materiais.

Orientador: Prof. Dr. Rafael Drumond Mancosu

Manaus–Amazonas

2017

UNIVERSIDADE FEDERAL DO AMAZONAS
FACULDADE DE TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIA E
ENGENHARIA DE MATERIAIS-PPGCEM

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO SUBMETIDO AO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIA E ENGENHARIA DE MATERIAIS DA FACULDADE DE TECNOLOGIA DA UNIVERSIDADE FEDERAL DO AMAZONAS, COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE EM CIÊNCIAS (M.Sc.).

APROVADA POR:

Prof. Dr. Rafael Drumond Mancosu (UFAM)
Orientador

Prof. Dr. José Costa de Macêdo Neto (UEA)
Examinador Interno

Prof. Dr. Gilberto Garcia del Pino (UEA)
Examinador Externo

Manaus–Amazonas

31 de Março de 2017

Ficha Catalográfica

Ficha catalográfica elaborada automaticamente de acordo com os dados fornecidos pelo(a) autor(a).

S237a	Santos, Adriana Alencar Avaliação da Concentração de Alumínio no Desgaste de Ferramentas de Corte Recobertas com TiAlN / Adriana Alencar Santos. 2017 111 f.: il. color; 31 cm. Orientador: Prof. Dr. Rafael Drumond Mancosu Dissertação (Mestrado em Ciência e Engenharia de Materiais) - Universidade Federal do Amazonas. 1. Desgaste. 2. ferramentas de corte. 3. revestimentos de TiAlN. 4. usinagem. I. Mancosu, Prof. Dr. Rafael Drumond II. Universidade Federal do Amazonas III. Título
-------	---

RESUMO

SANTOS, A. A. (2017). **AVALIAÇÃO DA CONCENTRAÇÃO DE ALUMÍNIO NO DESGASTE DE FERRAMENTAS DE CORTE RECOBERTAS COM TiAlN**. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Ciência e Engenharia de Materiais, Faculdade de Tecnologia, Universidade Federal do Amazonas, Manaus, Amazonas.

O objetivo nesta dissertação foi apresentar a avaliação da concentração de alumínio nas ferramentas de corte para analisar o desgaste após a usinagem. Essa pesquisa consiste não somente nas análises experimentais como também nas análises utilizando-se de recursos computacionais para capturar, tratar e quantificar imagens. As três ferramentas utilizadas na análise experimental foram as seguintes: uma pastilha sem revestimento e duas pastilhas possuem revestimento de TiAlN com alto e baixo teor de alumínio, respectivamente. A metodologia da pesquisa utilizada para determinar os parâmetros de usinagem e a caracterização dos materiais foi adaptada para as condições de execução disponíveis nas duas universidades públicas, parceiras no desenvolvimento científico, existentes no Amazonas, UFAM e UEA. Algumas técnicas de caracterização dos materiais foram adotadas tanto para a peça quanto para as ferramentas de corte. A caracterização da peça de ferro fundido nodular FUCO® FE 55006 foi feita através de metalografia e da determinação da dureza Rockwell, enquanto que a caracterização das ferramentas de corte e dos recobrimentos, foi realizada através da determinação dos parâmetros da geometria das pastilhas e da microdureza Vickers. O processo de usinagem foi realizado no torno mecânico universal alternando-se as ferramentas de corte e suas pontas de acordo com as distâncias usinadas de 60, 120, 180 e

240 mm com aumento gradativamente do número de passos na peça. Após a usinagem, imagens das ferramentas de corte foram obtidas por uma máquina ótica para analisar o desgaste. Com relação ao tratamento de imagens, softwares especializados foram utilizados no presente estudo. Foi desenvolvida uma rotina de linguagem de programação para quantificar a área desgastada. Além disso, profundidades do desgaste de cratera e valores de deslocamento do material das pastilhas, durante a usinagem, foram comparadas entre si. Por fim, os resultados indicam a evolução do desgaste diferenciada para ferramentas de corte sem recobrimento. No que diz respeito a variação da porcentagem de alumínio no recobrimento, os desempenhos foram distintos sendo diretamente relacionados as propriedades mecânicas das amostras para os casos estudados.

Palavras-chave: Desgaste; ferramentas de corte; revestimentos de TiAlN.

ABSTRACT

SANTOS, A. A. (2017). **WEAR EVALUATION OF THE ALUMINUM CONCENTRATION OF CUTTING TOOLS COATED WITH TiAlN**. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Ciência e Engenharia de Materiais, Faculdade de Tecnologia, Universidade Federal do Amazonas, Manaus, Amazonas.

The purpose of this dissertation was to present the evaluation of the aluminum concentration in the cutting tools to analyze the wear after turning. This research consists not only in experimental analyzes, but also in analyzes using computer programs to capture, treat and quantify images. The three cutting tools used in the experimental analysis were made of carbide, as follows: one uncoated tool and two TiAlN coated tools with high and low aluminum contents, respectively. The research methodology used to determine the machining parameters and the characterization of the materials was adapted to the execution conditions available in the two public universities, partners in the scientific development, existing in Amazonas, UFAM and UEA. Some materials characterization techniques were used for both workpiece and the cutting tools. The characterization technique for the workpiece made of cast iron was done through metallography and Rockwell hardness. While, the characterization for the cutting tools and the coverings was performed by determining the parameters of the geometry of the cutting tools and by a Vickers micro-hardness test. In order to study the wear evolution of the cutting tools, turning was performed on the universal lathe changing the cutting tools and their edges according to the machined distances of 60, 120, 180 and 240 mm increasing gradually the number of steps on the workpiece. Af-

ter the turning, images of the cutting tools were obtained by an optical machine to analyze the wear. In regards to the treatment of images, specialized software was used in the present study. Furthermore, a programming language routine was developed in order to quantify the wearied area. In addition, crater wear depths and material displacement values of the insert during turning were compared to each other. Finally, the results indicate the evolution of the differentiated wear for non-recoating cutting tools. Also, due to the variation of the aluminum percentage in the coating, different performance was observed directly related to the mechanical properties of the samples of the cases studied.

Keywords: Wear; cutting tools; TiAlN coating.

AGRADECIMENTOS

Ao meu orientador Prof, Dr. Rafael Mancosu por sua dedicação, competência e especial atenção nas revisões e sugestões que foram fundamentais para a conclusão deste trabalho.

À CAPES, pelo apoio financeiro concedido e a Universidade Federal do Amazonas, pela oportunidade.

Ao Prof. Dr. Renato Ávila pelo suporte especializado em definir parâmetros adotados na pesquisa e pelas doações das amostras e porta-ferramentas para que o estudo fosse conduzido.

Ao Prof. Dr. José Costa de Macêdo Neto por todo o seu apoio e por ser ponte de parceria UEA e UFAM para o desenvolvimento da pesquisa.

À UEA por disponibilizar equipamentos e laboratórios.

Ao Departamento de Engenharia de Mecânica e de Materiais.

À equipe técnica dos laboratórios de mecânica Patrick Nasser, Saymon Castro, Sanley Capucho e Waderson pelo suporte nos experimentos e contribuição neste trabalho.

À todos os professores do PPGCEM por todo o conhecimento transmitido que contribuíram para minha formação, em especial ao Prof Dr. Edgar Sanches, Prof Dr. Sergio Michielon, Prof Dr. Paulo Couceiro, Prof Dr. Roberto de Castilho e a Profa. Dra. Cristina Gomes da Silva.

Ao coordenador do laboratório de usinagem Prof. Dr. Marcionilo Neri por autorizar a utilização dos equipamentos.

Ao Prof. Dr. Gilberto Del Pino pelas valiosas considerações.

Ao amigo de faculdade Rubelmar de Azevedo Neto, doutorando da USP, por ter me

apresentado ao programa Wolfram Matemática utilizado nesse trabalho e por todo o seu suporte.

Aos estagiários do laboratório de Metalurgia pelo suporte em diversos experimentos.

À equipe do LABMAT-UFAM em especial Leonardo Soares de Oliveira e Miécio de Oliveira Melquíades.

À SANDVIK pelas doações das ferramentas de corte comerciais.

Aos colegas da minha turma de mestrado 2014-2 em especial à Sara Ribeiro, Jessica Gualberto, Ronny Martins, Joelma Ferreira e Meg Carolyn pelo companheirismo e suporte desde o início dessa jornada.

Aos colegas contemporâneos do mestrado João Carlos Martins, Carla De Albuquerque Dias, Eliomar Passos de Oliveira, Rudyere Silva, Fernanda Azuma, Paulo Dias, Francisco Brito Neto, e George Matos por todo apoio e incentivo.

Ao Prof. Dr. Rogerio Lopes por disponibilizar os seus livros, por todo incentivo e experiência de vida.

À Profa. Marlene Matos por sempre me encorajar.

À todos os meus familiares e amigos que me apoiaram nessa trajetória.

Aos meus avós, Neide e Nilton, e a tia Ana por me acolherem na sua casa durante o primeiro período do mestrado.

Ao meus pais, Alzira e Clovis, por todo apoio, carinho, por sempre acreditarem no meu potencial e não me deixarem desistir dessa jornada. Tenho muito orgulho de ser filha desse casal maravilhoso.

Ao meu melhor irmão, Israel Alencar Santos, por todo o seu encorajamento e companheirismo.

Ao meu esposo, Arlindo Lopes, pelo amor, compreensão e todo o seu apoio. Minha inspiração foi seu exemplo de persistência e determinação. Seu incentivo e estímulo foi o que me motivou a iniciar, continuar e finalizar essa jornada.

À Deus, por ter me dado força e saúde.

LISTA DE FIGURAS

2.1	(a) Ferro fundido nodular polido. (b) Ferro fundido nodular com ataque químico.	10
2.2	Esquema representativo de uma ferramenta com geometria definida. . .	11
2.3	Pastilha de metal duro e parafuso de fixação.	12
2.4	Principais áreas de desgaste de uma ferramenta de corte.	12
2.5	Tipos de avarias e desgaste nas ferramentas de corte.	14
2.6	Representação esquemática de cratera na superfície de saída da ferramenta de corte.	15
2.7	Causas de desgaste na usinagem.	16
2.8	Constituintes presentes na estrutura do metal-duro.	22
2.9	Microdureza Vickers dos principais revestimentos de ferramenta de corte.	24
2.10	Tendência de microdureza.	26
2.11	Representação esquemática da peça e ferramenta durante a usinagem. .	28
2.12	Principais ângulos e raios da ferramenta de corte.	29
3.1	Efeitos dos diferentes parâmetros no desgaste de ferramenta.	33
3.2	Comparação aproximada das escalas de dureza.	35
3.3	Representação das ferramentas de corte estudadas.	36
3.4	Amostra: a) WC-Co; b) WC-Co revestido com TiAlN (AA) de alto teor de alumínio e c) WC-Co revestido com TiAlN (BA) de baixo teor de alumínio.	37
3.5	Numeração das pontas da ferramenta de corte.	38
3.6	Micrografias das ferramentas de corte revestidas: (a) TiAlN (AA) e (b) TiAlN (BA).	38

3.7	Padrões de difração de raios-X de revestimentos ternários e substratos. .	39
3.8	Maquina ótica OLM 3020.	41
4.1	Etapas dos procedimentos experimentais.	44
4.2	Indentação da microdureza na ferramenta de corte.	47
4.3	Indentação na ferramenta de corte.	47
4.4	Geometria	50
4.5	(a) Contraponto desalinhado com a ferramenta	51
4.6	Usinagem com ângulo de posição a 45°.	53
4.7	Definição dos parâmetros de corte.	54
4.8	Parâmetros de corte adotados.	55
4.9	Parâmetros de corte do WC-Co.	56
4.10	Parâmetros de corte do TiAlN (AA).	56
4.11	Parâmetros de corte do TiAlN (BA).	57
4.12	Fluxograma da avaliação do desgaste	58
4.13	Imagem do desgaste da pastilha obtida pelo OLM 3020.	59
4.14	Melhor foco para a área selecionada.	60
4.15	Procedimento para se obter a profundidade.	60
4.16	(a) Imagem da Ponta 2 da pastilha TiAlN (AA) depois da função PseudoColor.	62
4.17	Representação esquemática da relação das coordenadas (x, y) com os pixels das imagens.	63
4.18	Representação esquemática da área da pastilha.	63
4.19	Representação das coordenadas (x, z) esquematizando a área desgastada na pastilha.	64

4.20 Pontas de cada Ferramenta de Corte.	65
4.21 Procedimentos no editor de imagens.	66
4.22 Representação esquemática referente a área da cratera.	66
4.23 Representação esquemática referente a área deslocada.	67
4.24 Etapas de Edição de Imagens da Pastilha para o Wolfram.	67
4.25 Cálculo da área total da imagem (AT).	68
4.26 Imagem da pastilha subdividida por áreas.	72
5.1 (a) FF polido depois do primeiro ataque com o Vilela.	73
5.2 Microdureza com carga de 1kgf em função da localização.	74
5.3 Microdureza com variação de carga 1 kgf e 0,5 Kgf	75
5.4 Ângulos das pontas das pastilhas.	76
5.5 Raios das pontas das pastilhas.	76
5.6 Espessura das pastilhas.	76
5.7 Comparativo do desgaste de cratera na superfície de saída das três ferramentas de corte WC-Co, WC-Co revestida com TiAlN (AA) e WC-Co revestida com TiAlN (BA) depois da usinagem.	78
5.8 Comparativo do desgaste de cratera com variação de cor de acordo com a profundidade das três ferramentas de corte WC-Co, WC-Co revestida com TiAlN (AA) e WC-Co revestida com TiAlN (BA) depois da usinagem.	79
5.9 Comparativo do tratamento de imagens do desgaste de cratera da ferramenta de corte WC-Co sem revestimento depois da usinagem.	80
5.10 Comparativo do tratamento de imagens do desgaste de cratera da ferramenta de corte WC-Co revestida com TiAlN (AA) depois da usinagem.	81

5.11 Comparativo do tratamento de imagens do desgaste de cratera da ferramenta de corte WC-Co revestida com TiAlN (BA) depois da usinagem. .	82
5.12 Áreas de desgaste em mm obtidas pelo Wolfram e a porcentagem da área de cratera e área de deslocamento com relação a área desgastada total comparação de desempenho das ferramentas.	84
5.13 Áreas de desgaste em mm obtidas pelo Wolfram e a porcentagem da área de cratera e área de deslocamento com relação a área desgastada total para análise de desempenho das ponta de cada ferramenta de corte.	85
5.14 Comparativo das pontas do WC-Co sem revestimento com escala de profundidade.	87
5.15 WC-Co Volume.	87
5.16 Comparativo das pontas do TiAlN (AA) com escala de profundidade. .	88
5.17 TiAlN (AA) Volume.	88
5.18 Comparativo das pontas do TiAlN (BA) com escala de profundidade. . .	89
5.19 TiAlN (BA) Volume.	89
5.20 Taxa de desgaste de cratera por regressão linear.	91
7.1 Etapas de Edição de Imagens da Pastilha WC-Co para o Wolfram.	105
7.2 Etapas de Edição de Imagens da Pastilha TiAlN (AA) para o Wolfram. .	106
7.3 Etapas de Edição de Imagens da Pastilha TiAlN (BA) para o Wolfram. .	107

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	1
1.1	Motivação da Pesquisa	1
1.2	Objetivos	4
1.2.1	Objetivo Geral	4
1.2.2	Objetivos Específicos	4
1.3	Organização da Dissertação	5
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	7
2.1	Ferro Fundido Nodular	7
2.2	Desgastes de Ferramentas de Corte	10
2.3	Mecanismos Causadores do Desgaste nas Ferramentas de Corte	14
2.3.1	Difusão	16
2.3.2	Abrasão Mecânica ou Deformação Plástica	17
2.3.3	Oxidação	18
2.3.4	Adesão	18

2.4	Desgaste e Vida da Ferramenta	19
2.5	Materiais da ferramenta de corte	20
2.5.1	Metal Duro	21
2.5.2	Revestimento para Ferramentas	23
2.6	Fundamentos do Processo de Usinagem	27
2.7	Técnicas de Avaliação do Desgaste de Cratera	31
2.7.1	Perfilometria	31
2.7.2	Microscopia Óptica e Tratamento de Imagem	31
3	MATERIAIS E EQUIPAMENTOS	33
3.1	Peça de Ferro Fundido	34
3.2	Pastilhas de WC-Co e Pastilhas Recobertas	34
3.3	Torno Mecânico	40
3.4	Máquina Óptica OLM 3020 e VMS 3.1	40
3.5	Softwares de tratamento de imagem	41
4	METODOLOGIA	43
4.1	Caracterização da Peça de Ferro Fundido	43

4.2	Caracterização das Ferramentas de Corte	46
4.3	Usinagem	51
4.4	Avaliação do desgaste	58
4.4.1	Aquisição de Imagens	58
4.4.2	Tratamento de Imagens (MetaVision)	61
4.4.3	Quantificação da área desgastada (Wolfram)	62
5	RESULTADOS E DISCUSSÕES	73
5.1	Caracterização da peça	73
5.2	Microdureza das Pastilhas e Recobrimentos	74
5.3	Geometria das Ferramentas	75
5.4	Microscopia Ótica das áreas desgastadas	77
6	CONCLUSÕES	93
7	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	96

1 INTRODUÇÃO

1.1 Motivação da Pesquisa

Metal duro já é muito utilizado na usinagem para aços comuns de dureza mediana. Usa-se, atualmente, um recobrimento binário de TiN. Porém, já vem sendo estudado uma nova classe de recobrimentos ternários, como por exemplo, TiAlN. Segundo MACHADO et. al. (2011), os metais duros podem receber recobrimentos pelo processo de deposição química a vapor, do inglês Chemical Vapour Deposition (CVD) tanto como pelo processo de deposição física a vapor ou Physical Vapour Deposition (PVD) aplicados em substratos de qualquer classe de metal duro. As ferramentas do estudo em questão são feitas de metal duro, tendo como base o carboneto de tungstênio (WC) e o cobalto (Co). Conforme Diniz et. al, (2006) a espessura total das camadas que recobrem o metal duro varia entre 2 a 20 μ m. Quando se aumenta a espessura da cobertura, a resistência ao desgaste aumenta, mas a tenacidade diminui e começa a tendência ao lascamento das arestas. O processo de CVD faz com que o substrato tenha espessura maior que 5 μ m. A camada de TiAlN depositada por PVD tem espessura sempre me-

nor que 5 μ m, o que proporciona as vantagens de tenacidade. E também, o processo de PVD propicia que se tenham coberturas mais finas e assim arestas mais afiadas, o que é importante quando se deseja melhores acabamentos superficiais e/ou quando se usa materiais dúcteis. Outra vantagem do PVD diz respeito à temperaturas entre 400°C e 500°C, temperaturas estas que não prejudicam o tratamento térmico já realizado no substrato. As técnicas de deposição por PVD podem produzir recobrimentos com diferentes concentrações de Ti e Al em virtude da metodologia utilizada na evaporação dentro da câmara a vácuo. Dependendo se houver mais alumínio ou titânio na cobertura, o Nitreto de Titânio-Alumínio (TiAlN), pode ser descrito como de alto teor de alumínio ou TiAlN (AA) e de baixo teor de alumínio ou TiAlN (BA). Estas variações mudam as fases presentes no recobrimento e conseqüentemente seu desempenho na usinagem. Esses recobrimentos ternários de TiAlN, segundo DINIZ et. al (2006), possuem as seguintes características:

- Maior resistência a oxidação, o que permite o uso de temperatura mais altas, quando esse material oxida (principalmente o TiAlN com um alto teor de Al), forma uma camada de Al₂O₃, que é inerte quimicamente e por isso muito resis-

tente a difusão e a oxidação;

- Baixa condutividade térmica, o que protege a aresta de corte e aumenta a remoção de calor através do cavaco;
- Alta dureza à frio e à quente, a camada de TiAlN (BA) possui dureza similar as camadas de TiN, TiCN e TiC, e a camada de TiAlN (AA) pode atingir dureza 1,5 vezes maior que destas camadas;
- Alta estabilidade química, o que reduz bastante o desgaste de cratera.

Neste trabalho faz-se um estudo comparativo no desempenho dos revestimentos de TiAlN, com seus diferentes teores de Al, no torneamento tradicional de uma peça circular metálica para analisar o desgaste das ferramentas de corte.

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo Geral

Esse trabalho tem como objetivo avaliar a evolução dos desgastes encontrados no torneamento com ferramentas de metal duro, comparando-se três pastilhas com o mesmo substrato. Uma sem revestimento (WC-Co) e as outras duas com revestimento de TiAlN com dois teores diferentes de Al.

1.2.2 Objetivos Específicos

1. Caracterizar a peça a ser utilizada na usinagem, mediante metalografia e determinação da dureza Rockwell;
2. Avaliar a dureza das ferramentas e recobrimentos (microdureza Vickers);
3. Avaliar o desempenho das ferramentas em testes de usinagem, identificando o melhor desempenho entre elas;

4. Avaliar os desgastes das ferramentas, utilizando principalmente a microscopia óptica e software que auxiliam no tratamento, edição e medição das imagens;

1.3 Organização da Dissertação

O presente trabalho pretende ser desenvolvido em 7 capítulos, descrevendo-se a seguir o conteúdo dos mesmos. No Capítulo 1 apresenta-se a parte introdutória do trabalho, descrevendo-se, ainda, o tema, a motivação da dissertação e os objetivos gerais e específicos, assim como as hipóteses básicas do presente trabalho. No Capítulo 2, que diz respeito à revisão bibliográfica, apresentam-se os conhecimentos, formulações e ferramentas básicas para o desenvolvimento do estudo em questão. No Capítulo 3, referente a alguns materiais e equipamentos onde possui uma descrição dos materiais e os principais equipamentos e software usados durante o decorrer da pesquisa. No Capítulo 4 apresenta-se as metodologias existentes sobre o tema, bem como considerações gerais relacionados em como este trabalho foi conduzido na parte experimental. No Capítulo 5 apresenta-se uma análise de imagens relacionado à evolução do desgaste em ferramentas de corte e os resultados da pesquisa e discussão dos mesmos. No Capítulo 6

apresentam-se as conclusões sobre o estudo em questão. Finalmente, no Capítulo 7
apresentam-se as sugestões para trabalhos futuros.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Ferro Fundido Nodular

O parâmetro que determina a seleção da matéria-prima compatível com as ferramentas de corte é a dureza, pois o desgaste de ferramentas está relacionado com a dureza do material a ser usinado. (ADESTA et. al., 2010).

Estudos realizados por Silva (2008) concluiu que os tratamentos de têmpera e o revenimento do aço H13 aumentaram a sua resistência ao desgaste, devido ao aumento da dureza. A elevação de dureza resultante destes tratamentos térmicos aumentou a profundidade de endurecimento dos conjugados compostos pelo aço temperado, o que influenciou o desempenho em desgaste, nas condições testadas. Assim, a dureza do substrato foi um fator fundamental no desgaste dos conjugados testados.

ÁVILA et al. (2008) usinaram um aço AISI 4340 endurecido de dureza de 30 HRC para analisar desgaste de ferramentas nas pastilhas K10 de metal duro (WC-Co 6%).

Conforme estudos também realizados por ÁVILA et al. (2013), o ferro fundido FE 45012 de dureza de 200 HB em forma de cilindro com diâmetro de 100mm e compri-

mento de 300mm foi usinado para analisar desgaste de ferramentas nas pastilhas K10 e obtiveram sucesso na visualização dos desgastes.

SILVA et al. (2011) estudaram o desgaste de ferramentas P40 utilizando o aço AISI 1047 de dureza 25 HRC. Para esta dissertação, a escolha do ferro fundido foi feita em virtude do material apresentar dureza elevada compatível com a ferramenta de corte para o desbaste.

O processo de fundição continua consiste em fundir e conformar o produto final numa única operação, eliminando tempos intermediários de esfriamento em moldes, garantindo controle e constância de propriedades físicas e geométricas de cada produto (TUBOAÇOS, 2015).

Groover (2014) indica que o ferro fundido é uma liga ferrosa contendo, usualmente, entre 2,1% e 4% de carbono e entre 1% e 3% de silício. Essa composição torna a liga bastante adequada ao uso em fundição. A quantidade total de ferro fundido produzido é, dentre os metais, superada apenas pelo aço.

Os ferros fundidos nodulares podem ser aplicados na produção de buchas e tubos para adução de água, hastes de válvulas, válvulas e corpos de bombas, em serviços de

petróleo, água salgada e ambiente cáustico; tubos de escapamento, carcaças de turboalimentadores; componentes e compressores de ar. Chiaverini (2002) aponta que há ainda uma classe para navios, utilizados para resistência a corrosão, ao calor e ao choque, em hélices e aplicações diversas em navios.

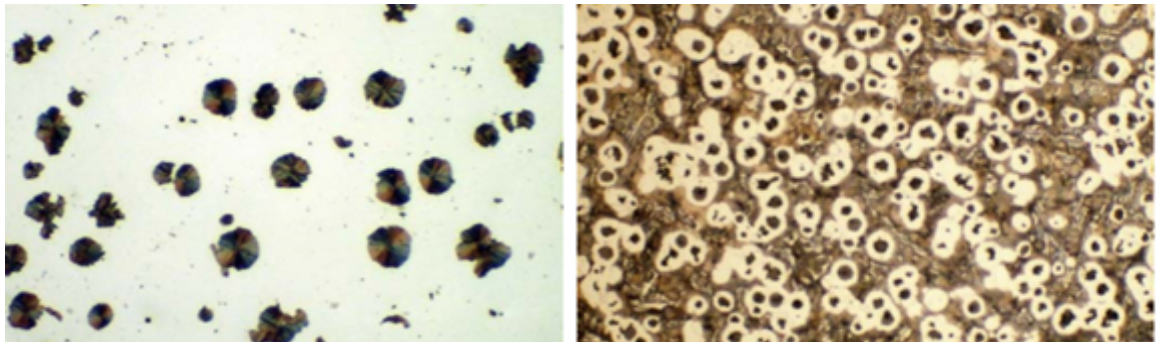
Existem vários tipos de ferro fundido o ferro fundido cinzento, o maleável, o branco e o nodular. O Ferro Fundido Nodular tem a composição do ferro fundido cinzento, mas o metal fundido é tratado quimicamente antes do vazamento para produzir nódulos de grafita em vez de veios. Isso resulta em um ferro fundido mais resistente e mais dúctil. Groover (2014) também afirma que suas aplicações incluem componentes de máquinas que requeiram alta resistência e boa resistência ao desgaste.

O ferro fundido nodular FUCO® FE 55006 possui grafita em uma matriz ferrítica e perlítica com aproximadamente 45% de perlita, podendo ter no máximo 5% de carbonetos dispersos. Esta matriz proporciona elevadas propriedades mecânicas, bom acabamento superficial e boa temperabilidade, permitindo sua utilização em peças que requeiram alta resistência à tração e/ou desgaste. Esse ferro fundido foi o material da peça metálica utilizada no processo de usinagem e fora adquirida com 300mm de

comprimento e 100mm de diâmetro na empresa TUBOAÇOS.

De acordo com PADILHA (2000) os ferros fundidos são tipicamente caracterizados pela sua nodularidade (ferro fundido dúctil) ou por seus flocos de grafite (ferro fundido cinzento). Para produzir ferros fundidos dúcteis, adiciona-se o magnésio ou o cério para derreter com o ferro antes da solidificação. A análise transversal é utilizada para caracterizar a massa fundida antes de derramar todo o lote. A Figura 2.1 ilustra tanto o ferro fundido nodular polido quanto o ferro fundido nodular com ataque químico.

Figura 2.1: (a) Ferro fundido nodular polido. (b) Ferro fundido nodular com ataque químico.



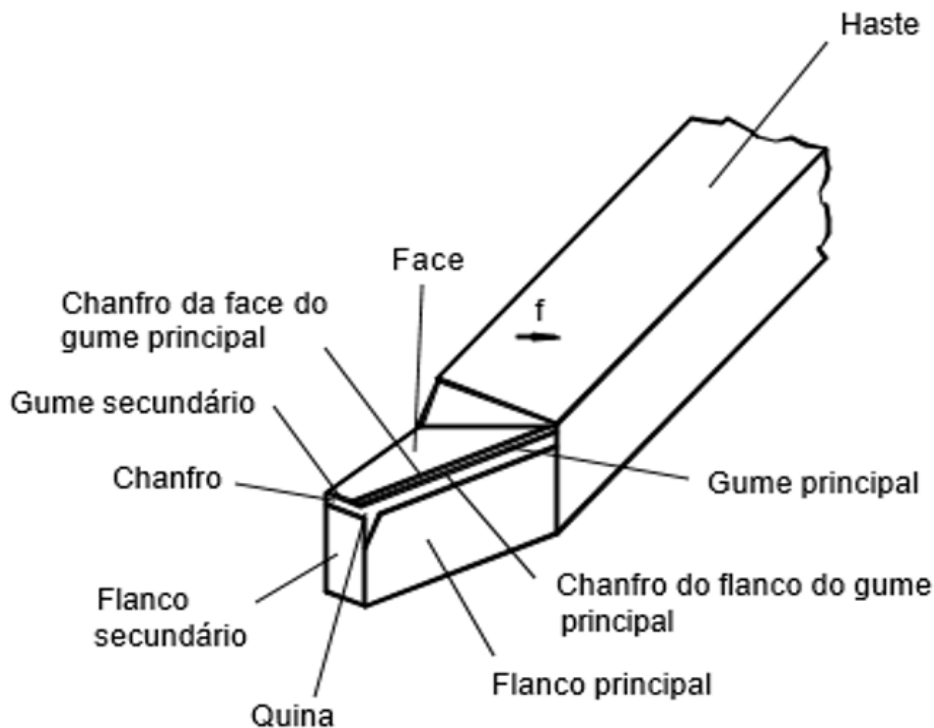
Fonte: PADILHA (2000).

2.2 Desgastes de Ferramentas de Corte

Os termos, a denominação e a designação da geometria da cunha, são normalizadas pelas normas DIN 6581 e ISO 3002/1. A Figura 2.2 indica uma ferramenta básica de

corte, conhecida como bite utilizada no torneamento, onde a mesma deve ser afiada antes do seu uso pois essa ferramenta é comercializada em forma de barra de seção transversal retangular. Suas principais variações geométricas são ilustradas de uma forma didática explicitando superfícies, gumes, chanfros e quinas.

Figura 2.2: Esquema representativo de uma ferramenta com geometria definida.



Fonte: DIN 6581.

Por outro lado, a Figura 2.3 ilustra uma ferramenta de corte mais avançada que dispensa a afiação, portanto, pode ser mais dura e está pronta para o uso, pois utiliza-se uma pastilha de corte parafusada a uma de suas extremidades na qual pode ser substituída quando desgastada. Devido às suas vantagens e por possuir tecnologia avançada, essa ferramenta foi escolhida para o desenvolvimento do presente trabalho.

Segundo Sá (2010), durante o processo de usinagem dos metais, ocorre o contato físico da ferramenta com a peça e o contato do cavaco com a ferramenta, em um determinado meio e condições dinâmicas de corte. Isto conseqüentemente acarretará

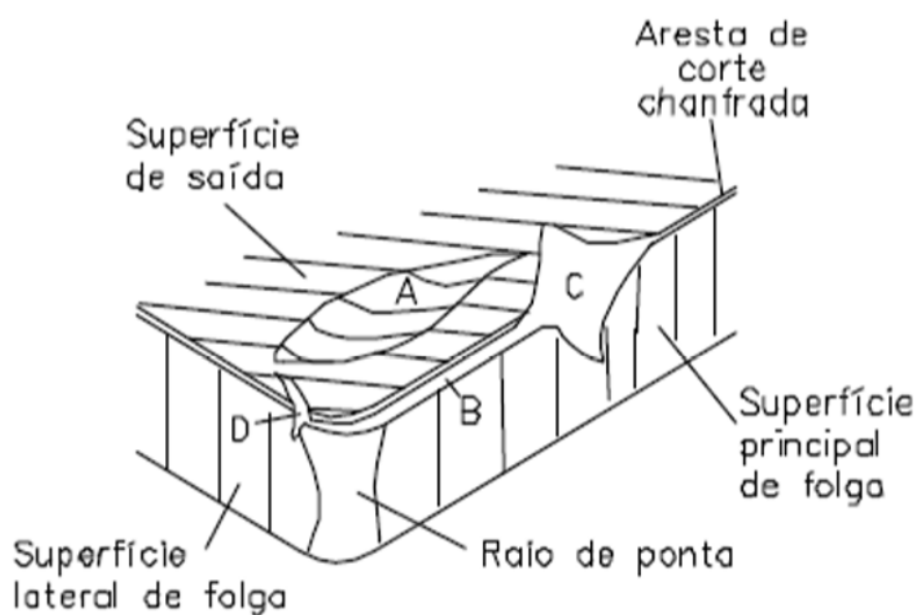
Figura 2.3: Pastilha de metal duro e parafuso de fixação.



Fonte: DIN 6581.

mudanças na geometria e na forma original da aresta de corte da ferramenta, devido à ocorrência de desgaste progressivo. A Figura 2.4 demonstra as principais áreas de desgaste de uma ferramenta de corte.

Figura 2.4: Principais áreas de desgaste de uma ferramenta de corte.



Fonte: TRENT et al. (2000).

De acordo com König et. al. (1999) a ferramenta de corte é solicitada termicamente e mecanicamente durante a usinagem. Como nem o material da peça, nem o material da ferramenta são homogêneos, uma série de avarias e desgastes de naturezas distintas

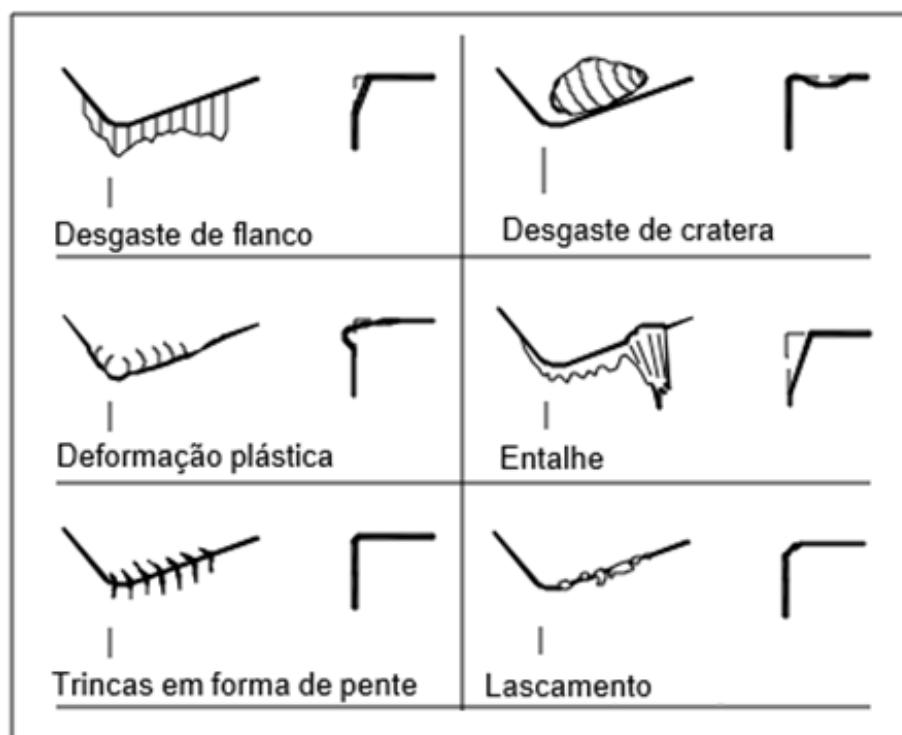
pode ser observada na ferramenta de corte ao longo de sua utilização. Para evitar que ocorra o colapso total da ferramenta é fundamental que sejam estipulados limites para as avarias e para os desgastes de flanco e cratera. A Figura 2.5 ilustra os principais problemas encontrados nas ferramentas de corte.

- Desgaste de flanco;
- Desgaste de cratera;
- Deformação plástica do gume;
- Desgaste de entalhe;
- Fissuras transversais, longitudinais ou em forma de pente;
- Lascamento.

Desgaste de cratera

Desgaste de cratera ocorre na superfície de saída da ferramenta originado pelo atrito entre ferramenta e cavaco conforme ilustrado na Figura 2.6. O crescimento do desgaste de cratera resulta na quebra da ferramenta, quando esse se encontra com o desgaste de flanco evoluído. Este tipo de desgaste ocasiona deterioração do acabamento superficial da peça e, por modificar totalmente a forma da aresta de corte original, faz com que a peça mude de dimensão, conforme pode ser visto em Almdeida, (2010).

Figura 2.5: Tipos de avarias e desgaste nas ferramentas de corte.



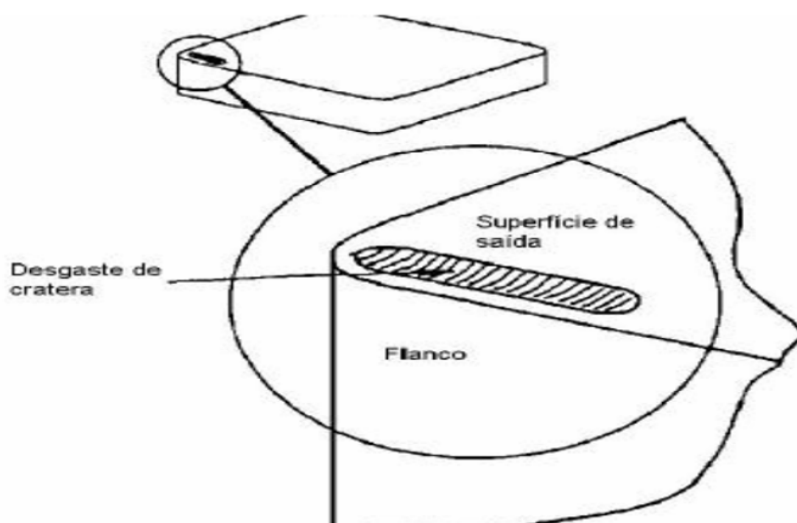
Fonte: adaptado de (MARKUS, 2001).

2.3 Mecanismos Causadores do Desgaste nas Ferramentas de Corte

O desgaste de uma ferramenta de metal duro é o resultado da ação de vários fenômenos distintos, denominados mecanismos de desgaste. Dependendo da natureza do material usinado e das condições de usinagem, predominará uma ou outra das componentes do desgaste sobre as demais (FERRARESI, 1977). Devido às solicitações térmicas e mecânicas elevadas, o desgaste da ferramenta se desenvolve relativamente rápido. Diversos são os mecanismos causadores de desgaste que agem simultaneamente na ferramenta, em alguns casos não é possível de serem distinguidos entre si, conforme estudos indicados por KÖNIG (1999).

É considerado como mecanismo de desgaste todo fenômeno distinto capaz de provocar ou causar um desgaste de uma ferramenta de corte. A difusão, abrasão, oxidação

Figura 2.6: Representação esquemática de cratera na superfície de saída da ferramenta de corte.

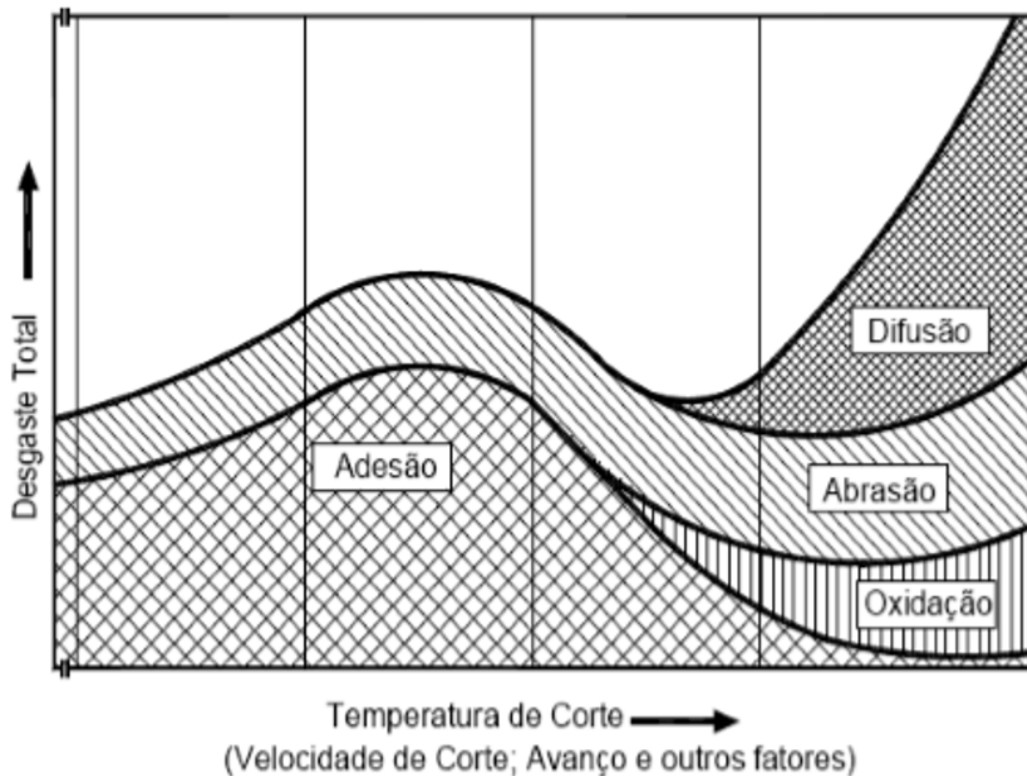


Fonte: TELES (2007).

e adesão são mecanismos que promovem desgastes através de deformação plástica por cisalhamento, ocorridos na usinagem de metais com alto ponto de fusão em ferramentas de aço rápido. Ocorre também a deformação por altas tensões de compressão ou entalhe cujo processo ocorre na usinagem dos materiais de alta dureza (TRENT et al., 2000). Na Figura 2.7 são mostradas as causas de desgastes na usinagem.

No diagrama da Figura 2.7, os mecanismos de adesão, difusão, abrasão e oxidação são apresentados em função da temperatura de corte ou de qualquer parâmetro que a influencie, principalmente a velocidade de corte. Em baixas temperaturas somente os mecanismos de abrasão e adesão estão presentes e a adesão é predominante. Enquanto em temperaturas elevadas a adesão perde lugar para novos mecanismos de adesão e de difusão e oxidação. Observa-se que esses dois mecanismos vão crescendo em participação com o aumento da temperatura, e que a difusão cresce numa escala exponencial. Machado (2011) assevera que esse diagrama também salienta que o desgaste total cresce muito com o aumento da temperatura de corte.

Figura 2.7: Causas de desgaste na usinagem.



Fonte: MACHADO et. al. (2011).

2.3.1 Difusão

Segundo Ferraresi (1977), a difusão entre ferramenta e cavaco é um dos fenômenos microscópios ativados pela temperatura na zona de corte. A difusão no estado sólido consiste na transferência de átomos pertencentes à rede cristalina de um material para a rede cristalina de outro, constituídos de elementos que apresentam afinidades entre si. Estas reações químicas, no caso do metal duro, formam carbonetos complexos (Fe WC_{26}), que são menos resistentes e são rapidamente removidos por abrasão. A difusão é responsável principalmente pelo desgaste de cratera em altas velocidades de corte, já que é na superfície de saída da ferramenta que se têm condição necessária para a difusão, isto é, alta temperatura e tempo de contato cavaco-ferramenta.

O processo de difusão é um fenômeno microscópico ativado pela temperatura na zona de corte. É um processo característico de altas velocidades, responsável pelo desgaste da cratera. A difusão do estado sólido consiste na transferência de átomos de um metal a outro. Depende da temperatura, da duração do contato e da afinidade física química dos dois metais envolvidos. As temperaturas associadas ao desgaste difusivo situam-se em torno de 850°C a 1200°C que não promove a fusão do material, conforme pode ser visto em TRENT (2000).

2.3.2 Abrasão Mecânica ou Deformação Plástica

A abrasão mecânica é uma das principais causas de desgastes da ferramenta. O desgaste frontal e o desgaste de cratera podem ser gerados pela abrasão, porém, no desgaste frontal é mais intenso, já que a superfície de folga atrita com um elemento rígido que é a peça, enquanto que a superfície de saída atrita com um elemento flexível que é o cavaco. A abrasão mecânica é gerada pela presença de partículas duras no material da peça e pela temperatura de corte. Isto faz com que a dureza da ferramenta diminua, de acordo com estudos apontados por KRATOCHVIL (2004).

Machado (2011) assevera que mecanismos como a abrasão são dados como uma das principais causas de desgaste da ferramenta, tanto o frontal quanto o desgaste de cratera. Este desgaste é mais provável de ocorrer em baixas velocidades de corte tendo a peça alta dureza. Em ferramentas de metal duro, que possui quantidades muito grandes de carboneto de tungstênio (WC) em sua composição, o desgaste abrasivo é pouco eficiente no que diz respeito à degradação da ferramenta.

A deformação plástica da aresta de corte que ocorre na usinagem dos materiais de

alta dureza sob altas tensões de compressão, com altas temperaturas na superfície de saída podem causar a deformação plástica da aresta de corte das ferramentas de aço-rápido ou metal duro, isso ocorre a altas velocidades de corte e avanço, e levam a falha catastrófica, segundo aponta pesquisa de TRENT (2000).

2.3.3 Oxidação

Diniz et. al (2006) afirma que a oxidação ocorre em altas temperaturas e na presença de ar e água (contidas nos fluídos de corte), que geram oxidação para a maioria dos metais. O tungstênio e o cobalto formam durante o corte filmes de óxido porosos sobre a ferramenta, que são levados pelo atrito, gerando desgaste. Os materiais de ferramenta que não contém óxido de alumínio desgastam-se mais facilmente por oxidação. 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.

2.3.4 Adesão

A aderência é formada por duas superfícies metálicas que quando se trabalha durante a usinagem em velocidades relativamente baixas, onde duas superfícies metálicas são postas em contato sob cargas moderadas e baixas temperaturas, forma-se entre elas um extrato metálico que provoca aderência. O fenômeno da aderência está presente na formação da aresta postiça de corte e o contato com a ferramenta torna-se menos contínuo. Segundo Diniz (2006) a utilização adequada do fluido de corte principal-

mente, com efeito, lubrificante e o recobrimento da ferramenta de corte com materiais de baixo coeficiente de atrito, como nitreto de titânio, faz com que haja uma grande influência na diminuição desse tipo de desgaste.

2.4 Desgaste e Vida da Ferramenta

De acordo com Shaw (1984), por vida da ferramenta, compreende-se a quantidade de material removido por uma ferramenta sob determinadas condições de usinagem até o instante em que tal ferramenta se torne inoperante ou atinja níveis de desgaste incompatíveis à continuidade da operação.

Denomina-se vida de uma ferramenta o tempo que a mesma trabalha efetivamente (deduzido os tempos passivos), até perder a sua capacidade de corte, dentro de um critério previamente estabelecido, conforme indicado por FERRARESI (1977).

De acordo com Markus (2001) as grandezas avaliadas para definir a vida da ferramenta podem ser o tempo de corte, o volume de material cortado ou número de peças fabricadas. O fim da vida é detectável quando ocorre mudança em uma ou mais características do processo. Estas podem estar correlacionadas com mudanças no ruído, no acabamento superficial, na forma de cavaco, vibrações entre a peça e ferramenta, dentre outros. Quando se deseja determinar as curvas de vida de uma ferramenta para um determinado material, com uma precisão razoável, deve-se recorrer aos ensaios de usinagem de longa duração. Nestes ensaios, o gume da ferramenta trabalha em condições constantes de corte, sendo utilizado um critério de fim de vida de desgaste previamente fixado. A definição deste critério de desgaste exige que se conheça a sua forma e os mecanismos que regem seu surgimento.

Devido à grande implicância de seu desempenho na usinagem, mais especificamente no torneamento, é patente que a concepção de ferramentas de corte não é meramente uma questão de ângulos ou perfis em escalas macrométricas, mas também de inspeção e controle da forma de seu contorno em uma escala mais acurada, dentro de alguns micrometros, conforme encontrado em Ferraresi (1977).

2.5 Materiais da ferramenta de corte

Estudos realizados por Diniz (2007) apontam uma série de fatores na seleção do material da ferramenta de corte a ser utilizado, dentre eles a microestrutura do material a ser usinado, dureza e tipo de cavaco, processo de usinagem, condições da máquina operatriz, forma e dimensões da própria ferramenta, custo do material da ferramenta, condições de usinagem e características do material da ferramenta (alta dureza a quente, resistência ao desgaste, tenacidade, estabilidade química)

Da mesma forma que Almeida (2010) aponta que as ferramentas de aço carbono e baixa liga, são de custo mais baixo, maior disponibilidade, melhor usinabilidade, facilidade de têmpera, etc. O principal inconveniente dessas ferramentas é a redução da dureza, e, portanto, sua habilidade de operar como ferramenta de corte, em temperaturas relativamente baixas, em torno de 250°C. Os aços-rápidos são aços liga cujos elementos de liga principais são W, Mo, Cr, V, Co e Nb com boa tenacidade, elevada resistência ao desgaste e dureza a quente. Em algumas ferramentas de corte, como brocas, machos, alargadores e alguns tipos de fresas, a aplicação de materiais mais resistentes ao desgaste como metal duro ou cerâmico, é muito restrito devido a sua forma e dimensão. Assim, tem-se algumas ferramentas de aço rápido onde se busca algumas

melhorias, através da aplicação de uma camada de revestimento de um material mais resistente ao desgaste, como o TiN, TiC, aplicados pelos processos CVD (Chemical Vapour Deposition) e PVD (Physical Vapour Deposition).

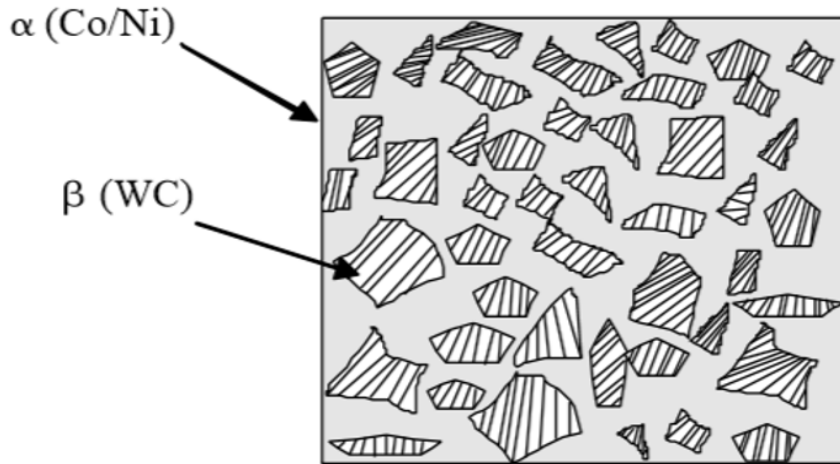
2.5.1 Metal Duro

No presente trabalho estuda-se o metal-duro que é um material de ferramenta desenvolvido inicialmente por volta de 1938, produto da metalurgia do pó, tendo como base o carboneto de tungstênio (WC) e geralmente o cobalto (Co). É o material para ferramenta mais importante utilizado na indústria moderna (STEMMER, 1995). O Carboneto de Tungstênio (WC-Co) é uma pastilha de pó de carbono-tungstênio e outros componentes, submetidos a uma compressão e calor determinado, processo que leva o nome de sinterização. Tem uma dureza, que pode chegar a 5% menor do que a do diamante, considerado o material mais duro conhecido na natureza. Graças a essa dureza, e ao fato de não necessitar de têmpera, apresenta um corte bastante durável e de alto rendimento, para ser empregada nas pontas das ferramentas das máquinas operatrizes, conforme encontrado em CUNHA (2006).

Segundo Diniz et. al. (2006) os metais-duros são materiais sinterizados com um ou mais metais do grupo do ferro (ferro, níquel, ou cobalto) constituídos de um ligante metálico (α) nos quais tem-se embutidos os carbonetos de metais refratários (β) feitos de partículas duras finamente divididas, conforme indicado na Figura 2.8.

A função do ligante é construir a ligação entre os carbonetos frágeis e oferecer tenacidade (ou capacidade de resistência ao choque). Os carbonetos por sua vez fornecem alta dureza a quente e resistência ao desgaste, formando assim um corpo relativamente

Figura 2.8: Constituintes presentes na estrutura do metal-duro.



Fonte: SANDVIK-COROMANT (2000).

resistente à compressão e de alta dureza. As partículas duras são de carboneto de tungstênio (WC) geralmente em combinação com outros carbonetos de titânio (TiC), tântalo (TaC) e nióbio (NbC). Este material de ferramenta combina dureza a alta temperatura e tenacidade, devido a sua variação de composição, isto é, pode-se ter metais duros de alta tenacidade, como também pode-se conseguir metais duros com alta resistência ao desgaste ou dureza a quente, conforme estudos realizados por DINIZ et. al. (2006).

Outra característica que são normalmente controladas, pois afetam a capacidade de corte do metal duro são a porosidade e a microestrutura. Ferramentas de metal duro podem usinar qualquer tipo de material, desde que sua dureza não ultrapasse 45HRc. Diniz (2006) também afirma que os metais duros com micro-grãos que tem características superiores aos metais duros convencionais têm sido utilizados na usinagem de aços mais duros que esse valor.

A norma ISO 513/2004 classifica os metais duros em grupos, designados pelas letras P, M, K e pode-se observar que uma ferramenta P30, por exemplo, é mais tenaz

que uma P10, mas menos resistente ao desgaste. Uma ferramenta K10, por ser mais resistente ao desgaste, é recomendada para acabamento de materiais de cavacos curtos (ferro fundido).

2.5.2 Revestimento para Ferramentas

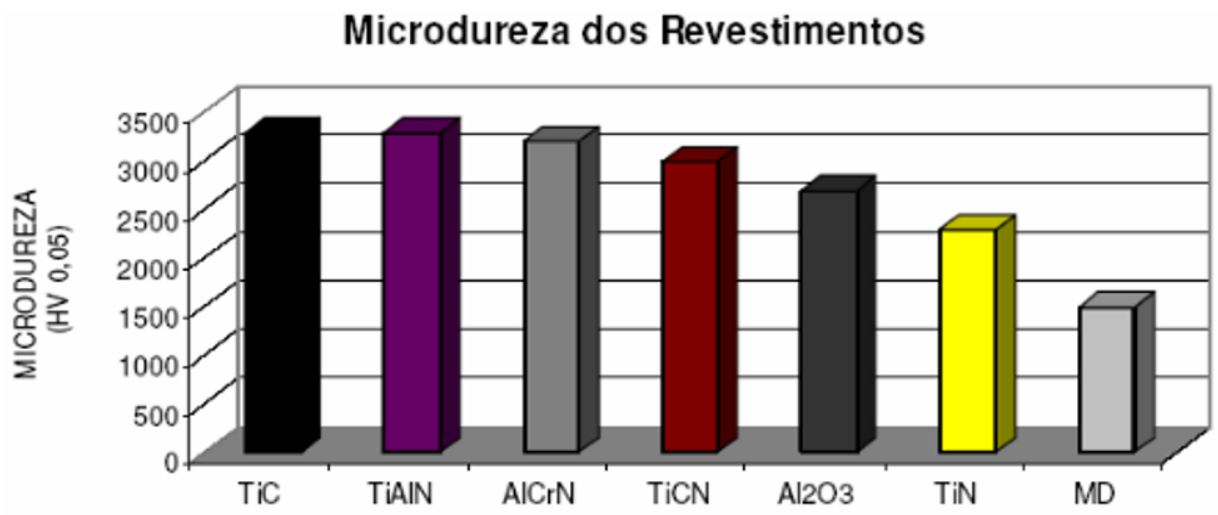
A importância dos revestimentos cresceu na indústria metal mecânica, em particular nas ferramentas de usinagem, em razão da proteção contra os desgastes abrasivo e adesivo, redução do atrito no corte, e possibilidade de corte a seco. Esses revestimentos podem ser de mono ou multicamadas, propiciando uma flexibilidade na seleção dos sistemas de acordo com as necessidades de cada aplicação. O sucesso dos revestimentos em ferramenta de corte resulta das propriedades mecânicas (dureza a quente, resistência ao desgaste e tensões compressivas) e físicas (estabilidade química, boa adesão, resistência à corrosão), tanto à temperatura ambiente quanto à temperaturas mais elevadas (BOUZAKIS et. al., 1999). Todas as ferramentas de corte podem ser revestidas, e este revestimento deve ser precedido de estudo técnico e econômico.

Obviamente que uma ferramenta revestida é bem mais cara que uma não revestida. Diniz (2006) indica que quando se leva em conta a vida útil da ferramenta é maior e que o tempo de corte é menor devido a possibilidade de aumentar a velocidade de corte e o avanço por isso o tempo de para a usinagem total de uma peça pode diminuir bastante, não só pelo de corte, mas também pela diminuição do número de paradas de máquina para a troca de ferramentas.

Os revestimentos comerciais usualmente utilizados em indústria de ferramenta para usinagem são carboneto de titânio (TiC) e óxido de alumínio (Al₂O₃) (processo

CVD), nitreto de titânio (TiN), carbonitreto de titânio (TiCN) (processos combinados PVD e CVD); nitreto de titânio alumínio (TiAlN) (processo PVD); nitreto de cromo alumínio (AlCrN). A Figura 2.9 apresenta a microdureza Vickers para as principais coberturas.

Figura 2.9: Microdureza Vickers dos principais revestimentos de ferramenta de corte.



Fonte: ABELE et. al. (2002).

O TiAlN, nitreto de titânio alumínio representa um grupo de revestimentos duros metaestáveis consistindo de elementos metálicos de alumínio e de titânio, e nitrogênio, depositado por PVD que apresenta uma estabilidade química superior àquela oferecida pelos revestimentos TiN e TiCN. O TiAlN é indicado para usinagem de materiais dúcteis, como é o caso do aço inoxidável austenítico, ou quando se deseja arestas de corte mais afiadas, conforme apontado por Diniz et. al. (2006). A espessura de camada obtida no PVD (até 5 μ m) é menor que aquela usualmente obtida com o CVD (de 5 a 20 μ m), o que confere uma aresta de corte mais afiada.

Estudos realizados por Manera, et. al. (2011) indicam que mesmo a ferramenta revestida de TiN fornecendo a menor energia específica de corte, esse resultado não se mostrou uma concordância. Para todas as outras análises realizadas, como rugosi-

dade, textura e desgaste da ferramenta, o revestimento de TiN se mostrou ineficiente na usinagem da liga Ti-6Al-4V, que tem uma composição química de 6% de alumínio, 4% de vanádio, 0,25% de ferro (no máximo), 0,2% de oxigênio (no máximo), e o restante titânio. Ainda na análise de energia específica de corte, concluiu-se também que a ferramenta revestida de TiAlN desempenhou seu papel de corte com alta solicitação (maiores valores de energia específica de corte), porém com bom desempenho, já que em todas as outras análises o revestimento se mostrou melhor. A ferramenta sem revestimento se mostrou mediana em todos os ensaios realizados. Pode-se adotar essa ferramenta como uma forma de avaliar o desempenho de outros tipos de revestimentos e condições de usinagem.

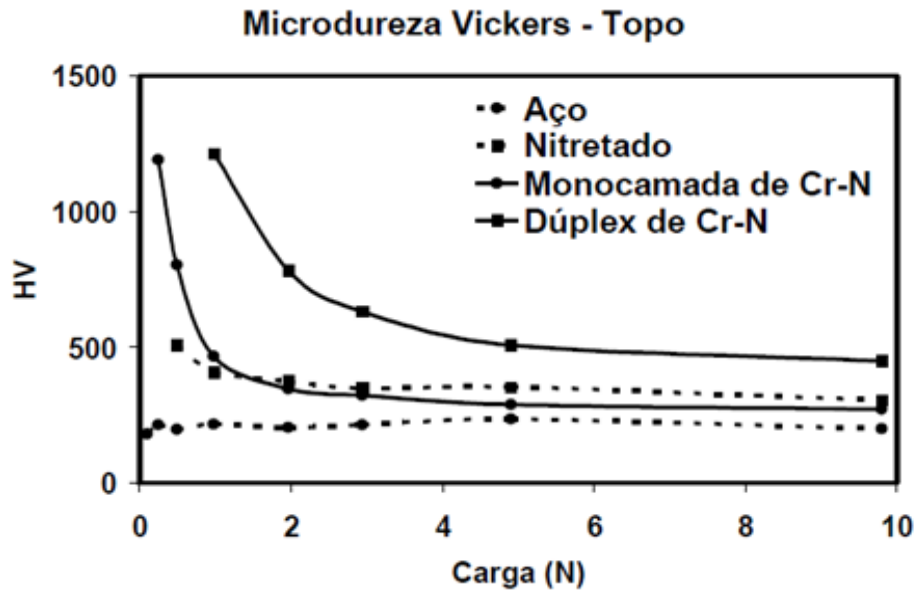
Observando o gráfico da Figura 2.10 pode-se notar a eficiência dos gráficos de dureza versus carga para a determinação das faixas de cargas adequadas medindo valores de dureza de recobrimentos finos produzidos por PVD. Onde as cargas menores aplicadas deram um melhor resultado do recobrimento, conforme estudo realizado por MANCOSU (2005).

O ensaio de dureza Vickers baseia-se na resistência a penetração do material utilizando uma pirâmide de diamante com base quadrada e ângulo entre faces de 136° sob uma determinada carga em forma de losango. Para calcular o valor de dureza Vickers é utilizado a seguinte Equação (2.1), conforme encontrado em COZACIUC, et. al. (2000).

$$HV = \frac{F}{A} \quad (2.1)$$

Onde: “HV” é o valor da dureza Vickers, “F” é a carga aplicada e “A” é a área de impressão. Todavia, é necessário utilizar um microscópio acoplado a ela para realizar a

Figura 2.10: Tendência de microdureza.



Fonte: MANCOSU (2005).

leitura das medidas das diagonais que são os vértices opostos da pirâmide. Como visto, essas medidas diagonais (d_1 e d_2) são necessárias para se obter a área da impressão, sendo que a área da pirâmide de base quadrada (A) pode ser calculada com a Equação (2.2) dada também por COZACIUC, et. al. (2000).

$$A = \frac{d^2}{2 \operatorname{sen}\left(\frac{136^\circ}{2}\right)} \quad (2.2)$$

De acordo com Batista (2011) a impressão em forma de losango definida em Kgf/mm^2 e é dada pela Equação (2.3), onde o valor da dureza Vickers está em função da carga e da área da superfície.

$$HV = \frac{1,8544 F}{d^2} \quad (2.3)$$

Cozaciuc (2000) também afirma que a microdureza Vickers envolve o mesmo procedimento prático que o ensaio de dureza Vickers. A diferença é apenas que o de

microdureza utiliza cargas menores que 1 Kgf. Uma desvantagem do método de microdureza Vickers é que, quando se usa pequenas cargas pode haver recuperação elástica do material ensaiado o que pode resultar dificuldades na medida das diagonais.

Da mesma forma Batista (2011) assevera que as aplicações da microdureza são mais específicas para ensaios com superfície planas e polidas, como por exemplo, para o levantamento de curvas de profundidade de tempera, cementação ou outro tratamento superficial, para mensuração de dureza de microconstituintes individuais de uma microestrutura, determinação da dureza de materiais frágeis e de peças pequeníssimas e finas. O ensaio de microdureza pode ser aplicado em qualquer espessura do material, por esse motivo é o mais indicado para medir durezas superficiais.

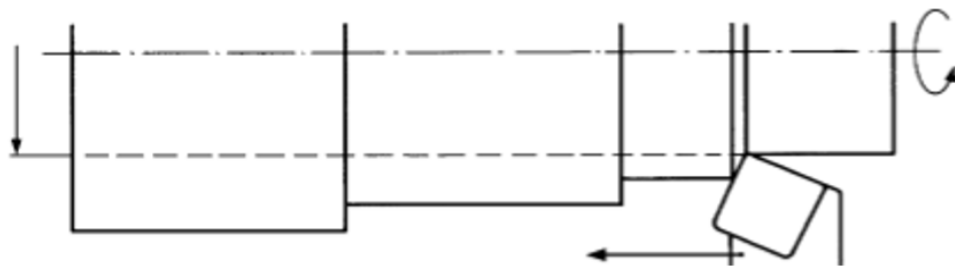
2.6 Fundamentos do Processo de Usinagem

Do Metals Handbook - Machining (1989), tem-se que a usinabilidade de um material, bem como outras propriedades de fabricação, são tão importantes como as propriedades mecânicas. Na verdade, a usinabilidade descreve genericamente as características operacionais da ferramenta de corte. Segundo Peckener (1977), a usinabilidade de um material metálico é influenciada por vários fatores tais como: composição química, microestrutura, resistência do material, avanço utilizado na usinagem, velocidade de corte, penetração e escolha do fluido de corte. Há três aspectos que caracterizam, por assim dizer a usinabilidade, que são a vida da ferramenta, acabamento superficial e esforços requeridos para o corte. Assim, a usinabilidade pode ser definida com auxílio de alguns critérios tais como vida e desgaste da ferramenta, acabamento superficial, remoção de cavaco, velocidade de corte e produtividade. A usinabilidade

também depende de variáveis do processo de usinagem, tais como rigidez da ferramenta, geometria e material da ferramenta, tipo do fluido de corte e tipo da operação de usinagem.

O processo de usinagem baseia-se na remoção do material utilizando como ferramenta um material mais duro e mecanicamente mais resistente que a peça (MACHADO, et al, 2011). A Figura 2.11 ilustra uma peça sendo usinada em que a peça cilíndrica metálica fica rotacionando em torno do seu próprio eixo enquanto a ferramenta avança da esquerda para a direita.

Figura 2.11: Representação esquemática da peça e ferramenta durante a usinagem.

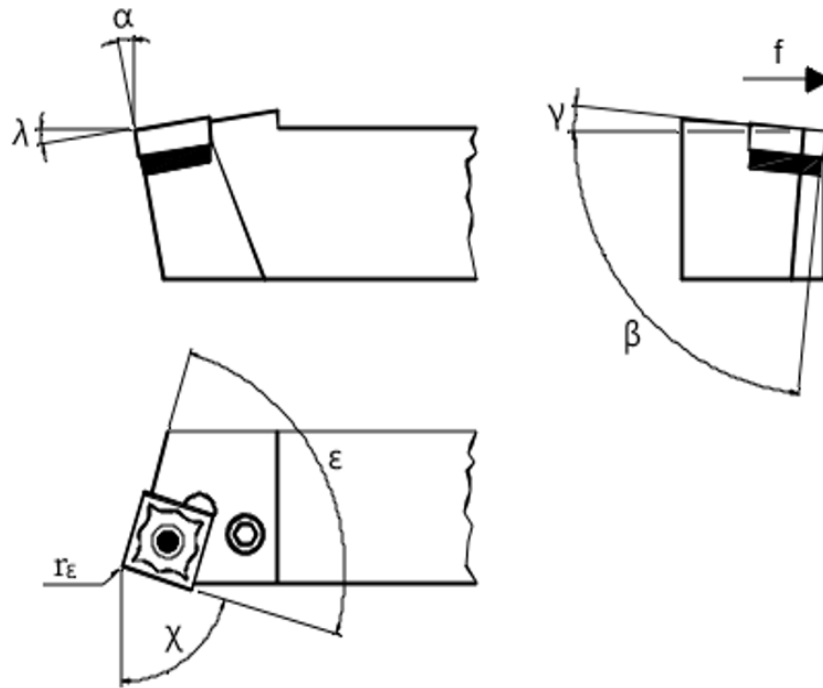


Fonte: KÖNIG et. al. (1999).

De acordo com König et. al. (1999), em todos os processos de usinagem com remoção de cavaco, as características do processo como formação de cavaco, saída do cavaco, força de corte, desgaste da ferramenta e o resultado do trabalho são influenciados consideravelmente pela geometria da ferramenta. Em decorrência deste fato é que a geometria da ferramenta deve ser adaptada ao material da peça, ao material da ferramenta e às condições específicas do processo. A parte cortante da ferramenta de corte é descrita por ângulos e raios, conforme mostrado na Figura 2.12.

Segundo Stemmer (1995) os ângulos da parte cortante servem para determinar a posição e forma do gume, da face e dos flancos. Ou, ainda, conforme descrito em Markus (2001) os ângulos na parte cortante são o de incidência α , cunha β , saída γ ,

Figura 2.12: Principais ângulos e raios da ferramenta de corte.



Fonte: MARKUS (2001).

direção do gume ou de posição χ , inclinação lateral λ e de quina ϵ , entre outros. Os raios são: raio de quina r_ϵ e raio do gume r_ρ .

Estudos indicados por König et. al. (1999) indicam que o ângulo de direção do gume χ é o ângulo entre a superfície de corte e a superfície de trabalho, medido na superfície de referência. Com a variação deste ângulo, tem-se uma maior ou menor largura de usinagem, que por sua vez influencia diretamente na dissipação do calor no gume da ferramenta. A alteração deste ângulo também provoca alterações principalmente nas forças de corte e passiva, esta última causando ainda problemas de vibrações regenerativas sobre a superfície da peça. O ângulo de quina ϵ é o ângulo entre a superfície do gume principal e do gume secundário, medido na superfície de referência. Serve para garantir uma boa estabilidade da ferramenta. Principalmente quando se trata de uma solicitação pesada, este deve ser escolhido o tão grande quanto

possível. O ângulo de inclinação lateral λ é o ângulo entre o gume e a superfície de referência, medidos na superfície de corte. Este ângulo possui as funções de controlar a direção de saída do cavaco, proteger a quina da ferramenta contra impactos e atenuar vibrações. Quanto mais negativo for este ângulo, maiores serão os valores da força passiva. O ângulo de cunha β é o ângulo entre o flanco principal e a face, medido na superfície de medição da cunha. A soma dos ângulos de incidência e de saída diminuído de 90° resulta no ângulo de cunha β . Com a variação deste ângulo, tem-se uma variação na estabilidade da ferramenta.

De acordo com Stemmer (1995) o ângulo de incidência α é o ângulo entre o flanco e a superfície de corte, medido na superfície de medição da cunha. A função do ângulo de incidência é evitar o atrito entre a superfície transitória da peça e o flanco da ferramenta e permitir que o gume penetre no material e corte livremente. Este ângulo também influencia consideravelmente a estabilidade da cunha.

König et. al. (1999) indica que o ângulo de saída γ é o ângulo entre a face e a superfície de referência, medido na superfície da cunha. Ele pode ser tanto positivo como negativo. O ângulo de saída é responsável pelo corte do material em questão. O ângulo γ influencia consideravelmente a estabilidade da cunha. Ferramentas demasiadamente positivas podem quebrar devido ao enfraquecimento da cunha. Como vantagens, de um ângulo de saída positivo, têm-se a diminuição da força de corte e força de avanço, bem como uma considerável melhora na qualidade da superfície da peça. O raio de quina r_ϵ é localizado na interseção do gume principal e secundário. Em conjunto com o avanço ele define a rugosidade cinemática do componente usinado. Este também influencia nas vibrações, estabilidade do gume e forças passivas. O raio de gume ρ define a capacidade de corte e a espessura mínima de usinagem.

2.7 Técnicas de Avaliação do Desgaste de Cratera

2.7.1 Perfilometria

O perfilômetro consiste em um aparelho usado na avaliação da topografia e da rugosidade de superfícies, com uma ponta (normalmente de diamante) que varre a área escolhida da amostra. A técnica de perfilometria foi utilizada para confirmar as regiões dos filmes finos produzidos e aferir o Tooling Factor utilizado durante a deposição. Na literatura, têm-se estudos mostrando que a profundidade, área e consequentemente o volume desgastados são determinados com precisão. Uma complicação nessa técnica é o tempo necessário para se varrer estas regiões e o processo de determinação que pode-se criar. (MANCOSU, 2005; ÁVILA, 2003)

2.7.2 Microscopia Óptica e Tratamento de Imagem

A avaliação de desgaste de ferramentas pode ser feita através imagens obtidas pela microscopia ótica com alguns recursos computacionais para tratar e quantificar essas imagens. O META VISION que consiste em um programa para tratamento de imagem. Esse software tem funções de edição e visualização de imagens, medição de morfometria, processamento de imagem, filtros de rotina, detecção de borda, dentre outros. O META VISION é adequado para uma ampla gama de funções de análise de imagem auxiliando a Metalografia e outras atividades como ferramenta fundamental na análise do desgaste de ferramentas do presente trabalho (MANCOSU, 2005; ÁVILA, 2003).

O Wolfram Mathematica é definido como sendo um programa do tipo de CAS

(Computer Algebraic System – Sistema Algébrico Computacional) ao lado de outros softwares também conhecidos, assim como, Maple, Máxima, Octave, MatLab, Mupad, etc. Esse software busca facilitar os cálculos em matemática simbólica agilizando e otimizando a velocidade dos cálculos de uma forma potencializada do que poderia realiza-los manualmente. Esse programa foi desenvolvido para ser uma linguagem de programação que possibilita sua adaptação ao usuário (FALCETTA, 2005).

3 MATERIAIS E EQUIPAMENTOS

Este capítulo trata dos materiais, equipamentos e softwares que foram utilizados durante a presente pesquisa.

A seleção da matéria prima e da ferramenta de corte depende dos seguintes parâmetros, conforme mostrado na Figura 3.1.

- Dureza e característica de composição da matéria prima;
- Tipo de ferramenta e sua geometria (ângulo de inclinação, raio da ponta, etc.);
- Condições de corte: avanço, profundidade de corte e velocidade de corte.

Figura 3.1: Efeitos dos diferentes parâmetros no desgaste de ferramenta.



Fonte: adaptado de (ADESTA et. al., 2010).

3.1 Peça de Ferro Fundido

O ferro fundido nodular FUCO® FE 55006 disponível comercialmente possui dureza adequada para usinagem das pastilhas em estudo, dispensando a necessidade do endurecimento para manter o mesmo padrão de dureza em qualquer diâmetro da peça sem intervenções de diferentes durezas afetado por tratamentos térmicos.

A compatibilidade com a ferramenta de corte também foi avaliada uma vez que a dureza das pastilhas de metal duro está na faixa de 70HRC para aço ferramenta, conforme mostrado na Figura 3.2, e a peça de FUCO® FE 55006 está com uma faixa de dureza inferior a 20 HRC de ferro fundido.

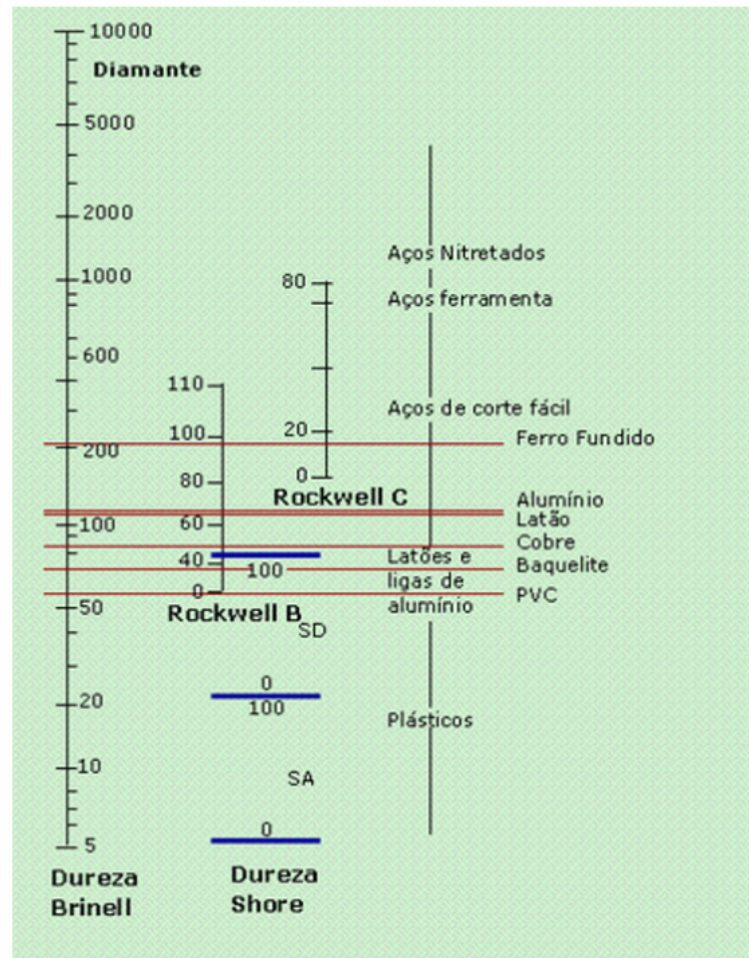
3.2 Pastilhas de WC-Co e Pastilhas Recobertas

O substrato das três pastilhas em estudo são comercialmente encontrados. Porém, dois recobrimentos de TiAlN do presente estudo foram produzidos por PVD em um laboratório especializado da TECVAC na Inglaterra com variações nas quantidades de alumínio e titânio.

Ávila (2003) encomendou várias pastilhas, com diferentes recobrimentos inovadores para o mercado, para avaliar o desempenho. Por esse motivo, ele conduziu vários testes com diferentes materiais da peça usinada e uma série de caracterizações nas pastilhas foram realizadas. No presente trabalho, o ferro fundido nodular FUCO® FE 55006, material da peça que ainda não havia sido testado, foi usinado para avaliar o desempenho das três ferramentas de corte.

O substrato das três pastilhas em estudo foi feito de carboneto de tungstênio em

Figura 3.2: Comparação aproximada das escalas de dureza.

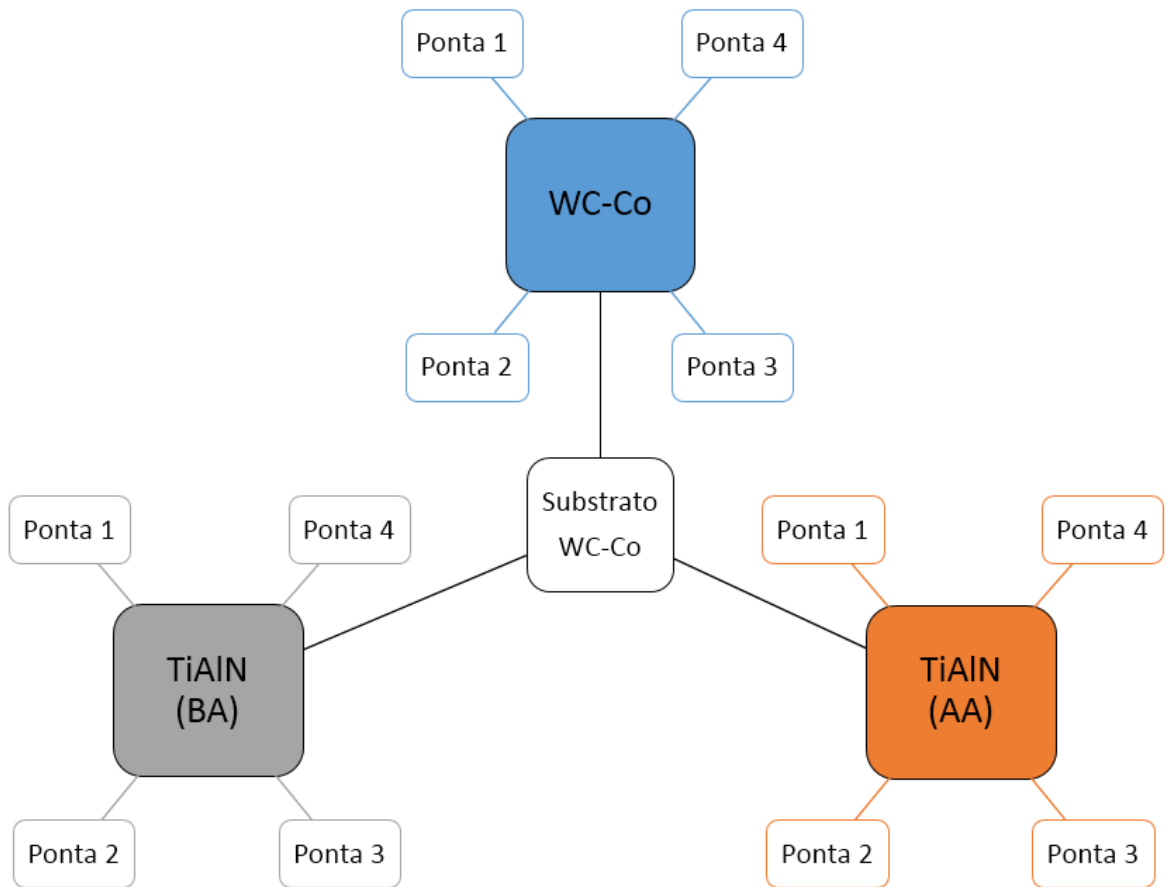


Fonte: CIMM (2015).

uma matriz de Cobalto (WC-Co). Para efeitos didáticos, uma pastilha que não possui revestimento foi chamada apenas de WC-Co. Duas pastilhas possuem revestimento de TiAlN. Sendo uma com alto teor de alumínio denominada (AA) e outra com baixo teor de alumínio denominada (BA), conforme esquematizado com essa nomenclatura na representação da Figura 3.3.

A Tabela 3.1 mostra as três pastilhas com a quantidade de alumínio e titânio em cada ferramenta. Sendo que a pastilha de TiAlN nomeada com alto teor de alumínio (AA) possui 62% de Al e 38% de Ti. Por outro lado, a pastilha de TiAlN nomeada com baixo teor de alumínio (BA) possui 29% de Al e 71% de Ti.

Figura 3.3: Representação das ferramentas de corte estudadas.



Fonte: Autora.

A Figura 3.4 mostra as fotos das três pastilhas em estudo, a WC-Co sem revestimento, a WC-Co revestido com TiAlN de alto teor de alumínio e WC-Co revestido com TiAlN de baixo teor de alumínio, respectivamente.

Conforme esquematizado na Figura 3.5, as arestas de corte foram identificadas com um risco na diagonal na Ponta 1 (P1) da face da pastilha a ser estudada. E a numeração segue gradativamente no sentido horário com Ponta 2 (P2); Ponta 3 (P3) e Ponta 4 (P4), respectivamente.

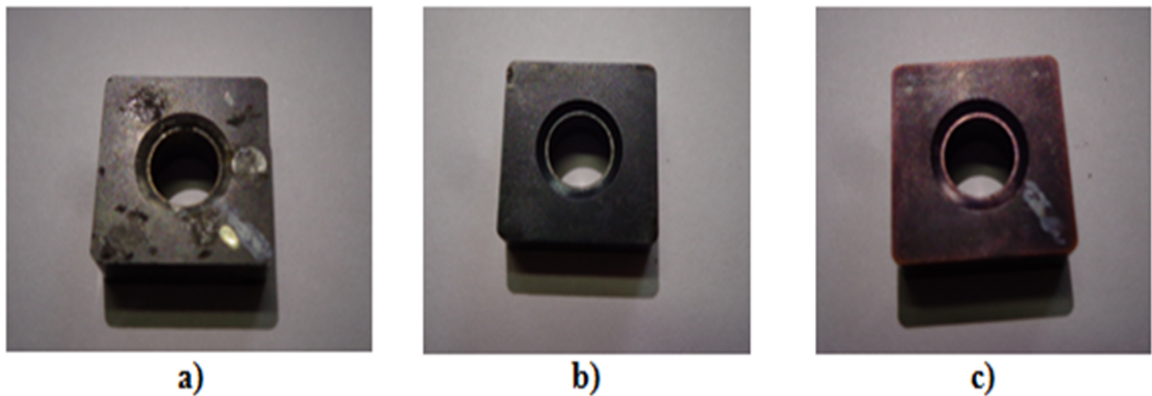
Cada ferramenta quadrada possui duas faces com quatro arestas de corte. Uma das faces das três pastilhas já havia sido desgastada, pois fora objeto de estudo na tese de

Tabela 3.1: Razão estequiométrica do conteúdo de titânio e alumínio.

Amostra	Substrato	Recobrimento
WC-Co	WC-Co 6%	-
WC-Co com recobrimento TiAlN(AA)	WC-Co 6%	$(Ti_{0,38}Al_{0,62})N$
WC-Co com recobrimento TiAlN(BA)	WC-Co 6%	$(Ti_{0,71}Al_{0,29})N$

Fonte: Autora.

Figura 3.4: Amostra: a) WC-Co; b) WC-Co revestido com TiAlN (AA) de alto teor de alumínio e c) WC-Co revestido com TiAlN (BA) de baixo teor de alumínio.

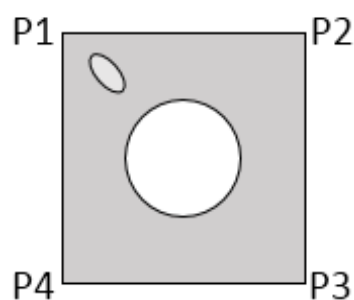


Fonte: Autora.

Ávila (2003), mas não foi utilizada no presente trabalho pois os parâmetros de geometria, materiais e condições de usinagem foram distintos dos quais foram realizados nesta pesquisa. As três pastilhas foram estudadas considerando uma face apenas com quatro arestas de corte de cada uma ferramenta. Portanto, ao todo foram estudadas neste trabalho 12 (doze) arestas de corte.

A caracterização das três pastilhas já havia sido feita por Ávila, et al. (2013) como uma análise no microscópio eletrônico de varredura (MEV) onde pode-se observar na Figura 4.2 que o revestimento está com uma boa adesão ao substrato. Além disso, pode-se observar que as espessuras são de aproximadamente $2 \mu m$ para o revestimento

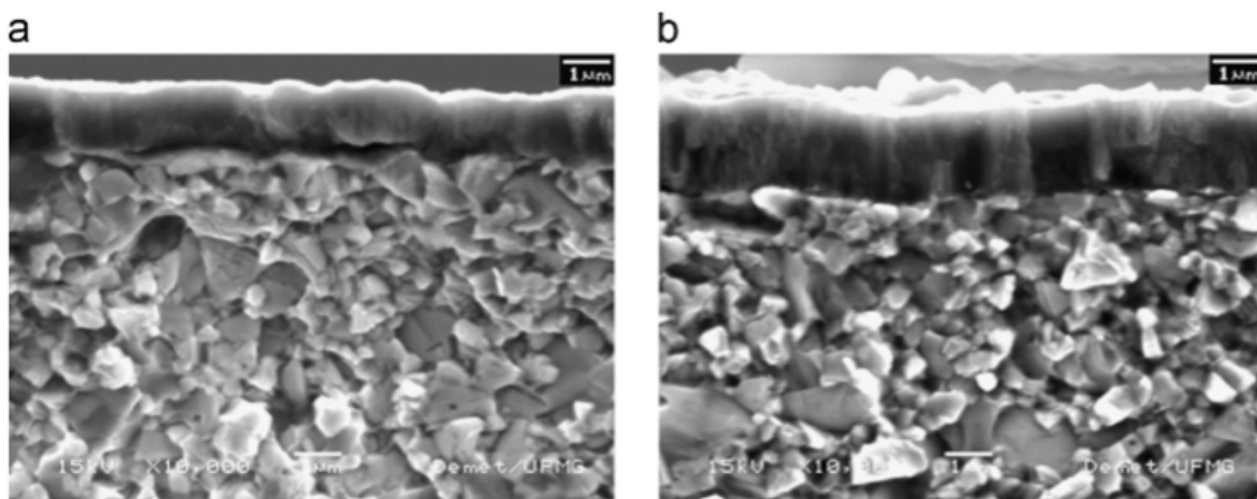
Figura 3.5: Numeração das pontas da ferramenta de corte.



Fonte: Autora.

de TiAlN (AA) e $3\text{ }\mu\text{m}$ para o revestimento de TiAlN (BA). Essas espessuras foram escolhidas para os revestimentos, pois encontra-se dentro da faixa de segurança, menor que $5\text{ }\mu\text{m}$ diminuindo a possibilidade de falhas de adesão provocada por altos valores de tensões residuais associadas ao processo de deposição.

Figura 3.6: Micrografias das ferramentas de corte revestidas: (a) TiAlN (AA) e (b) TiAlN (BA).

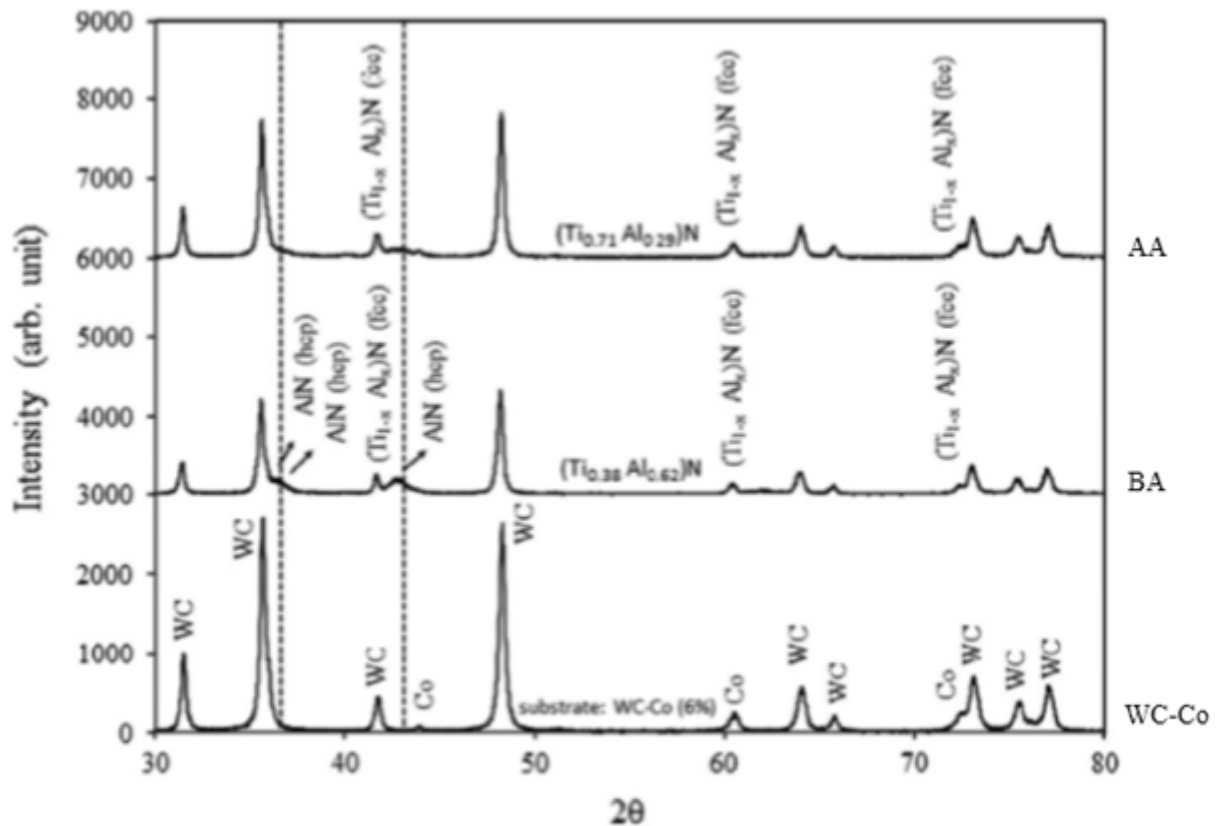


Fonte: Ávila, et al. (2013).

Segundo Ávila et al. (2013) as fases determinadas no DRX para cada pastilha estão apresentadas na Figura 3.7. Para a amostra com baixo teor de alumínio (BA), apenas uma fase cúbica de face centrada foi identificada. Enquanto que duas fases foram de-

tectadas na amostra com alto teor de alumínio (AA): cúbica de face centrada e hexagonal compacta. Com relação a amostra sem revestimento, observa-se que os resultados indicam uma maior quantidade de WC quando comparado com o Co que representa 6%. E, ainda, as fases do WC-Co são indicadas nas três amostras. E uma análise por EDS (Energy Dispensive Spectroscopy) também foi realizada por ÁVILA et al. (2013) para a identificação da razão estequiométrica do conteúdo dos elementos químicos do revestimento.

Figura 3.7: Padrões de difração de raios-X de revestimentos ternários e substratos.



Fonte: Ávila, et al. (2013).

3.3 Torno Mecânico

O torno mecânico universal da marca Bener Veker, modelo FEL1440GWM localizado no laboratório de usinagem da Universidade Federal do Amazonas – UFAM foi utilizado no presente trabalho para a usinagem.

3.4 Máquina Óptica OLM 3020 e VMS 3.1

O Optiv Lite Manual (OLM) da Hexagon Metrology é uma máquina óptica baseada na microscopia óptica utilizada para observar a geometria de amostras de pequeno porte e, principalmente, para medir o desgaste das ferramentas de corte. Na Figura 3.8 tem-se a máquina óptica do laboratório de Metrologia da UFAM.

Este equipamento possui um sistema de mesa de trabalho móvel, uma coluna Z e a base bidimensional XY de granito. Suas especificações são: Modelo OLM 3020; Dimensão 300 x 200 x 200 mm de medição eficaz; Dimensão total de 766 x 753 x 1015mm; Câmara 1/3 "de alta resolução CCD; Precisão Exy de $3,0 + L / 150 \mu\text{m}$; Precisão Ez de $5,0 + L / 150 \mu\text{m}$; Distância de trabalho de 60mm; Iluminação de LED na luz da mesa e LED no anel de luz; Ampliação com Zoom manual (30x a 180x); Resolução $1,0 \mu\text{m}$; Capacidade de carga 10kg; Software VMS 3.1; Opção Táctil; Ambiente de trabalho 20 ° C; Humidade 40% - 70% RL.

O software VMS 3.1 foi utilizado para capturar as imagens de desgaste da pastilha e para determinar os valores do raio das arestas de corte, espessura e ângulo da ferramenta de corte. As iniciais VMS correspondem as palavras em inglês Vision Measuring System que significa Sistema de Medição Ótico. O princípio básico desse software é

Figura 3.8: Máquina ótica OLM 3020.



Fonte: Autora.

primeiro opticamente ampliar partes e coletar suas fotos pela câmera CCD em seguida transferir para o computador e analisar pelo software de medição.

3.5 Softwares de tratamento de imagem

O software MetaVision foi utilizado, principalmente, para transformar a imagem obtida por microscopia ótica em uma imagem que distingue a variação do relevo de superfícies por cores. Essas superfícies irregulares, que encontram-se em planos paralelos distintos, recebem cores diferentes, baseadas no sistema de cores RGB (Red-Green-Blue). A finalidade foi diferenciar as profundidades e alturas dos planos, viabilizando uma sensação tridimensional. A sensação de profundidade e a altura nas

imagens cromáticas obtidas pelo software foram representada, no caso em tela, pela profundidade do desgaste de cratera e deslocamento do material da pastilha, respectivamente.

O software Wolfram Mathematica foi utilizado para quantificar numericamente o desgaste de cratera e o deslocamento do material na área afetada pela usinagem.

4 METODOLOGIA

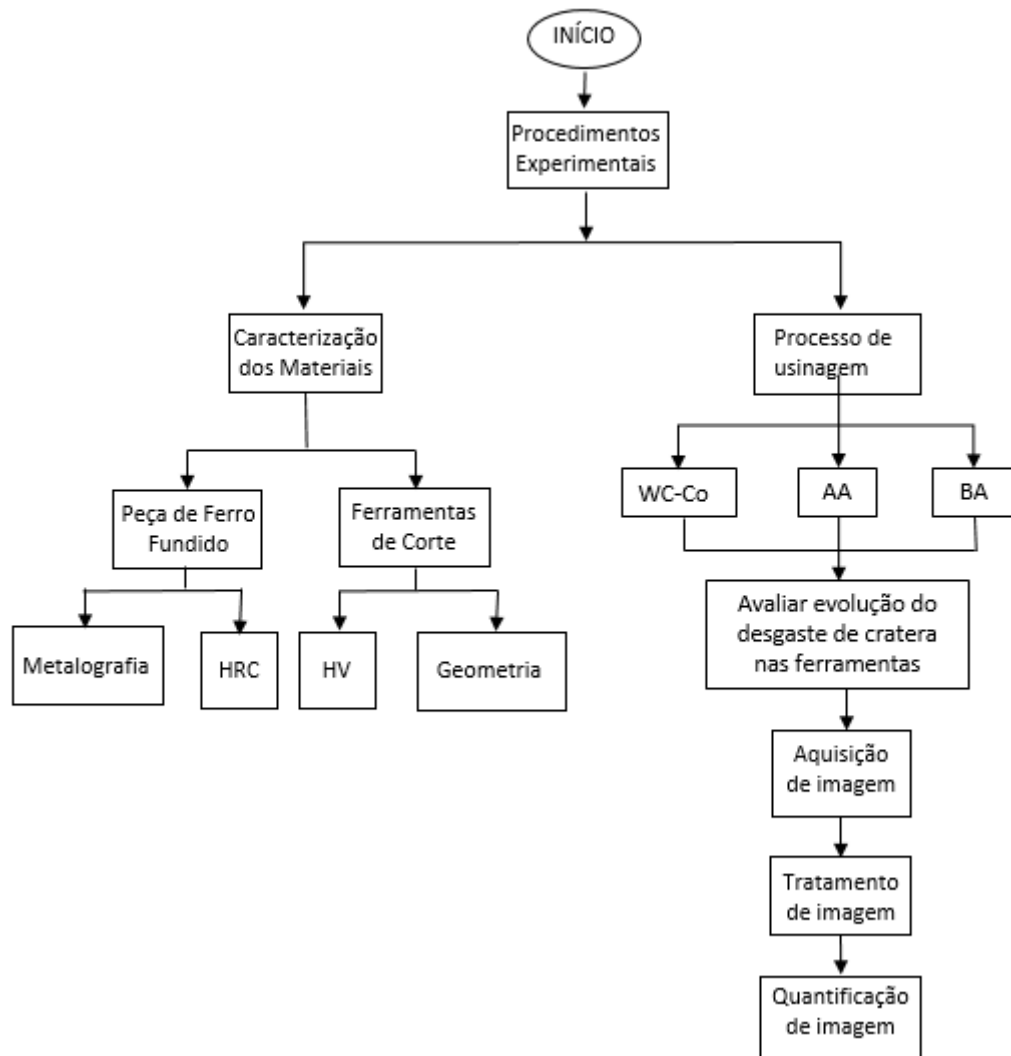
O presente capítulo apresenta a metodologia desenvolvida nesta pesquisa. Os procedimentos experimentais do trabalho encontram-se ilustrados na Figura 4.1 dividem-se em caracterização do ferro fundido e das ferramentas de corte e ao processo de usinagem. A peça metálica foi caracterizada por duas técnicas distintas, tendo sido utilizadas a metalografia e o ensaio de dureza Rockwell C. Além disto, as ferramentas de corte foram caracterizada por microdureza Vickers e pelas formas geométricas. Depois da usinagem foi feita a aquisição, o tratamento e a quantificação de imagens. Essas etapas foram executadas com a finalidade de se obter dados experimentais com o intuito de se avaliar a evolução do desgaste de cratera nas três ferramentas de corte estudadas (WC-Co, AA e BA).

4.1 Caracterização da Peça de Ferro Fundido

Os procedimentos da metalografia consistiram em: separar o material a ser estudado; Identificar regiões de estudo; Identificar as fases do procedimento a fazer; Separar o material a ser utilizado como, por exemplo, resina, catalizador, molde plástico, cera desmoldante de carnaúba, lixas de diferentes granulometria, pano tipo feltro para de polimento, fluído de polimento “Alumina”, luvas, cotonetes, secador, reagentes químico, etc.; Ajustar os equipamentos como a cortadeira, lixadeira, Balança de precisão, o Microscópio óptico e a câmera digital para captura de imagem do microscópio. Posteriormente, foi feita a preparação de amostras:

Para que fosse possível iniciar a Metalografia na peça metálica, a primeira etapa foi

Figura 4.1: Etapas dos procedimentos experimentais.



Fonte: autora.

cortar uma amostra do ferro fundido, que inicialmente tinha 300mm de comprimento e 100mm de diâmetro. A cortadeira de amostras da marca PANCUT-80 do Laboratório de Metalurgia da UFAM foi usada com um disco de corte específico para metais ferrosos. Primeiramente, 20 mm do comprimento do ferro fundido foi seccionado. Em seguida, uma amostra do centro e outra amostra da extremidade foram cortadas para estudo.

Para embutir as duas amostras de ferro fundido foi preciso limpá-la e secá-las com-

pletamente para remover resíduos de corte e manipulação. Em seguida, foi retirado os detritos dos moldes de embutimento. Um anel cilíndrico serviu como um molde e uma parte plana como se fosse uma tampa serviu como a base do molde. Uma fina camada de cera desmoldante de carnaúba foi aplicada no molde de embutimento. A amostra foi posicionada no centro do molde de embutimento. Em seguida, a mistura foi vertida dentro do molde de embutimento onde fora iniciado o processo de cura à pressão ambiente logo após a homogeneização.

O lixamento da amostra foi realizado utilizando-se a lixadeira politriz eletrônica marca PANTEC modelo POLIPAN-U. As lixas utilizadas de granulação maior e depois cada vez menor foram as de numeração 100, 220, 420, 600, 800 e 1200. A direção em 90° foi mudada a cada troca de lixa para que os traços da lixa anterior desaparecessem. Durante o lixamento, a velocidade média da rotação da lixadeira foi de 330 RPM e a limpeza adequada da superfície da amostra na mudança de lixas foi feita.

O pano para o polimento foi colocado na placa plana da lixadeira e fluído de polimento com o abrasivo Alumina de 0,3 μm .

A limpeza intermediária foi feita durante todo o procedimento de preparação da amostra para evitar a contaminação com outras partículas. A limpeza final foi necessária para remover o resíduo de polimento. Depois da limpeza, a secagem da mostra embutida foi feita ao ar com o auxílio de um secador. O inibidor de corrosão, a cera desmoldante de carnaúba, também fez parte do processo de cuidados com a amostra antes das análises.

O ataque químico no ferro fundido foi feito com o reagente Villella. A mistura de 45 ml de Glicerol, 15 ml de ácido nítrico e de 30 ml de ácido clorídrico foi feita na capela de exaustão do Laboratório de Química da UFAM. Um cotonete umedecido no Villella

foi passado cuidadosamente apenas em cima do ferro fundido, evitando o contato com a resina. Após alguns segundos a partir do leve ataque químico, a superfície da amostra foi lavada, secada e levada ao Microscópio óptico de medição, marca PANTEC, modelo MMI 2000 e a Câmera digital HDCE-30C para captura de imagem do microscópio do Laboratório de Metalurgia da UFAM.

O ensaio de dureza Rockwell foi feito para o ferro fundido. Para a realização desse ensaio foi utilizado o durômetro da marca TIME TH-320 devidamente calibrado. O Ensaio foi realizado nas dependências da UFAM no Laboratório Metalográfico da FT. O penetrador utilizado foi o esfera de aço 3,175mm para a indentação no ferro fundido na escala E com a faixa de utilização entre 70 a 100 HRC.

4.2 Caracterização das Ferramentas de Corte

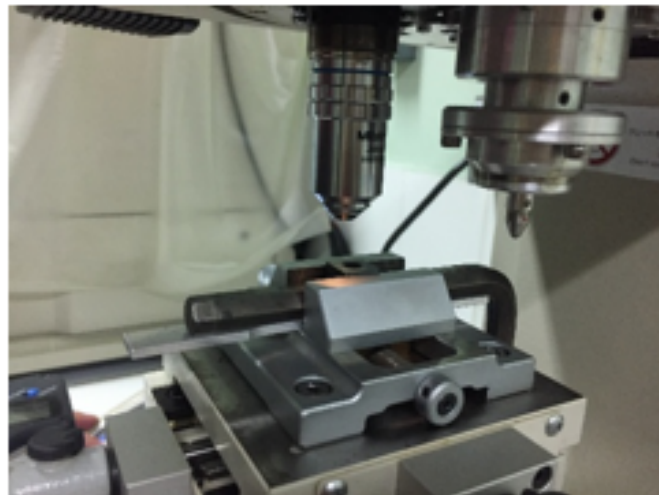
O ensaio de microdureza Vickers foi necessário para quantificar a diferença entre os valores de dureza das pastilhas que possuem recobrimentos diferentes. O ensaio de microdureza foi realizado no Laboratório de Materiais da Universidade do Estado do Amazonas (UEA). A dureza das ferramentas e recobrimentos foram avaliados pelo microdurômetro marca Mitutoyo, modelo HM.

Com os valores do ensaio foi elaborado “um mapa de microdureza” na qual as cargas aplicadas variaram nas pastilhas recobertas e na não recoberta, no sentido da maior carga para a menor que indicou uma região de dureza dos recobrimentos utilizados. O trabalho possuiu dois recobrimentos e um substrato. No total, três amostras diferentes foram utilizadas. Como as amostras possuíam recobrimentos diferentes e de espessuras distintas, os revestimentos das ferramentas de corte foram analisados com o intuito

de se quantificar a diferença entre seus valores de microdureza.

A pastilha foi apoiada em uma base adaptada para dar mais sustentação na indentação, conforme mostrado na Figura 4.2. Foi aplicado uma carga de 1N em três pontos distintos da pastilha.

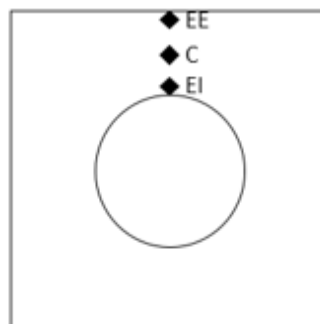
Figura 4.2: Indentação da microdureza na ferramenta de corte.



Fonte: autora.

Na Extremidade Externa (EE), no centro (C) e na Extremidade Interna (EI) conforme esquema indicado na Figura 4.3.

Figura 4.3: Indentação na ferramenta de corte.



Fonte: autora.

Ao longo da extremidade externa (EE) em um passo de 0,25 mm de distância entre

indentações medições de microdureza Vickers com diferentes cargas aplicadas de 1kg e 0,5kgf foram feitas para todas as pastilhas do presente estudo. Uma distância de 0,25mm entre indentações foi adotada para que os valores de cada impressão não influenciem nos resultados.

Também foram feitos ensaios aplicando cargas menores. Mas os resultados obtidos com essas cargas muito pequenas foram desconsiderados por limitação da técnica na leitura da indentação. As pastilhas não foram preparadas para a metalografia e com a finalidade de evitar a penetração apenas na rugosidade superficial das pastilhas, foi considerando apenas para o estudo de microdureza dos recobrimentos os valores de carga de 1kgf e 0,5kgf.

Para medir o raio das ferramentas de corte a função do VMS 3.1 “Auto catch ponto de borda” do software do equipamento foi selecionada. Nessa função o programa encontrou o ponto mais forte de contraste na zona de imagem e tornou como ponto de entrada a borda da pastilha.

Portanto, através dessa função foi possível calcular com precisão o raio de todas as pontas em cada ferramenta de corte antes da usinagem. Na Figura (a) 4.4, está a medição do raio da ponta 2 na superfície de saída da pastilha WC-Co revestida com TiAlN de alto teor de alumínio (AA).

Para determinar a espessura da ferramenta foi feito o uso da função “Auto linha”, do software do equipamento, em que dentro de uma região selecionada retangular, o programa captura pontos de uma borda, por exemplo, formando uma linha com os pontos capturados. Após selecionar os pontos das duas extremidades da pastilhas, foi obtido duas linhas paralelas. Desta forma, com o auxílio da função “Distância entre linhas” o programa calculou automaticamente a distância entre as linhas. Na Figura

(b) 4.4 medição da espessura.

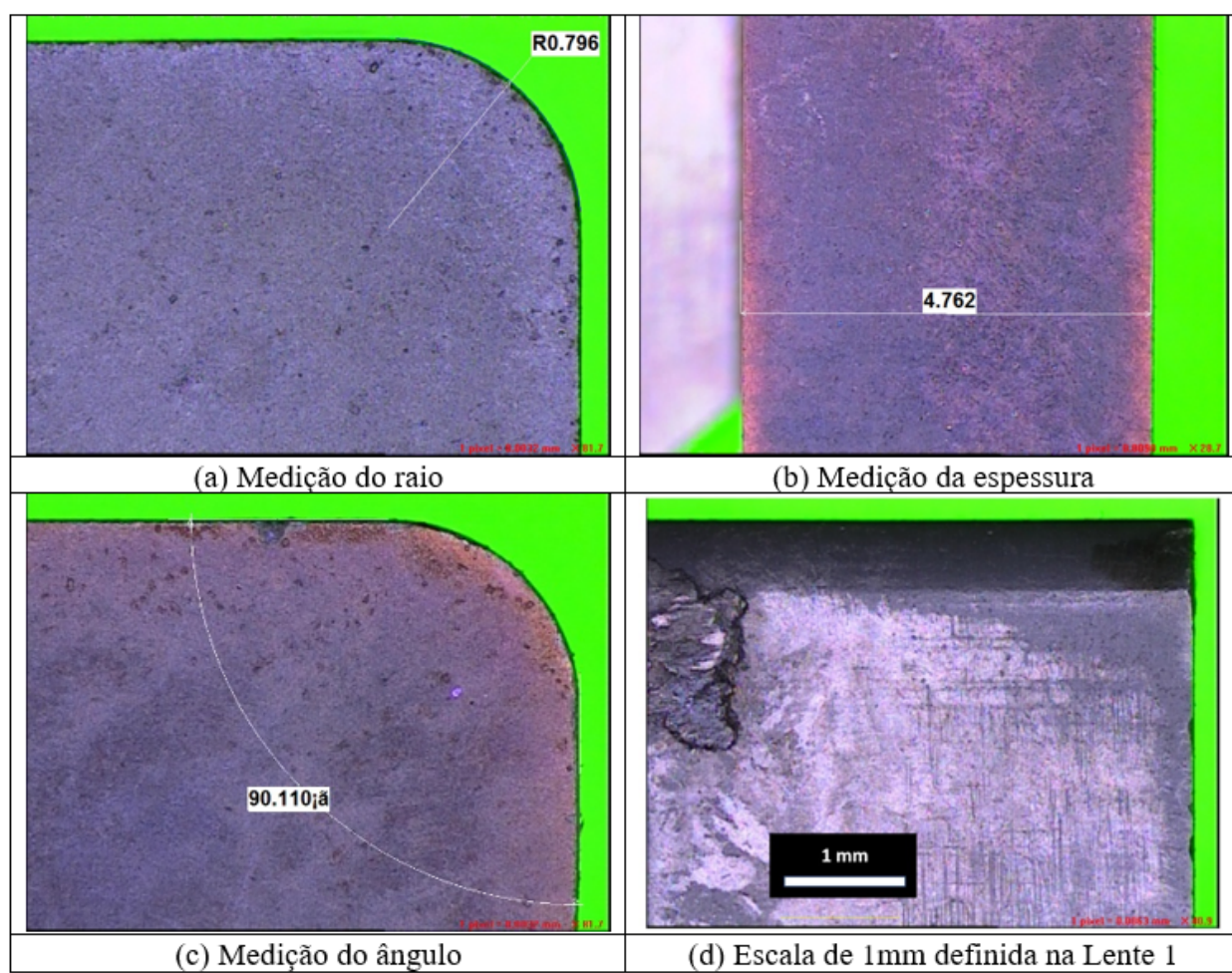
A medição de ângulo das pastilhas antes da usinagem no VMS 3.1. Na Figura (c) 4.4 Medição do ângulo.

No presente trabalho, três tipos de lentes foram utilizadas: Lente 0.75, Lente 1 e Lente 2.

Para a Lente 0.75, onde o aumento é de 28.7 e 1 pixel equivale a 0.0090 mm, o tamanho da linha de escala de 1 mm foi utilizado. No que diz respeito a Lente 1, onde o aumento é de 40.9 e 1 pixel equivale a 0.0063 mm, o tamanho da linha de escala de 1 mm também foi adotado. Finalmente, para a Lente 2, onde o aumento é de 81.7 e 1 pixel equivale a 0.0032 mm, o tamanho da linha de escala de 0,5 mm foi utilizado.

No VMS 3.1., somente uma linha de escala é fornecida. Legenda, caixa de texto preta e faixa grossa branca foram adicionadas com auxílio de um software de editor de imagens nas mesmas dimensões da linha dada pelo VMS 3.1 da máquina ótica. Na Figura (d) 4.4 linha de escala de 1mm definida na Lente 1.

Figura 4.4: Geometria



Fonte: autora.

4.3 Usinagem

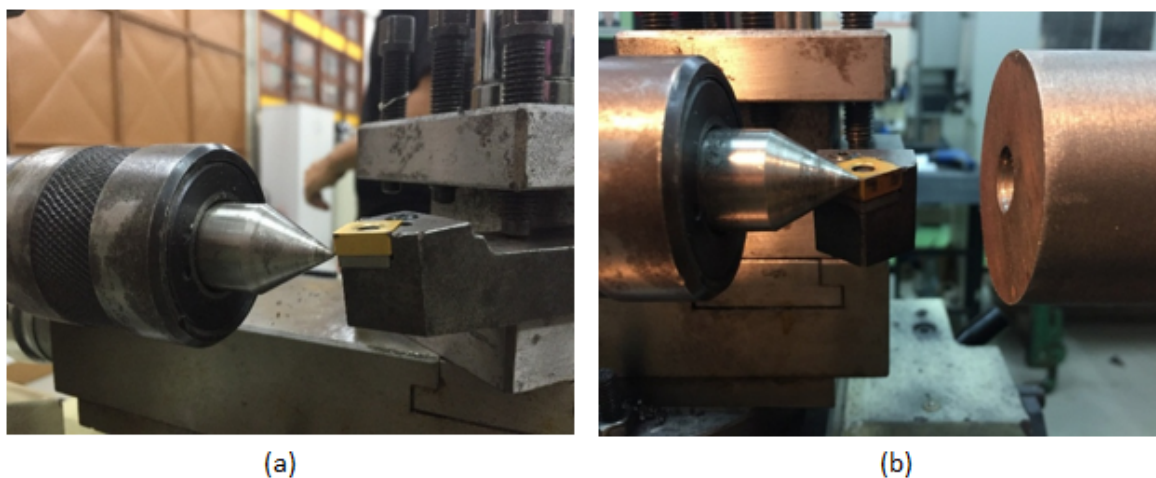
O processo de usinagem escolhido foi o torneamento por ser prático e também utilizado na avaliação da vida de ferramentas.

Os procedimentos experimentais foram baseados em Ávila et al. (2013), mas para adequá-lo às instalações do laboratório da UFAM o experimento precisou de umas modificações no projeto original.

Inicialmente a peça metálica de 300 mm foi cortada para melhor se ajustar ao torno, assim como foi feito um furo central para diminuir as vibrações durante a usinagem.

Foi observado que a ferramenta de corte encontrava-se acima do nível do contraponto conforme indicado no item (a) da Figura 4.5. O alinhamento do porta-ferramenta com o contraponto é um procedimento necessário para o corte e para obter a melhor eficiência da ferramenta, para isso, a ferramenta de corte e o contraponto precisam estar no mesmo nível como indicado no item (b) da Figura 4.5.

Figura 4.5: (a) Contraponto desalinhado com a ferramenta
(b) Alinhamento da ferramenta com o contraponto.



Fonte: autora.

Para nivelar o porta-ferramenta com o cento do contraponto do torno, a solução encontrada foi a fresagem de 4,02 mm na haste inferior do porta-ferramentas, para que o porta-ferramenta que estava acima do contraponto ficasse com um rebaixo alinhando-se assim ao centro do contraponto.

Depois do alinhamento, o contraponto foi apoiado na peça firmemente para evitar vibrações excessivas.

Posteriormente, o torno foi ajustado para operar em uma rotação média constante para todo o experimento. Para isso, o torno foi configurado em GKM para rotação de 60rpm. Para avanço por revolução de 0,256mm/rot o torno foi ajustado em: BD4 seguindo as tabelas fornecidas pelo próprio torno.

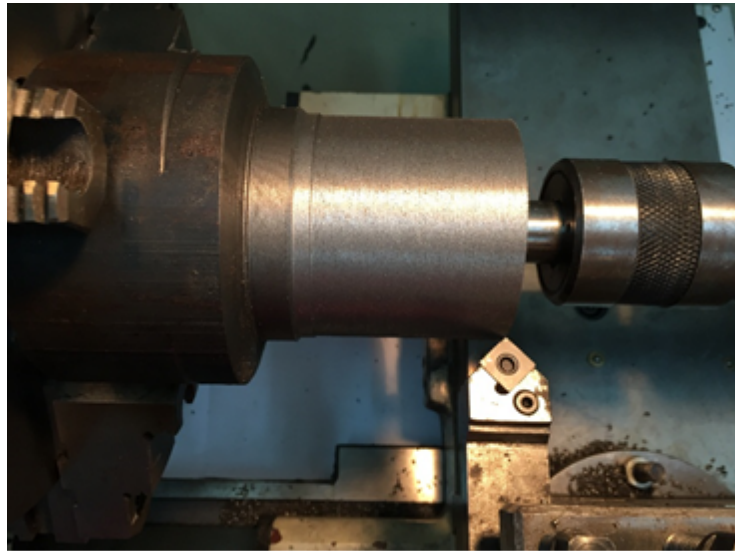
Na etapa de limpeza da superfície do ferro fundido, a usinagem foi feita com auxílio de outra ferramenta de corte comercializada pela SANDVIK, no qual foi dado um avanço 1 mm no diâmetro no processo de desbaste. A seguir foi feito um faceamento retirando o mínimo de material do cilindro.

Uma pré-usinagem com a WC-Co P1 e P2 foi conduzida com o ângulo de direção gume ou de posição com angulação de 55° para o desgaste a fim de usinar a peça mantendo o padrão das distâncias de usinagem em cada passo mais próxima de 60 mm.

Todavia, esse procedimento alterou drasticamente os resultados esperados, pois com a alteração do ângulo de posição o desgaste ficou concentrado mais na quina comprometendo o desempenho da ferramenta que foi projetada para atuar no desbaste formando um ângulo de 45° em relação a peça. Por esse motivo, essa hipótese de variar a angulação em 55° para que não houvesse uma variação nas distâncias percorridas durante os experimentos foi descartada. Porém, devido a essa parte dos procedimentos

experimentais, ocorreu um leve desgaste da Ponta 1 (P1) e da Ponta 2 (P2) da pastilha de WC-Co antes da usinagem do primeiro e do segundo passo do estudo para essa pastilha. O procedimento de usinagem é mostrado na Figura 4.6.

Figura 4.6: Usinagem com ângulo de posição a 45°.



Fonte: autora.

A troca das pontas da ferramenta e a substituição das ferramentas de corte foram feitas sem se alterar os parâmetros de posicionamento da peça e do porta-ferramenta no torno, pois foi possível desparafusar apenas a pastilha, fazer a troca manualmente e parafusá-la no porta-ferramenta acoplado no torno, mantendo todo aparato montado na mesma posição.

Os cálculos para definir os parâmetros de usinagem foram baseados nas principais fórmulas para o torneamento de dados de corte. A Figura 4.7 mostra a definição dos parâmetros de corte para os cálculos apresentados a seguir.

De acordo com ÁVILA et al. (2013) as pastilhas CNMG120408 foram montadas em um porta-ferramenta, código da ISO PSDNN 2525-M12, resultando na seguinte geometria: Ângulo de direção do gume ou de posição = 45°; Ângulo de inclinação

Figura 4.7: Definição dos parâmetros de corte.

Parâmetro	Sigla	Unidade
Diâmetro usinado	D_m	mm
Avanço por rotação	F_n	mm/r
Profundidade de corte	A_p	mm
Velocidade de corte	V_c	m/min
Velocidade de fuso/ rotação	n	rpm
Potência líquida	P_c	Kw
Taxa de remoção de metal	Q	Cm ³ /min
Espessura média do cavaco	H_m	mm
Espessura máxima do cavado	H_{ex}	mm
Tempo de corte	T_c	min
Comprimento usinado	L_m	mm
Ângulo de posição	K	graus

Fonte: autora.

Velocidade de fuso (rpm)	$n = \frac{V_c \times 1000}{\pi \times D_m}$
Velocidade de corte V_c (m/min)	$V_c = \frac{D_m \times \pi \times n}{1000}$
Tempo de usinagem T_c (min)	$T_c = \frac{D_m}{F_n \times N}$
Taxa de remoção de metal Q (cm ³ /min)	$Q = V_c \times A_p \times F_n$
Potência líquida P_c (Kw)	$P_c = \frac{V_c \times A_p \times F_n \times K}{60 \times 10^3}$

de quina = 95°; Ângulo inclinação lateral = -5°; Ângulo de saída = -6°; Ângulo de incidência = 6°. Os parâmetros de corte adotados podem ser encontrados conforme entre as Figuras 4.8, 4.9, 4.10 e 4.11.

Figura 4.8: Parâmetros de corte adotados.

Descrição	Sigla	Parâmetro adotado				
Material	FF	Ferro fundido nodular FUCO® FE 55006				
Comprimento da peça	Lp	Inicial: 300 mm Cortado para a usinagem: 135 mm				
Diâmetro inicial do ferro fundido	D	100 mm				
Velocidade de corte	Vc	150 m/min				
Velocidade do fuso	n	85 RPM GKM				
Avanço por revolução	fn	0,256 mm/rot Ajustar torno em: BD4				
Profundidade de corte	Ap	1 mm				
Ângulo de posição	χ	45°				
Tempo de corte	Tc	<table><tr><td>4</td><td>8</td><td>12</td><td>16</td></tr></table> Min	4	8	12	16
4	8	12	16			
Comprimento usinado	L	<table><tr><td>60</td><td>120</td><td>180</td><td>240</td></tr></table> mm	60	120	180	240
60	120	180	240			

Fonte: autora.

Figura 4.9: Parâmetros de corte do WC-Co.

Parâmetros adotados da Pastilha WC-Co									
Ponta de corte	Número Total de Passos	L total médio (mm)	Passo	L na peça por passo (mm)	L total na ponta usinada (mm)	Diâmetro usinado (mm)	Diâmetro Total usinado (mm)	Tempo por passo (min)	Tempo Total (min)
1	1	60	1°	65.92	65.92	75.9	75.9	04:48.7	04:48.7
2	2	120	1°	59.68	59.68	72.73	144.45	04:06.3	08:09.0
			2°	59.14		71.72		04:02.6	
3	3	180	1°	60.035	179.965	70.71	209.03	04:04.2	12:19.7
			2°	60.17		69.61		04:09.4	
			3°	59.76		68.71		04:06.1	
4	4	240	1°	60.04	235.43	67.5	263.06	04:11.1	16:09.4
			2°	59.35		66.05		04:04.2	
			3°	58.17		65.29		03:57.1	
			4°	57.87		64.22		03:57.0	

Fonte: autora.

Figura 4.10: Parâmetros de corte do TiAlN (AA).

Parâmetros adotados da Pastilha TiAlN (AA)									
Ponta de corte	Número Total de Passos	L total médio (mm)	Passo	L na peça por passo (mm)	L total na ponta usinada (mm)	Diâmetro usinado (mm)	Diâmetro Total usinado (mm)	Tempo por passo (min)	Tempo Total (min)
1	1	60	1°	59.06	59.06	61.82	61.82	03:58.1	03:58.1
2	2	120	1°	61	121.67	60.93	120.74	04:11.7	08:20.9
			2°	60.67		59.81		04:09.2	
3	3	180	1°	60.28	178.955	58.72	173.52	04:07.0	12:12.5
			2°	59.605		57.9		04:03.5	
			3°	59.07		56.9		04:02.0	
4	4	240	1°	58.82	221.13	56.9	216.62	04:01.0	16:24.8
			2°	58		54.71		04:34.4	
			3°	52.26		53.22		03:55.4	
			4°	52.05		51.79		03:54.0	

Fonte: autora.

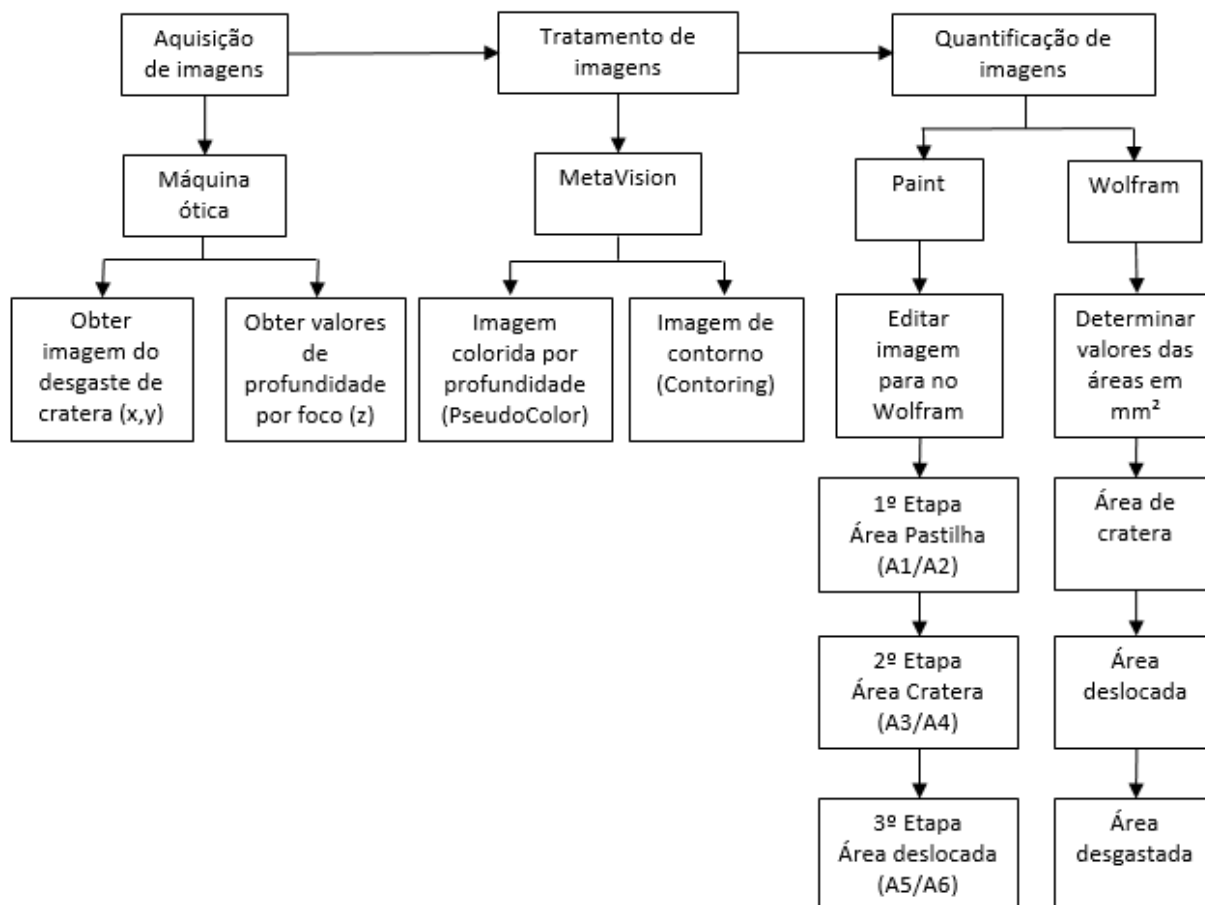
Figura 4.11: Parâmetros de corte do TiAlN (BA).

Parâmetros adotados da Pastilha TiAlN (BA)									
Ponta de corte	Número Total de Passos	L total médio (mm)	Passo	L na peça por passo (mm)	L total na ponta usinada (mm)	Diâmetro usinado (mm)	Diâmetro Total usinado (mm)	Tempo por passo (min)	Tempo Total (min)
1	1	60	1°	59.09		48.02	48.02	04:01.0	04:01.0
2	2	120	1°	60.94	121.12	46.71	92.61	4:10,74	04:12.0
			2°	60.18		45.9		04:12.0	
3	3	180	1°	60.12	179.05	44.71	130.93	4:08,81	04:02.0
			2°	59.81		43.72		4:06,44	
			3°	59.12		42.5		04:02.0	
4	4	240	1°	61.111	242.771	41.61	210.52	04:09.9	16:36.8
			2°	61.82		90.6		04:15.7	
			3°	60.39		39.6		04:07.7	
			4°	59.45		38.71		04:03.5	

Fonte: autora.

4.4 Avaliação do desgaste

Figura 4.12: Fluxograma da avaliação do desgaste



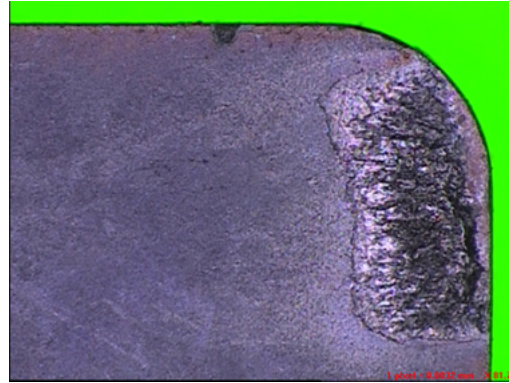
Fonte: autora.

4.4.1 Aquisição de Imagens

O procedimento utilizado para analisar o desgaste nas pastilhas foi, primeiramente, obter as imagens das pontas desgastadas por meio da microscopia via máquina ótica. Em seguida, tratar as imagens através de softwares da máquina metalográfica e de edição de imagens com a finalidade de mensurar os danos causados na pastilha após a

usinagem. A Figura 4.13 mostra uma imagem do desgaste da pastilha obtida pelo OLM 3020.

Figura 4.13: Imagem do desgaste da pastilha obtida pelo OLM 3020.



Fonte: autora.

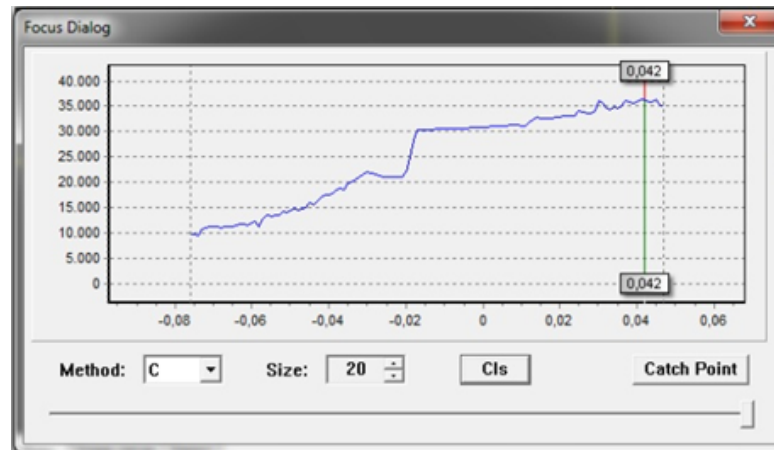
O cálculo do volume tornou-se necessário a quantificação da profundidade do desgastaste de cratera, pois a área de cratera na superfície de saída do cavaco tende a estabilizasse durante o processo de usinagem.

Entretanto, o procedimento para obtenção da profundidade da cratera foi através da máquina ótica, na qual, possui um sensor capaz de quantificar em milímetros os eixos do plano cartesiano tridimensional. O eixo Z, referente a espessura da pastilha, foi medido com base no ajuste do foco para quantificar a profundidade do desgastaste de cratera e a altura da área deslocada, conforme mostrado na Figura 4.14. O programa VMS 3.1 sugere automaticamente o melhor foco para a área selecionada. Quanto menor a região selecionada maior a precisão dos resultados. Por este motivo, a menor região de seleção que o programa permite foi escolhida a fim de obter a melhor precisão possível da profundidade de cratera.

O primeiro passo para esse procedimento foi considerar um ponto de origem inicial de coordenadas (0,0,0) na superfície de saída da ferramenta. Em seguida, foi se-

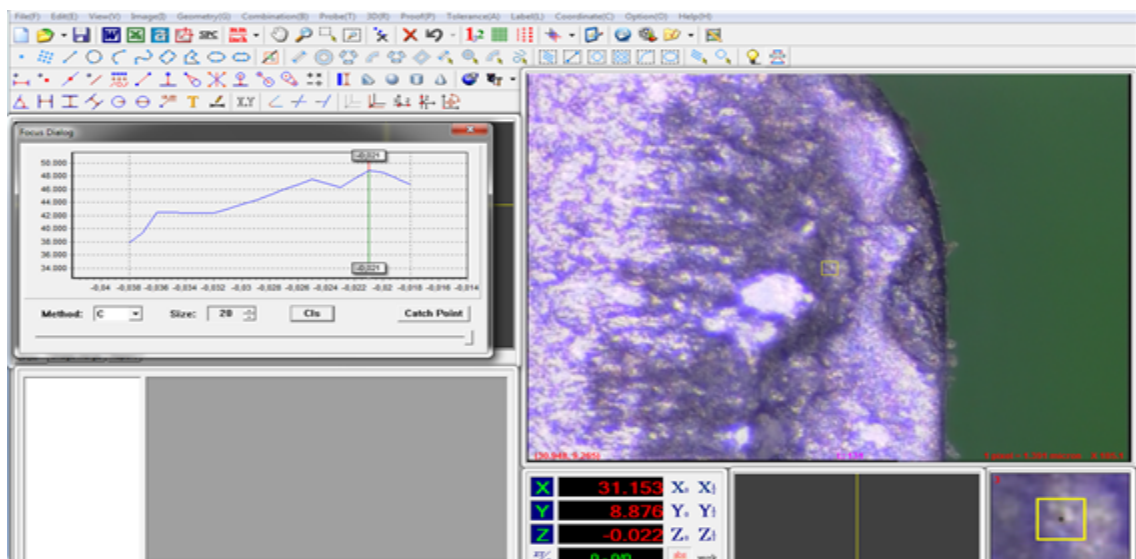
leccionado o melhor o foco sugerido pelo programa e depois a área de cratera e a área deslocada da área afetada, conforme mostrado na Figura 4.15.

Figura 4.14: Melhor foco para a área selecionada.



Fonte: autora.

Figura 4.15: Procedimento para se obter a profundidade.



Fonte: autora.

Os valores do eixo z foram obtidos colocando-se a pastilha a ser medida na máquina ótica e tais valores correspondem às profundidades das pastilhas.

4.4.2 Tratamento de Imagens (MetaVision)

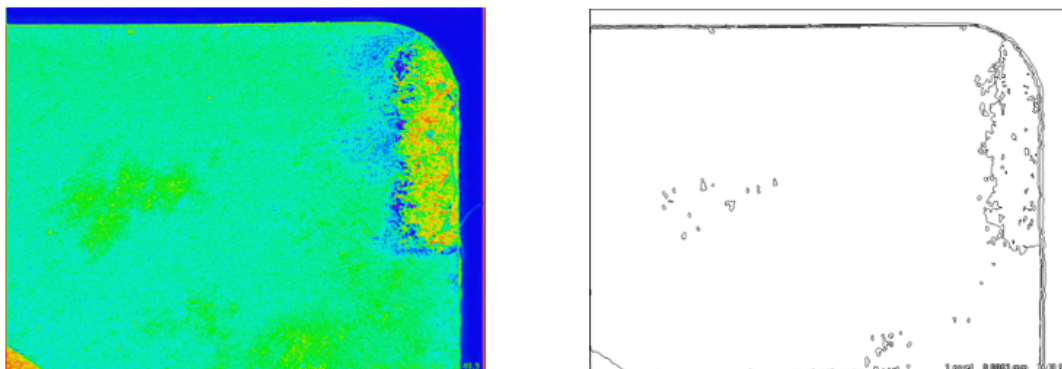
A função PseudoColor permite determinar a profundidade do desgaste de cratera por cores das imagens com o exemplo a Figura (a) 4.16. Os passos para ativar essa função foi necessário primeiramente abrir figura adquirida pela máquina ótica no metavision com extensão JPG, selecionar na barra de tarefas Filters e então foi clicado em PseudoColor. Para visualizar melhor o desgaste de cratera, as figuras que mostram uma escala de cores conforme a profundidade permitiu observar a área que foi mais afetada durante a usinagem formando o desgaste de cratera e o deslocamento do material formando uma espécie de relevo na área desgastada da pastilha.

As figuras que apresentam o contorno da cratera são importantes para ajudar a delimitar a área da cratera com mais precisão. Para isso, foi preciso abrir figura novamente ou usar as teclas Ctrl + z desfazendo a função PseudoColor e deixando a imagem original do MetaVision. Depois desse procedimento, selecionar na barra de tarefas Enhancements - Color Segmentation - Undersegmentation - Contoring, conforme mostrado na Figura (b) 4.16.

As figuras com tratamento de imagens através do Meta Vision foram essenciais para analisar e definir manualmente no editor de imagens as áreas da cratera, a área do deslocamento e, conseqüentemente, as áreas desgastadas e usá-las como input no Wolfram Matematica 10.4.1.

Figura 4.16: (a) Imagem da Ponta 2 da pastilha TiAlN (AA) depois da função Pseudo-Color.

(b) Imagem da Ponta 2 da pastilha TiAlN (AA) depois da função Contoring.



Fonte: autora.

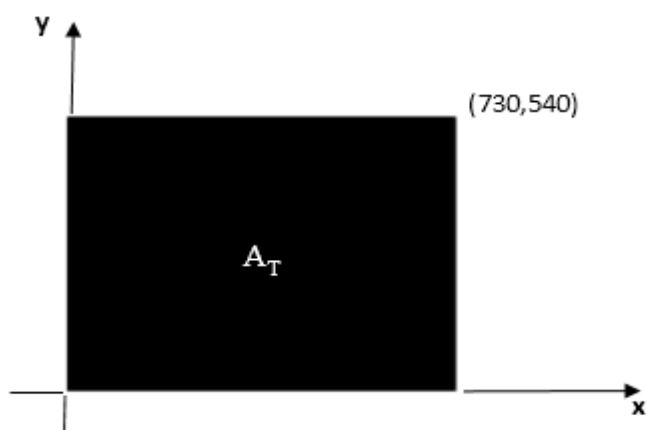
4.4.3 Quantificação da área desgastada (Wolfram)

As imagens geradas pela Máquina Ótica e tratadas através do MetaVion® incrementou o programa Wolfram Mathematica como dados de entrada a fim de gerar os valores das áreas desgaste das ferramentas de corte.

O Wolfram quantifica o tamanho das imagens por pixel pela relação dos pontos das coordenadas X e Y. Conforme representado Figura 4.17, os valores, representado pelo par ordenado que interceptam os eixos (x, y) no plano cartesiano, de aproximadamente 730 para o eixo das abscissas e 540 no eixo das ordenadas são as coordenadas do ponto no final canto superior direito das imagens em estudo. Com essas coordenadas foi possível calcular a área total da imagem (AT) que é igual a área de todo o retângulo.

Entretanto, a área total das imagens não é a mesma área da amostra, como pode ser observado na Figura 4.18 (a). A1 refere-se a parte colorida na figura, na qual o Wolfram transformou toda essa parte colorida em preto pela função binarize. A função binarize converte qualquer imagem em pixels pretos e brancos. Tal função foi utilizada

Figura 4.17: Representação esquemática da relação das coordenadas (x, y) com os pixels das imagens.

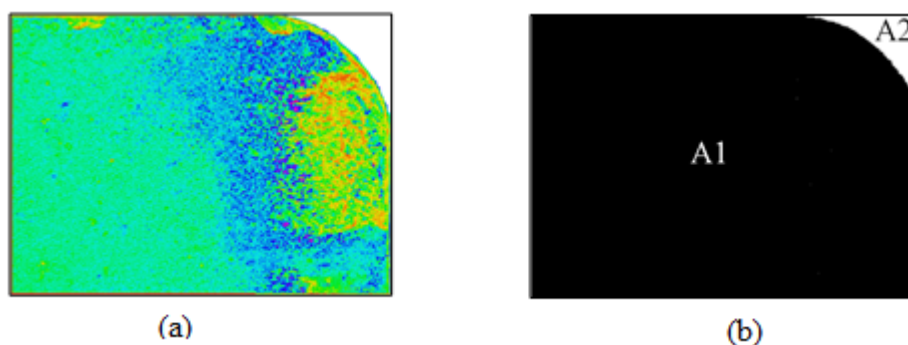


Fonte: Autora.

no código computacional do presente trabalho baseado na linguagem dos números binários 0 e 1 separando a cor que deseja, no caso tudo o que estiver em branco na imagem e as outras cores, ficam em preto.

Na Figura 4.18(b), A1 equivale a área da amostra representada pela parte em preto no retângulo. A2 corresponde a área que não faz parte da amostra exibido pela parte em branco no retângulo. Onde $A_T = A_1 + A_2$.

Figura 4.18: Representação esquemática da área da pastilha.



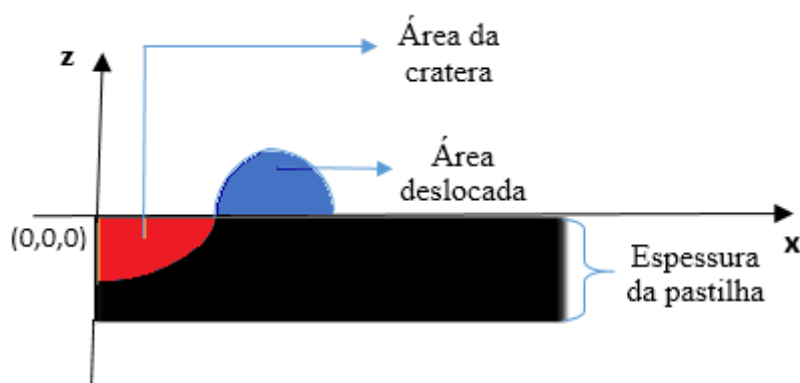
Fonte: Autora.

Observou-se pelas imagens com uma escala de profundidade por cor geradas pelo

MetaVion® que o desgaste na superfície de saída da pastilha possuía o desgaste de cratera e uma área deslocada devido ao atrito com o ferro fundido durante a usinagem.

A Figura 4.19 apresenta uma representação esquemática com a vista da espessura da pastilha para que didaticamente facilite percepção e a distinção entre a área da cratera e a área deslocada.

Figura 4.19: Representação das coordenadas (x, z) esquematizando a área desgastada na pastilha.



Fonte: Autora.

Partindo da hipótese em que a ponta esquerda da superfície de saída estudada, que encontra-se na borda superior da pastilha, manteve-se alinhada com o eixo X e a ponta esquerda da lateral da pastilha alinhada com o eixo Z. Ambas as pontas citadas acima foram definidas no marco zero do plano cartesiano. Portanto, partindo desse princípio na qual ficou estabelecido as coordenadas do marco (0, 0, 0) referentes a (x, y, z) para a pastilha no plano tridimensional, podemos dizer que a área da cratera que corresponde a um nível abaixo de zero no eixo Z e, analogamente, a área deslocada corresponde a um nível acima de zero no eixo Z. Por convenção no eixo Z, a área da cratera é negativa (-) e a área deslocada é positiva (+).

Contudo, ficou definido que a área da cratera (AreaCratera) e a área deslocada (AreaDeslocada), por serem distintas, seriam estudadas separadamente. E a soma das duas

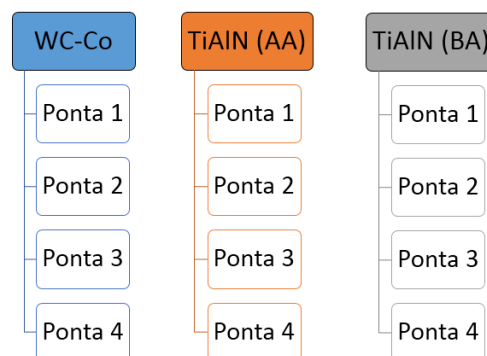
áreas ficou sendo a área de total de desgaste (AreaDesgastada) na superfície de saída da ferramenta de corte. A nomenclatura entre parêntese foi usada respectivamente durante a programação do código computacional no Wolfram.

O Wolfram, não reconhece diretamente, a área da cratera e a área deslocada. Portanto, as imagens foram tratadas no Paint Brush, editor de imagem da Microsoft Windows, para que o Wolfram reconhecesse apenas a área em estudo.

A edição de imagens consistiu em selecionar as áreas a serem estudadas da imagem para alimentar programa.

Contudo, três etapas de edição de imagens não foram executados para todas as pontas de cada ferramenta de corte. Conforme o fluxograma da Figura 4.20, a soma de todas as pontas são 12. Multiplicando as pelo número de etapas, totalizam 36 figuras editadas para incrementar o código computacional como input a fim de quantificar a área desgastada.

Figura 4.20: Pontas de cada Ferramenta de Corte.



Fonte: Autora.

O procedimentos de cada etapa estão resumidos na Figura 4.21

A edição de imagens foi realizada em três etapas. A primeira etapa consistiu em deletar a área de imagem que não pertence a pastilha (A2), conforme indicado na Fi-

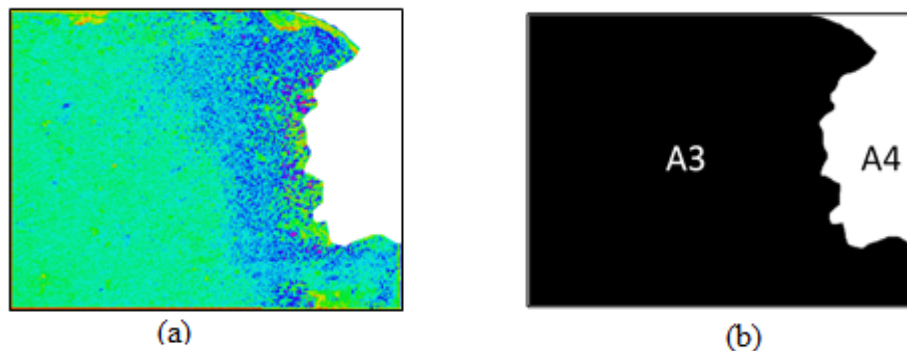
Figura 4.21: Procedimentos no editor de imagens.

Etapa	Selecionar	Deletar	Salvar
1	Parte que não pertence a pastilha	Deixar em branco a área selecionada	Área da Pastilha (A1)
2	Parte da área da cratera	Deixar em branco a área da cratera	Sem área da cratera (A3)
3	Parte da área deslocada	Deixar em branco a área deslocada	Sem área deslocada (A5)

Fonte: autora.

gura 4.20. Posteriormente, na segunda etapa, foram definidas duas áreas da seguinte forma: (A4) é o somatório da área de cratera com (A2) e (A3) é a diferença entre a área total de imagem e (A4), conforme observado na Figura 4.22.

Figura 4.22: Representação esquemática referente a área da cratera.

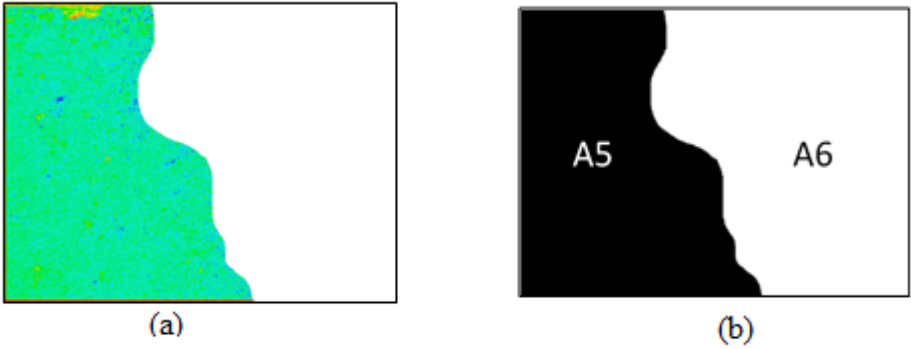


Fonte: Autora.

Finalmente, na terceira etapa, também foram definidas duas outras áreas, assim discriminadas: (A6) é o somatório da área deslocada, da área de cratera e da área (A2). (A5) é a diferença entre a área total da imagem (AT) e (A6), conforme ilustrado na Figura 4.23.

Um exemplo do produto final da edição de imagem, pode ser encontrado na Figura

Figura 4.23: Representação esquemática referente a área deslocada.



Fonte: Autora.

4.24 que possui três colunas de imagens que correspondem as 3 etapas anteriormente descritas. Portanto, todas as imagens da pastilha após edição de imagens encontram-se no APÊNDICE B.

Figura 4.24: Etapas de Edição de Imagens da Pastilha para o Wolfram.

API-j	Etapa 1	Etapa 2	Etapa 3
P1			

Fonte: Autora.

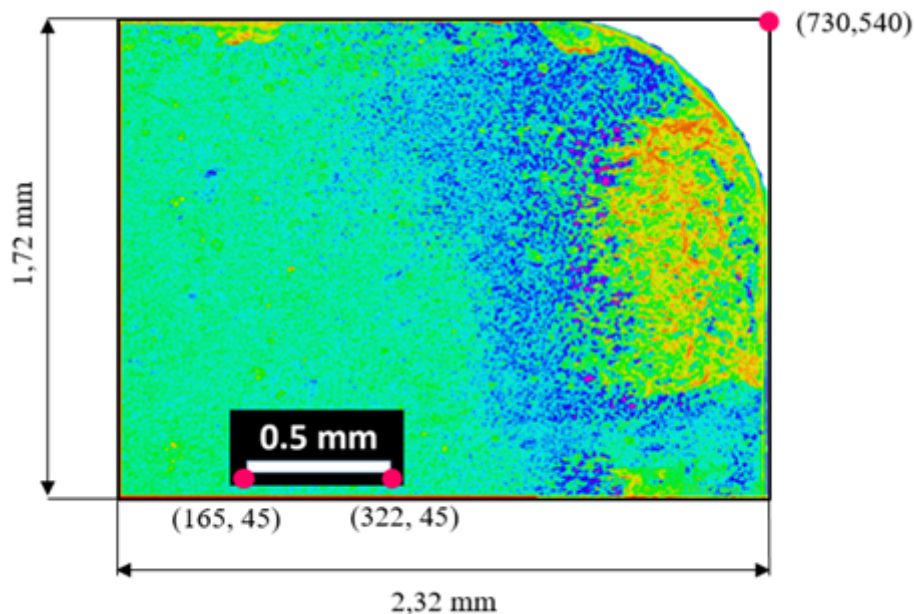
As imagens foram editadas com a finalidade de serem compiladas no programa Wolfram. Entretanto, essas imagens editadas também ajudaram na análise visual quando suas pontas foram compradas entre si. A comparação entre as pastilhas encontra-se no APÊNDICE C. Após esse procedimento de edição de imagens, o Wolfram ficou apto a reconhecer e distinguir as áreas em estudo, com o intuito de se calcular as áreas em questão pela quantidade de pixels fornecidas nas imagens.

Com objetivo de se calcular a área da imagem, equações de proporcionalidade e de geometria analítica foram utilizadas. Sendo que o tamanho da figura em pixels é dado pela localização do ponto (730, 540) no plano cartesiano (x, y).

1º Passo: Relacionar a escala com os “pixels”: coordenadas (x, y).

Onde X no início da escala da imagem equivale a 165 e no final da escala equivale a 322. Pela diferença entre o valor inicial e final temos 175 que equivale a distância em pixels da escala de 0,5 mm. A Figura 4.25 mostra a localização das coordenadas na imagem e as distâncias em milímetros calculadas no 2º e no 3º passo.

Figura 4.25: Cálculo da área total da imagem (AT).



Fonte: Autora.

Para efeitos didáticos, a Figura 4.26 refere-se ao diagrama esquemático da imagem da pastilha com as áreas anteriormente calculadas.

2º Passo: Regra de 3 para X:

0,5 mm ----- 157 pixels

X mm ----- 730 → X total = n° de pixels da figura na horizontal.

X = 2,32 mm → Tamanho da figura horizontal.

Pela regra de 3 entre as coordenadas em X e a escala em milímetros temos a distância total da imagem que equivale a 2,32mm.

3º Passo: Regra de 3 para Y:

0,5 mm ----- 157

Y mm ----- 540 → Y total = n° de pixels da figura na vertical.

Y = 1,72 mm → Tamanho da figura em y (vertical).

Pela regra de 3 entre as coordenadas em Y e a escala em milímetros temos a distância total da imagem que equivale a 1,72mm.

4º Passo: Calcular a área da Imagem

A partir das fórmulas da geometria analítica, onde a área do retângulo (A) é resultado do produto entre a base (b) e a altura (h). Conforme a Equação 4.6. Onde b recebe o valor de X e h recebe o valor de Y, respectivamente, 2,32 e 1,72. Então temos que a área total da imagem (A_t) equivale a 4mm².

$$A = b \times h$$

$$A_t = X \times Y = 2,32 \times 1,72 = 3,99 \text{ mm}^2 \text{ (aproximadamente 4mm}^2\text{)}$$

5º Passo: Calcular a área total da amostra (retirando os pixels brancos → A2)

Primeiramente é preciso importar a imagem editada da Etapa 1 para notebook do Wolfram. Então o programa faz os cálculos baseado no número de pixels pretos e brancos. Onde:

A1 = nível [(1, 2)] (pixels pretos) = Amostra.

A2 = nível [(2, 2)] (pixels brancos) = Não pertence a amostra.

Sendo A_T = A1 + A2. Temos que A1 = A_T - A2.

Para calcular a área da amostra (A1), foi necessário obter a porcentagem da amostra em relação a imagem total da imagem em pixels, conforme equação abaixo:

$$\text{Porcentagem Amostra} = \frac{A1}{A1 + A2} * 100$$

Obtemos pelo 4º Passo que A_T equivale a 4mm^2 . Portanto, pode-se calcular a área total da amostra ($A1$) em milímetro quadrado utilizando-se a equação a seguir:

$$A1 = A_T * \frac{\text{Porcentagem Amostra}}{100}$$

6º Passo: Calcular a área de cratera (retirando os pixels brancos $\rightarrow A4$)

Para esse passo é necessário importar a imagem editada da Etapa 2 (sem a área da cratera e sem a área $A2$) para o código computacional do Wolfram. Então o programa calcula os pixels pretos e brancos da $A3$ e $A4$, respectivamente. Onde:

$A3 = \text{nível } [(1, 2)]$ (pixels pretos) e $A3 = A_T - A4$

$A4 = \text{nível } [(2, 2)]$ (pixels brancos) e $A4 = \text{AreaCratera} + A2$.

Para calcular a área da cratera, foi necessário obter a porcentagem da área de cratera em relação a imagem da amostra ($A1$) em pixels, conforme equação abaixo:

$$\text{Porcentagem Cratera} = \frac{A4 - A2}{A1} * 100$$

Desta forma, pode-se calcular a área da cratera (Area Cratera) em milímetros quadrados conforme a equação a seguir:

$$\text{AreaCratera} = A1 * \frac{\text{Porcentagem Cratera}}{100}$$

7º Passo: Calcular a área total da amostra (retirando os pixels brancos → A6)

Para esse passo foi necessário importar a imagem editada da Etapa 3 (sem a área deslocada, sem a área da cratera e sem a área A2) para o programa. Então o mesmo calcula os pixels pretos e brancos da A5 e A6, respectivamente. Onde:

A5 = nível [(1, 2)] pixels pretos. Sendo $A5 = A_T - A6$

A6 = nível [(2, 2)] pixels brancos. Sendo $A6 = \text{AreaDeslocada} + \text{AreaCratera} + A2$.

A área deslocada foi calculada obtendo a porcentagem da área deslocada em relação a imagem da amostra (A1) em pixels, de acordo com a seguinte equação:

$$\text{Porcentagem Cratera} = \frac{A6 - A4}{A1} * 100$$

Em seguida, o cálculo da área deslocada (Área Deslocada) foi feito em milímetros quadrado, utilizando a equação abaixo:

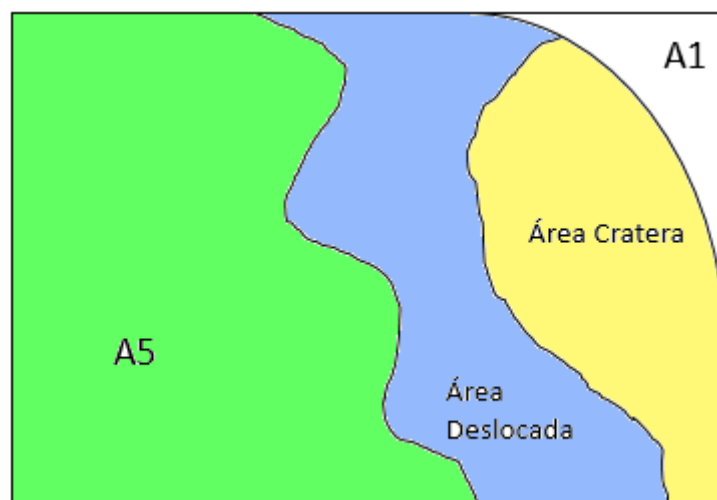
$$\text{Area Deslocada} = A1 * \frac{\text{Porcentagem Deslocada}}{100}$$

8º Passo: Calcular a área total afetada pelo desgaste

A área total afetada pelo desgaste foi definida como sendo o somatório da área deslocada e a área de cratera. A porcentagem em relação a imagem da pastilha é dada pela seguinte equação:

$$\text{Porcentagem Desgaste} = \frac{A6 - A2}{A1} * 100$$

Figura 4.26: Imagem da pastilha subdividida por áreas.



Fonte: Autora.

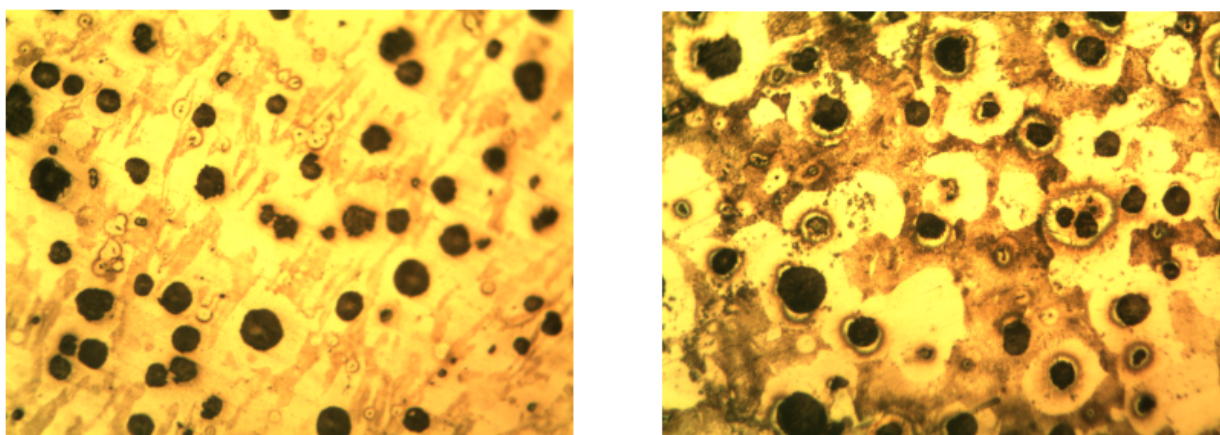
5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

5.1 Caracterização da peça

A metalografia teve como finalidade determinar a microestrutura da peça. E através da microscopia, com aumento de 200X, do ferro fundido nodular em estudo observou-se na microestrutura revelada após o ataque químico com o Vilela as mesmas características típicas de sua nodulidade quando comparado com a literatura do ferro fundido nodular descrita na revisão bibliográfica. Por esse motivo, tem-se que micrografia do ferro fundido nodular está adequada, pois esse ferro fundido possui nódulos de grafita em uma matriz ferrítica e perlítica conforme mostrado na Figura 5.1.

Figura 5.1: (a) FF polido depois do primeiro ataque com o Vilela.

(b) FF polido depois do segundo ataque com o Vilela.



Fonte: autora.

Os valores de dureza do ferro fundido em estudo forneceram um valor médio de 17,6 HRC. Esse valor médio obtido pelo durômetro nos procedimentos experimentais estão de acordo com a tabela de dureza mostrada na revisão bibliográfica com valores

para ferro fundido abaixo de 20HRC e equivalente a dureza Brinell de 200 HB fornecida pelo fabricante garantindo assim a confiabilidade do produto.

5.2 Microdureza das Pastilhas e Recobrimentos

Foram feitas medições de microdureza Vickers em diferentes locais da ferramenta. A carga aplicada nas indentações da Extremidade Externa (EE), no Centro (C) e na Extremidade Interna (EI) de 1kgf e os resultados dessas indentações são indicados na Figura 5.2.

Figura 5.2: Microdureza com carga de 1kgf em função da localização.

Indentação	WC-Co	TiAlN(AA)	TiAlN(BA)
Extremidade Externa (EE)	1473	1953	1522
Centro (C)	1402	1765	1149
Extremidade Interna (EI)	1551	1749	2199

Fonte: autora.

Os valores de microdureza são um pouco diferentes dependendo da localização das pastilhas. A pastilha de WC-Co é a mais uniforme, pois varia pouco os valores de microdureza. Entretanto, as pastilhas com recobrimentos possuem variações notáveis nos valores de microdureza dependendo da localização da indentação.

Estas variações de microdureza indicam que os recobrimentos não são uniformes por toda a pastilha, existindo regiões com variados valores de dureza. Esta variação é uma característica de processo de recobrimento PVD, que precisa ser muito bem executada ao longo da pastilha por inteira. Contudo, no presente trabalho os valores de dureza do foco da pesquisa são os valores da extremidade externa (EE) da pastilha,

na qual corresponde a extremidade cortante. A Figura 5.3 mostra a tabela com cargas aplicadas de 1kgf e 0,5kgf na extremidade externa (EE). Quanto menor a carga aplicada, mais difícil de se determinar as diagonais da indentação por causa da rugosidade superficial.

Figura 5.3: Microdureza com variação de carga 1 kgf e 0,5 Kgf na Extremidade Externa (EE) da pastilha.

Carga	WC	AA	BA	WC e AA	WC e BA
1 kgf	1473	1953	1522	33%	3%
0,5 kgf	1124	1802	1475	60%	24%

Fonte: autora.

Estes resultados indicaram os valores dos recobrimentos, sendo assim o (AA) apresentou dureza maior que (BA) e os dois foram maiores que o WC, em termos de dureza. Isto indica que vale a pena recobrir as pastilhas, pois os valores de microdureza aumentaram cerca de 33% e 3% para AA e BA, respectivamente, em relação ao WC-Co com a carga 1 kgf aplicada. E aumentaram cerca de 60% e 24% para AA e BA, respectivamente, em relação ao WC-Co em 0,5 kgf. Menores cargas não foram possíveis de medir por causa da rugosidade das superfícies, o que dificultou a medição das diagonais da indentação.

5.3 Geometria das Ferramentas

Os valores da geometria da ferramenta encontram-se nas tabelas das Figuras 5.4, 5.5 e 5.6. Da geometria da ferramenta pode-se observar que existe conformidade nas medidas de ângulo, raio e espessura das pastilhas de TiAlN AA e BA quando compara-

das com a pastilha de WC-Co. A uniformidade do recobrimento por PVD é excelente, pois permite que a geometria das ferramentas sejam conservadas com uma variação mínima.

Figura 5.4: Ângulos das pontas das pastilhas.

Ângulo (°)	WC-Co	TiAlN (AA)	TiAlN (BA)
P1	89.68	89.82	90.11
P2	89.01	89.54	89.20
P3	89.35	89.76	88.72
P4	89.24	89.33	89.45
Media	89.32	89.61	89.37

Fonte: autora.

Figura 5.5: Raios das pontas das pastilhas.

Raio (mm)	WC-Co	TiAlN (AA)	TiAlN (BA)
P1	0.806	0.775	0.806
P2	0.803	0.796	0.790
P3	0.794	0.791	0.808
P4	0.791	0.793	0.798
Media	0.7985	0.78875	0.806

Fonte: autora.

Figura 5.6: Espessura das pastilhas.

	WC-Co	TiAlN (AA)	TiAlN (BA)
Espessura (mm)	4.771	4.771	4.762

Fonte: autora.

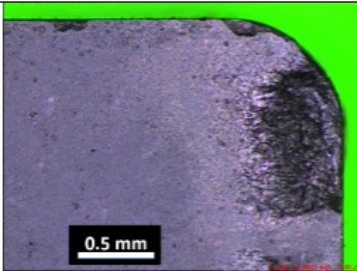
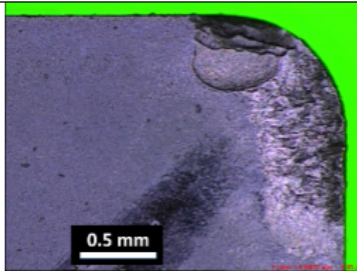
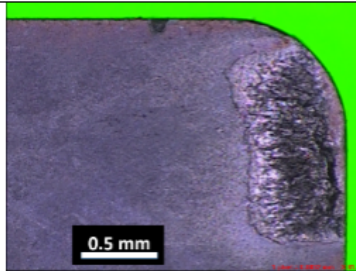
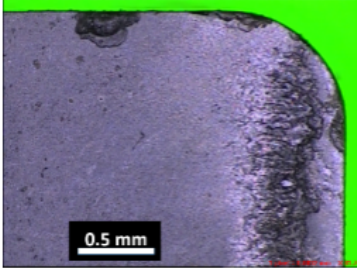
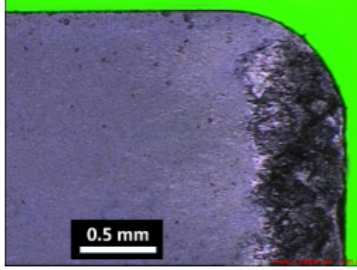
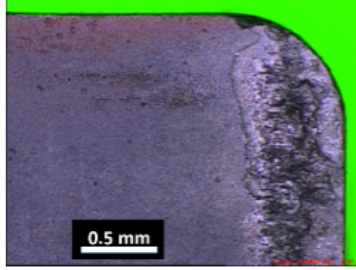
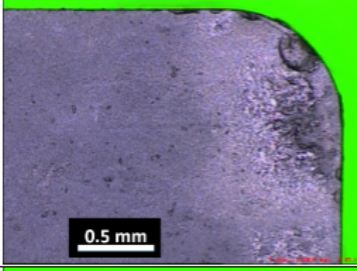
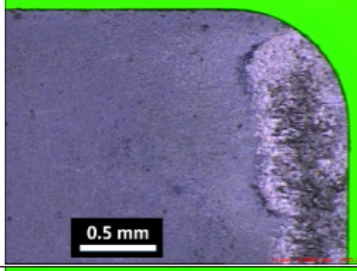
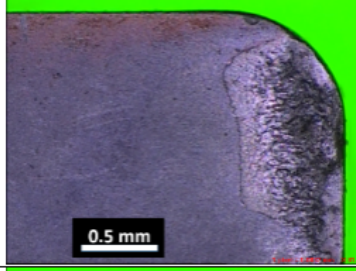
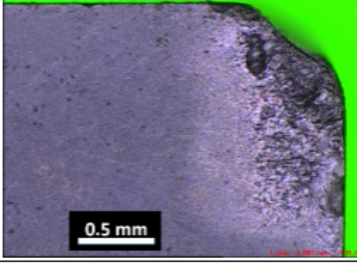
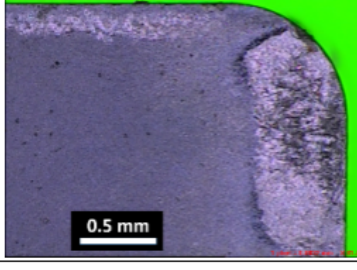
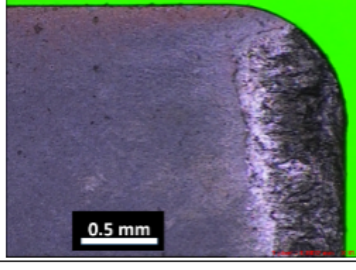
5.4 Microscopia Ótica das áreas desgastadas

As amostras já foram obtidas com alguns lascamentos. Onde pode-se observar regiões claras e escuras. A Figura 5.7 mostra um comparativo das três pastilhas desgastadas em estudo via máquina ótica. Observa-se que não houve muitas modificações com relação às áreas de uma forma geral. Comparando-a por coluna não há um aumento linear, as áreas são semelhantes onde o cavaco vai atingir a mesma região de cratera. No recobrimento com baixo teor de alumínio observa-se que o contorno bem mais definido o que pode indicar uma profundidade de cratera maior.

A partir das imagens da máquina ótica, obtiveram-se as imagens coloridas pelo software MetaVision, conforme a Figura 5.8. Essas imagens geradas pelo MetaVion são imagens obtidas por uma lente maior de aumento (L1).

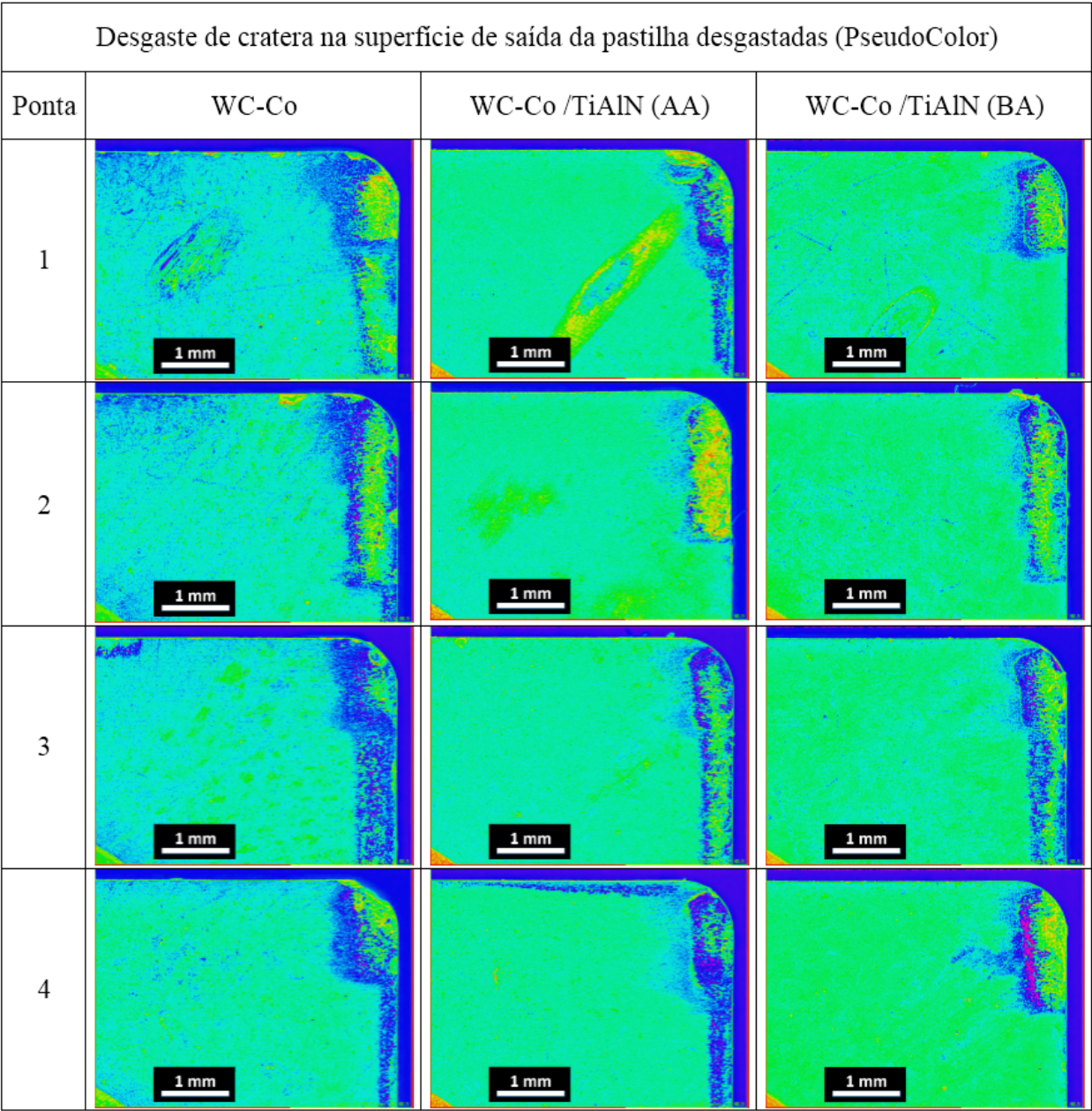
As Figuras 5.9, 5.10 e 5.11 mostram imagens das pastilhas WC-Co, TiAlN (AA) e (BA), respectivamente. As três imagens foram importantes para a edição de imagem no software Paint, pois foram observadas e selecionadas manualmente separando-se as áreas pertencentes a pastilha, ao desgaste de cratera e a área com o material deslocado da pastilha. As imagens editadas que foram essenciais como entrada de dados no código computacional desenvolvido para quantificar as áreas afetadas pelo desgaste da ferramenta de corte.

Figura 5.7: Comparativo do desgaste de cratera na superfície de saída das três ferramentas de corte WC-Co, WC-Co revestida com TiAlN (AA) e WC-Co revestida com TiAlN (BA) depois da usinagem.

Desgaste de cratera na superfície de saída da pastilha desgastadas			
Ponta	WC-Co	WC-Co /TiAlN (AA)	WC-Co /TiAlN (BA)
1			
2			
3			
4			

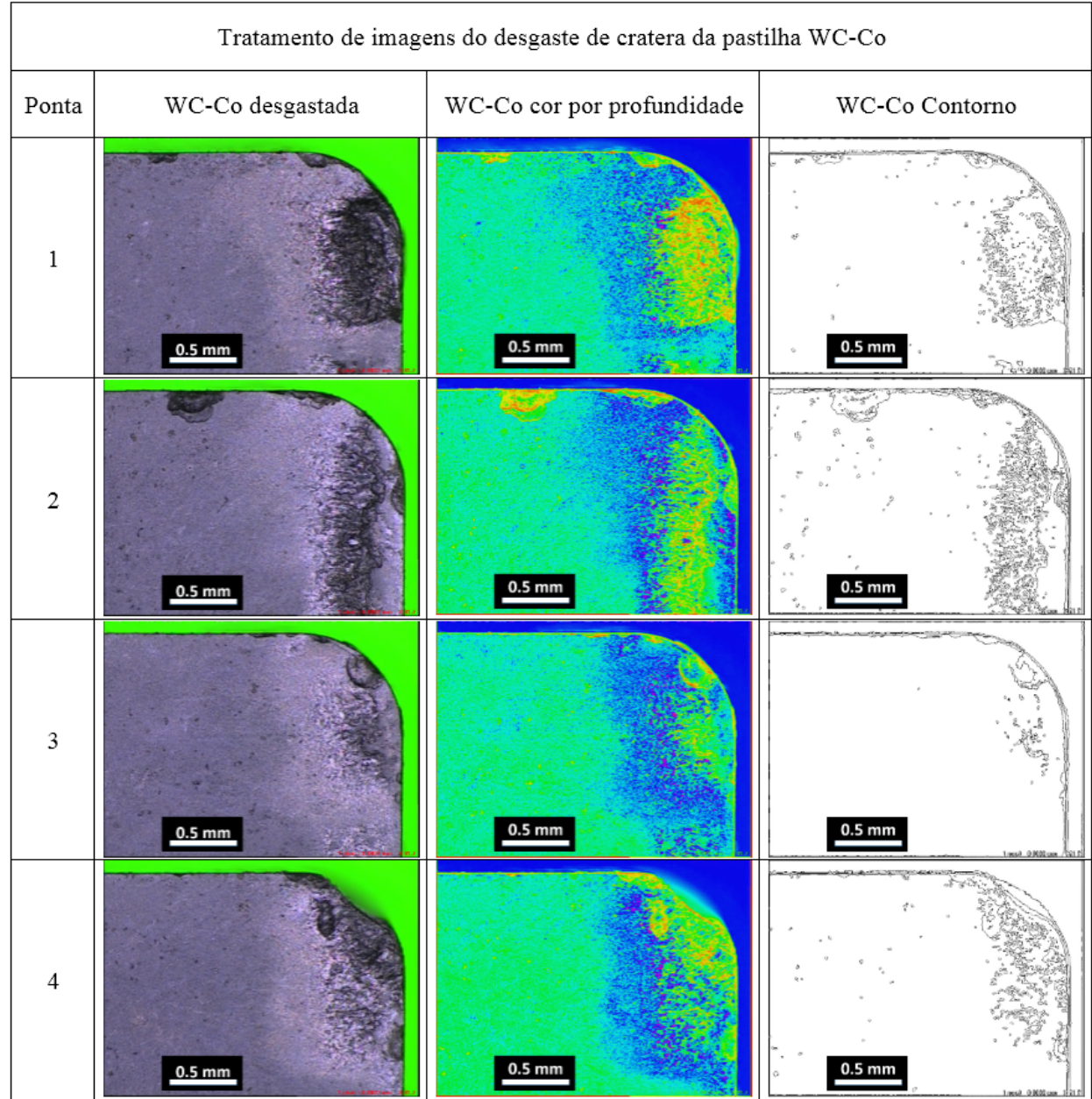
Fonte: autora.

Figura 5.8: Comparativo do desgaste de cratera com variação de cor de acordo com a profundidade das três ferramentas de corte WC-Co, WC-Co revestida com TiAlN (AA) e WC-Co revestida com TiAlN (BA) depois da usinagem.



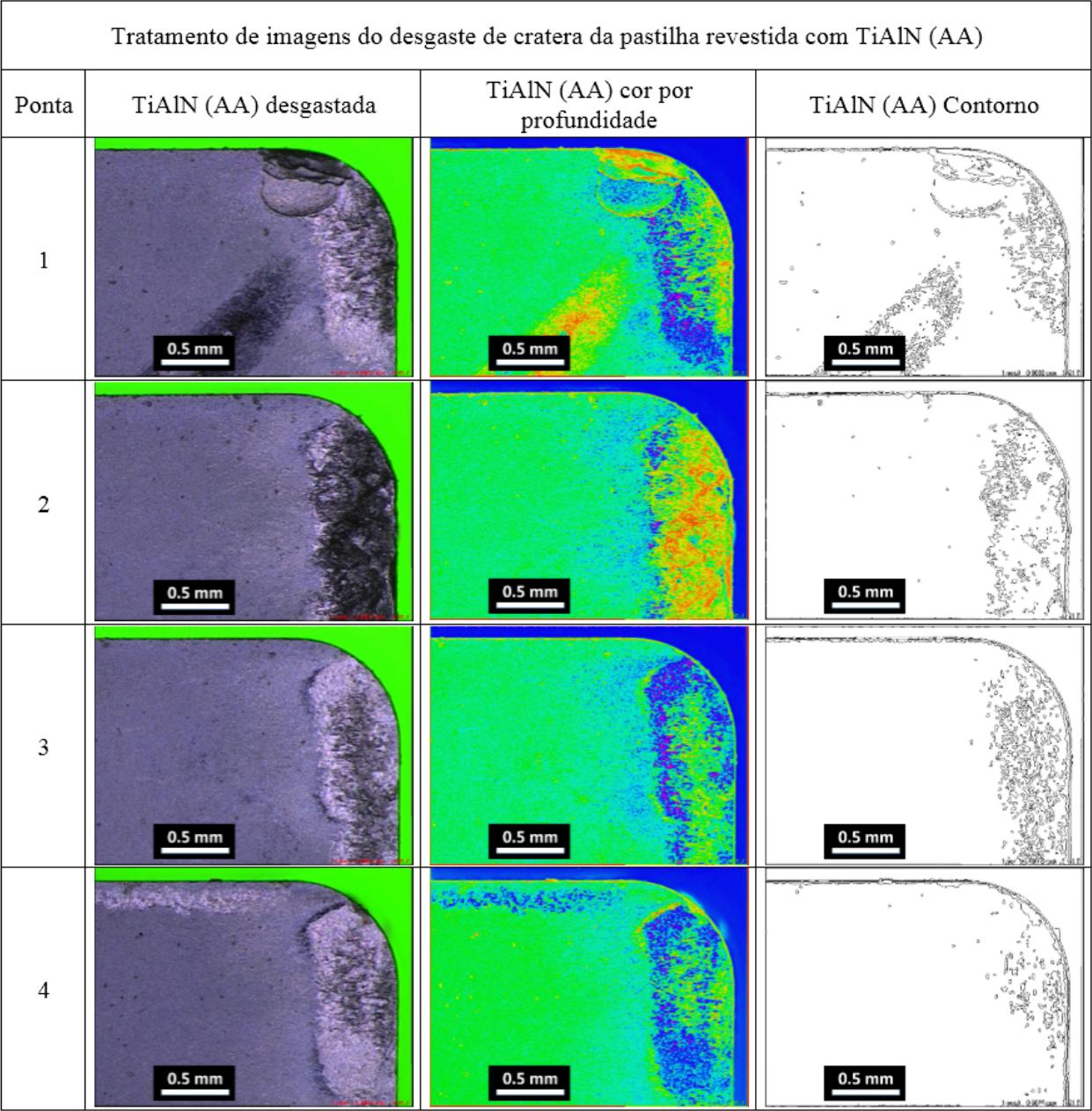
Fonte: autora.

Figura 5.9: Comparativo do tratamento de imagens do desgaste de cratera da ferramenta de corte WC-Co sem revestimento depois da usinagem.



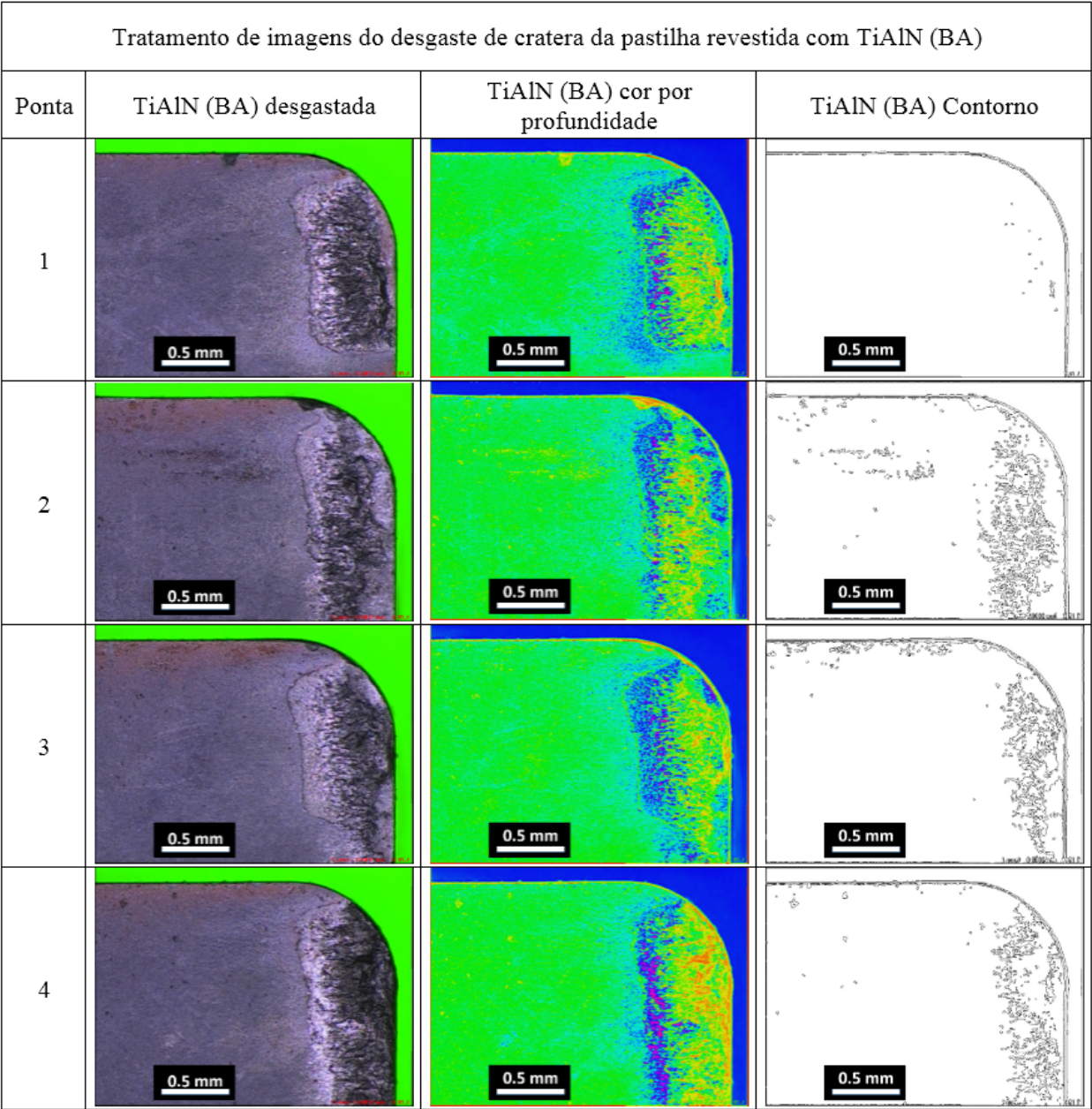
Fonte: autora.

Figura 5.10: Comparativo do tratamento de imagens do desgaste de cratera da ferramenta de corte WC-Co revestida com TiAlN (AA) depois da usinagem.



Fonte: autora.

Figura 5.11: Comparativo do tratamento de imagens do desgaste de cratera da ferramenta de corte WC-Co revestida com TiAlN (BA) depois da usinagem.



Fonte: autora.

Conforme pode-se observar na Figura 5.12 e 5.13, o estudo separado dos valores da área de cratera e de área deslocada não são conclusivos, pois o aumento da distância usinada gradativamente por ponta não tem uma relação direta com o aumento da área de desgaste, e isto pode ser comprovado com valores independentes por ponta de recobrimento.

Em contrapartida, a Área Total Desgastada tem uma relação direta com a diminuição da área a partir do aumento da dureza. Os valores nas tabelas da área desgastada total, referente a soma da área de cratera e deslocada, são menores para TiAlN (AA) em uma média de $0,86\text{mm}^2$ e TiAlN (BA) possui valores em média de $0,95\text{mm}^2$. Por outro lado, a pastilha WC-Co possui um valor médio de $1,70\text{mm}^2$ de área desgastada total.

Observando a porcentagem de Área de Cratera e Área Deslocada, nota-se que no WC-Co a maior contribuição da área desgastada dá-se pela Área Total deslocada que é em média de 73%, o que não acontece quando algum recobrimento está presente. Pode-se dizer, portanto, que uma ferramenta com dureza elevada apresente uma maior resistência ao deslocamento de material do que uma ferramenta sem recobrimento.

A região desgastada, que abrange tanto a região da cratera quanto a região do material deslocado, indica, em valores médios, que o recobrimento AA é mais resistente ao desgaste. Relacionando a porcentagem de AA $[(0,86-1,70)\times 100]=-49,4\%$ e BA $[(0,95-1,70)\times 100]=-44,1\%$ com a pastilha de WC-Co, tem-se que o recobrimento mais duro AA acarretou em uma diminuição de área desgastada em 49,4% e o BA diminuiu o desgaste total em 44,1%.

Figura 5.12: Áreas de desgaste em mm obtidas pelo Wolfram e a porcentagem da área de cratera e área de deslocamento com relação a área desgastada total comparação de desempenho das ferramentas.

P1	Área Cratera (mm ²)	%	Área Deslocada (mm ²)	%	Área Desgastada (mm ²)
WC-Co	0.50	25	1.50	75	2.00
TiAlN (AA)	0.33	42	0.45	58	0.78
TiAlN (BA)	0.54	62	0.33	38	0.87

P2	Área Cratera (mm ²)	%	Área Deslocada (mm ²)	%	Área Desgastada (mm ²)
WC-Co	0.76	42	1.04	58	1.80
TiAlN (AA)	0.75	77	0.22	23	0.97
TiAlN (BA)	0.66	67	0.32	33	0.98

P3	Área Cratera (mm ²)	%	Área Deslocada (mm ²)	%	Área Desgastada (mm ²)
WC-Co	0.24	16	1.24	84	1.48
TiAlN (AA)	0.55	65	0.30	35	0.85
TiAlN (BA)	0.53	56	0.41	44	0.94

P4	Área Cratera (mm ²)	%	Área Deslocada (mm ²)	%	Área Desgastada (mm ²)
WC-Co	0.40	26	1.13	74	1.53
TiAlN (AA)	0.27	33	0.56	67	0.83
TiAlN (BA)	0.63	64	0.36	36	0.99

Fonte: autora.

Figura 5.13: Áreas de desgaste em mm obtidas pelo Wolfram e a porcentagem da área de cratera e área de deslocamento com relação a área desgastada total para análise de desempenho das ponta de cada ferramenta de corte.

WC-Co	Área Cratera (mm ²)	%	Área Deslocada (mm ²)	%	Área Desgastada (mm ²)
P1	0.50	25	1.50	75	2.00
P2	0.76	42	1.04	58	1.80
P3	0.24	16	1.24	84	1.48
P4	0.40	26	1.13	74	1.53
Media	0.48	27	1.23	73	1.70

TiAlN (AA)	Área Cratera (mm ²)	%	Área Deslocada (mm ²)	%	Área Desgastada (mm ²)
P1	0.33	42	0.45	58	0.78
P2	0.75	77	0.22	23	0.97
P3	0.55	65	0.30	35	0.85
P4	0.27	33	0.56	67	0.83
Media	0.48	54	0.38	46	0.86

TiAlN (BA)	Área Cratera (mm ²)	%	Área Deslocada (mm ²)	%	Área Desgastada (mm ²)
P1	0.54	62	0.33	38	0.87
P2	0.66	67	0.32	33	0.98
P3	0.53	56	0.41	44	0.94
P4	0.63	64	0.36	36	0.99
Media	0.59	62	0.36	38	0.95

Fonte: autora.

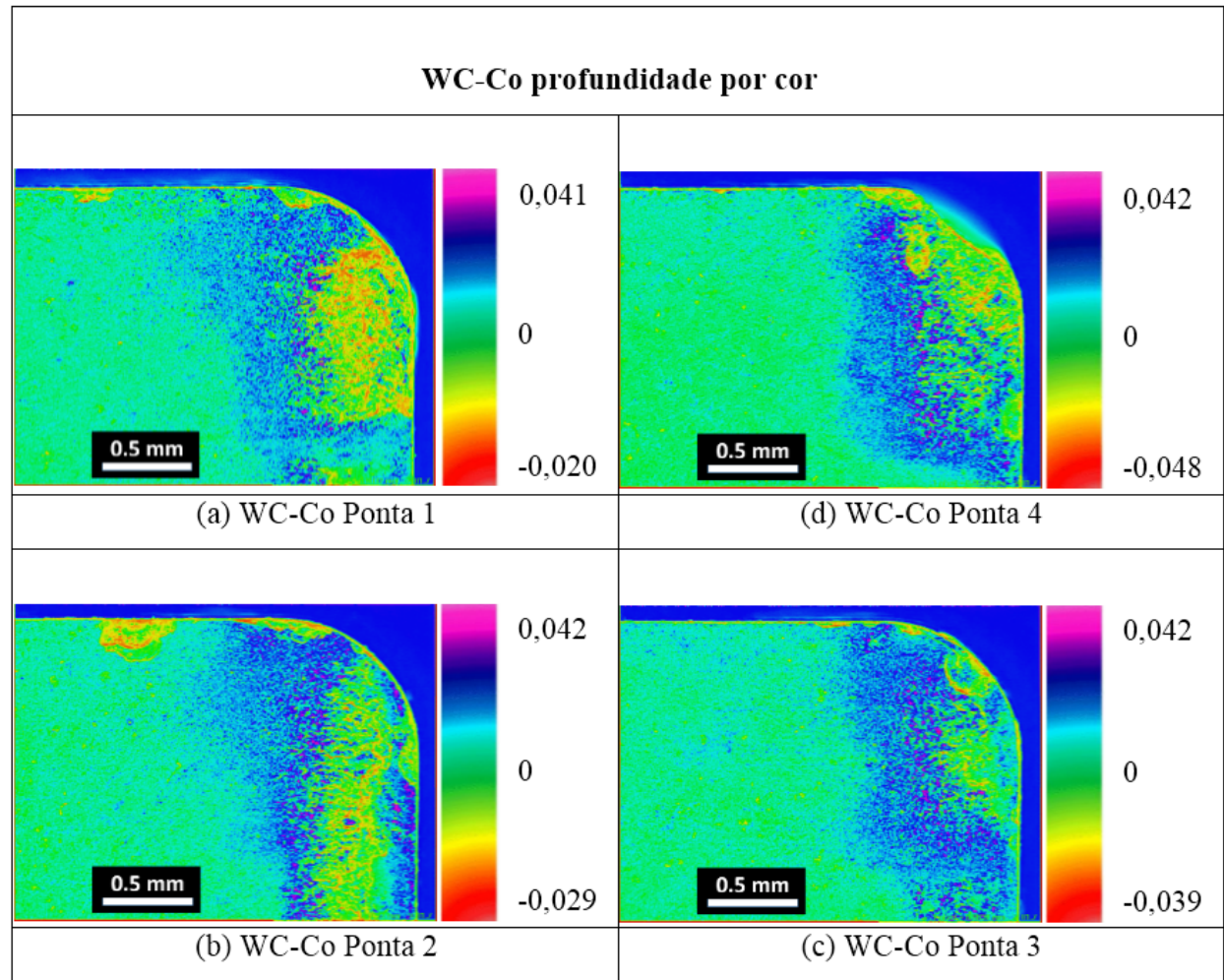
A profundidade de cratera é também uma variável essencial para avaliação do desgaste, visto que somente a área, região na ferramenta de corte onde o cavaco tende a atingir sempre o mesmo lugar, não consegue avaliar o desempenho como um parâmetro gradativo de desgaste nas ferramentas em relação a distância de usinagem. As Figuras 5.14, 5.16 e 5.18 mostram as profundidades de cratera e a altura do deslocamento do material por uma escala de cor. Os dados de profundidade mínima de cratera e da altura máxima deslocada das pastilhas, por distância de usinagem estão mostrados nas Figuras 5.15, 5.17 e 5.19.

Pode-se observar nas tabelas que a profundidade de cratera apresenta-se como um parâmetro gradativo em relação ao tempo de usinagem e as alturas de deslocamento do material permanecem bem uniforme. No início já deslocou material e desloca-se somente a uma certa quantidade de material e as alturas máximas de deslocamento do material permanecem bem uniforme.

Inicialmente, pode-se notar que as alturas máximas deslocadas são constantes para todas as distâncias usinadas representadas por P1 a P4. Entretanto, quando comparadas entre as pastilhas, a maior altura foi atribuída ao WC-Co, de $41\mu\text{m}$, contra valores de AA ($37\mu\text{m}$ m) e BA ($34\mu\text{mm}$), respectivamente, que por possuírem valores muito próximos um do outro, pode-se até considerá-los sendo os mesmos.

BA possui uma espessura um pouco menor que AA na sua geometria, de valores bastante similares também, sendo (BA) 4,762mm e (AA) 4,771mm. Contudo, o referencial do ponto de origem da coordenada (0,0,0) foi alterado, sendo despresível para o objetivo do estudo, quando o foco foi selecionado na pastilha. Isso quer dizer que mesmo que AA tenha maior valor de deslocamento com relação a BA, não significa que AA se deslocou mais.

Figura 5.14: Comparativo das pontas do WC-Co sem revestimento com escala de profundidade.



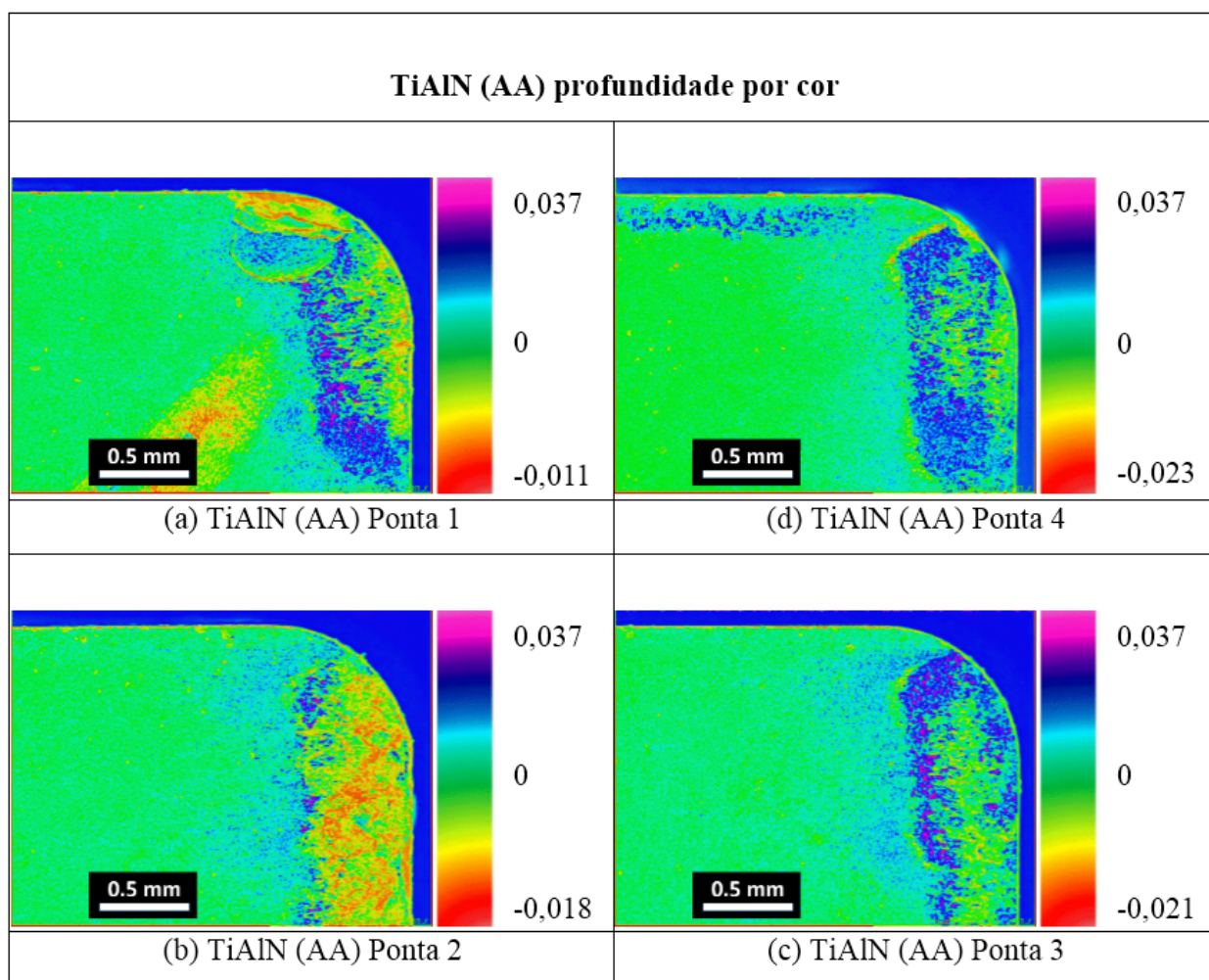
Fonte: autora.

Figura 5.15: WC-Co Volume.

WC-Co	Mínimo Cratera (mm)	Máximo Deslocada (mm)
P1	-0.020	0.041
P2	-0.029	0.042
P3	-0.039	0.042
P4	-0.048	0.042

Fonte: autora.

Figura 5.16: Comparativo das pontas do TiAlN (AA) com escala de profundidade.



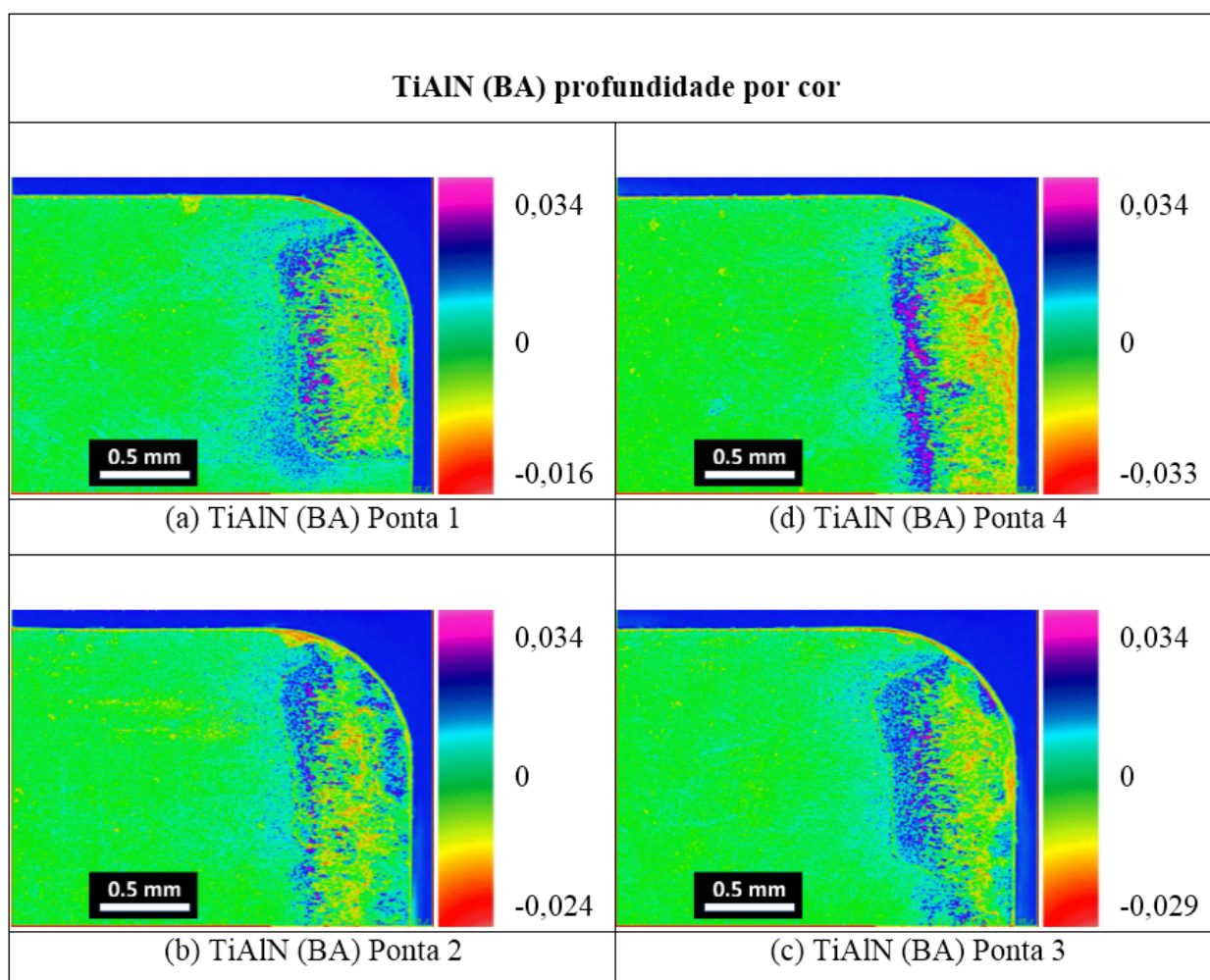
Fonte: autora.

Figura 5.17: TiAlN (AA) Volume.

TiAlN (AA)	Mínimo Cratera (mm)	Máximo Deslocada (mm)
P1	-0.011	0.037
P2	-0.018	0.037
P3	-0.021	0.037
P4	-0.023	0.037

Fonte: autora.

Figura 5.18: Comparativo das pontas do TiAlN (BA) com escala de profundidade.



Fonte: autora.

Figura 5.19: TiAlN (BA) Volume.

TiAlN (BA)	Mínimo Cratera (mm)	Máximo Deslocada (mm)
P1	-0.016	0.034
P2	-0.024	0.034
P3	-0.029	0.034
P4	-0.033	0.034

Fonte: autora.

Esses valores de altura máxima deslocada também não são uma variável que monitora o desgaste com a distância usinada, visto que são constantes para cada pastilha em todos os pontos.

Agora, analisando as profundidades das crateras, tem-se a evolução do desgaste observando-se os valores que vão aumentando linearmente com a distância percorrida com a ferramenta durante a usinagem.

Por esse motivo, as análises foram feitas por um método mais confiável utilizando-se uma regressão linear para determinar a taxa de desgaste de cratera baseada na equação da reta: $y=ax+b$. Onde a é o coeficiente angular que mede o aumento ou redução em y para cada aumento de uma unidade em x ($\mu\text{m}/\text{mm}$) e determina a inclinação de reta no gráfico. E b é o coeficiente linear, também chamado intercepto, referente ao valor de y quando x for zero. Portanto, tem-se para WC-Co: $y=-9,4x-10,5$; AA: $y=-3,9x-8,5$ e BA: $y=-5,6x-11,5$.

O gráfico da Figura 5.20 mostra as três retas ajustadas para cada pastilha. Nota-se que a pastilha de WC-Co obteve o maior desgaste entre todos os analisados e que o AA teve o menor desgaste. Da regressão linear para cada pastilha pode-se determinar as taxas de desgaste de cratera. Sendo assim, as taxas são as seguintes:

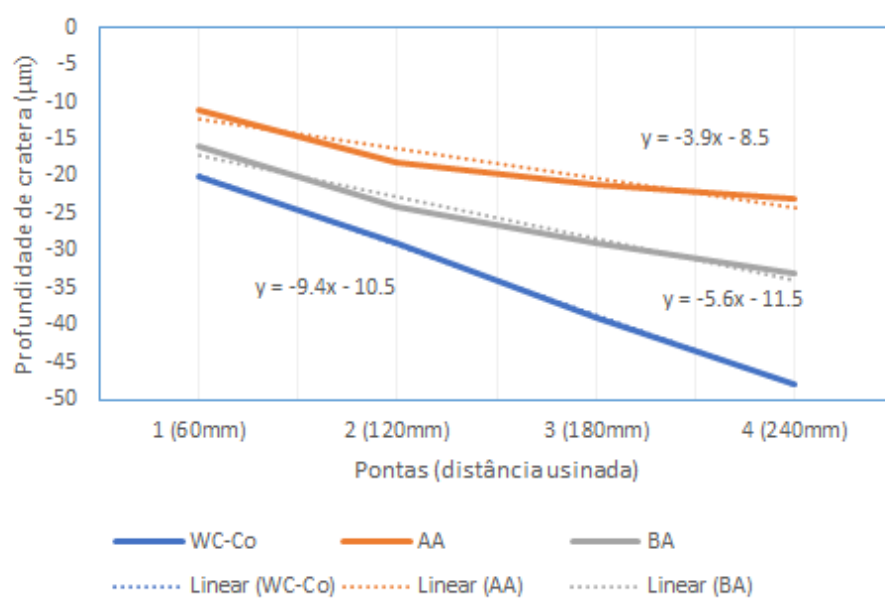
$$\text{WC} = -9,4 \mu\text{m}/\text{mm} \text{ — } 100\%;$$

$$\text{BA} = -5,6 \mu\text{m}/\text{mm} \text{ — } 40\%;$$

$$\text{AA} = -3,9 \mu\text{m}/\text{mm} \text{ — } 58\%.$$

Contudo, nota-se que o recobrimento mais duro tem a menor taxa de desgaste. Em comparação com o WC e BA reduziu esta taxa em 40% e AA em 58%.

Figura 5.20: Taxa de desgaste de cratera por regressão linear.



Fonte: autora.

Resumindo tem-se:

Microdureza para carga de 0,5kgf:

- WC-Co – 1124 HV
- AA – 1802 HV → 60% mais duro que WC → 2 fases CFC + HC → 2 μ m (espessura do recobrimento)
- BA – 1475 HV → 23% mais duro que WC → 1 fase CFC → 3 μ m (espessura do recobrimento)

Área deslocada:

- WC-Co – 1,70 mm²
- AA – 0,86 → 49,4% menor que WC-Co
- BA – 0,95 → 44,1% menor que WC-Co

Profundidade de cratera:

- WC-Co – -9,4 μ m/mm
- AA – -3,9 μ m/mm → 58% menor que WC-Co
- BA – -5,6 μ m/mm → 40% menor que WC-Co

Alturas

- WC – 0,41 mm
 - AA – 0,37 mm
 - BA – 0,34 mm
- } Consideradas iguais → mais duro, menos deformação.

6 CONCLUSÕES

Este capítulo trata-se das conclusões referentes à uma pastilha sem recobrimento (WC-Co) e duas pastilhas com recobrimento de TiAlN misturados em concentrações diferentes.

Com a finalidade de melhorar o desempenho de uma ferramenta de Carboneto de tungstênio, foi utilizada a técnica de PVD para aumentar suas propriedades mecânicas. Com base nas análises da caracterização das ferramentas o processo de PVD mostrou-se excelente pois não muda a geometria da amostra.

Essa técnica de PVD tem algumas nuances e durante seu processo ela pode variar em suas concentrações de titânio e de alumínio implicando em algumas consequências com vantagens e desvantagens. Uma dessas consequências são as mudanças dos valores de dureza que é o parâmetro diretamente acarretada pela formação de uma nova fase no revestimento do baixo teor de alumínio. Essa nova fase encontrada no difratograma da pastilha com baixo teor de alumínio (BA) diferencia os dois recobrimentos, pois essa fase não existe no recobrimento com alto alumínio (AA). A formação dessa fase deve ser evitada se a finalidade do recobrimento de TiAlN for aumentar a resistência ao desgaste na ferramenta de corte.

O desgaste de cratera é uma fonte de comparação adequada, mas é difícil de se quantificar. Existem várias técnicas separadas para estudar o desgaste de cratera. A técnica utilizada no presente trabalho foi por microscopia ótica com recursos de programas computacionais para o tratamento de imagens e para a quantificação de áreas de desgaste foi criado um código computacional dentro do Wolfram que possibilita adaptações da rotina.

Com os resultados numéricos das áreas desgastadas, pode-se observar que os valores da área desgastada total, referente a soma das áreas de cratera e deslocada, são menores para a pastilha mais dura de alto teor de alumínio em uma média aproximada de $0,85\text{mm}^2$. Já a segunda pastilha mais dura (BA) possui valores aproximados em torno de 1mm^2 . Finalmente, a pastilha sem recobrimento (WC-Co), a mais macia, apresenta valores maiores que $1,50\text{mm}^2$ de área desgastada total.

Além disso, observa-se que na ferramenta de corte a região de saída do cavaco tende a manter-se constante, pois o cavaco vai atuar sempre na mesma região. É como se o cavaco formasse sempre a mesma impressão, analisando apenas no plano bidimensional, pois observa-se na avaliação de área de cratera e deslocada valores contínuos entre si. Por esse motivo, o cálculo da área somente não é o parâmetro mais adequado para avaliar o desgaste de cratera. O parâmetro ideal para esse estudo foi a profundidade de cratera, pois nas análises a profundidade de cratera apresenta-se como um parâmetro gradativo em relação ao tempo de usinagem.

No cálculo de profundidade observa-se uma relação direta com distância de deslocamento. Comparando-se as três pastilhas tem-se que em relação a pastilha de WC-Co sem recobrimento, os dois recobrimentos possuem melhor resistência mecânica. Quando comparado apenas as pastilhas com recobrimento, AA é mais duro e o BA mais macio. Então é preferível fazer um recobrimento na pastilha de WC-Co, pois é mais resistente ao desgaste. Mas não é qualquer recobrimento de TiAlN que garante o melhor desempenho da ferramenta de corte. Quanto maior a quantidade de alumínio no recobrimento de TiAlN, melhor o desempenho da ferramenta de corte. A profundidade do desgaste de cratera apresentou-se menor para a pastilha com alto teor de alumínio.

No caso do desempenho das pastilhas em estudos, o recobrimento de alto teor de alumínio possui propriedades mecânicas de dureza superior. Avaliando-se o desgaste tanto no estudos de área, quanto de profundidade, o recobrimento de TiAlN (AA) apresentou-se valores menores com uma excelente resistência ao desgaste. Portanto, com base, nos estudos desta pesquisa, pode-se concluir que a ferramenta de corte mais indicada é a pastilha com recobrimento de alto teor de alumínio.

7 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

- Obter com mais precisão os parâmetros de usinagem;
- Utilizar o CNC para a usinagem;
- Escanear a superfície desgastada com o Microscópio de força atômica, o AFM (Atomic Force Microscope) em várias posições na ferramenta de corte e obter uma região média traçando o esboço da cratera;
- Otimizar o procedimento de cálculo do volume no Wolfram calculado através do número de pixels das imagens obtidas pela máquina ótica e tratadas pelo MetaVision. Relacionando em intervalos as cores da escala com a profundidade da cratera. Os intervalos numéricos podem ser obtidos pelo sistema RGB, a abreviatura do sistema de cores formado por Vermelho (Red), Verde (Green) e Azul (Blue) que reproduz diferentes tonalidades de cores em dispositivos eletrônicos. E podem ser calculados criando um código computacional para identificar o pixel referentes a esse intervalo de cores definidos pelo sistema RGB;
- Utilizar o MEV para obtenção da composição química nas ferramentas de corte que podem ter sido depositados na cratera o material da peça durante processo de usinagem para o estudo de desgaste de ferramenta de corte.
- Utilizar ferramentas de corte com outros tipos de recobrimentos ou variando a porcentagem dos elementos químicos composto em recobrimentos ternários.

REFERÊNCIAS

ABELE, 2002 ABELE; DORR, J (2002). Ferramentas de corte protegidas contra a defasagem tecnológica, Máquina e Metais.

ADESTA, 2010 ADESTA; ERRY YULIAN T.; MUATAZ AL HAZZA; MUHAMMAD RIZZA; DELVIS AGUSMAN; E ROSEHAN (2010). Tool Life Estimation Model Based on Simulated Flank Wear during High Speed Hard Turning. In *European Journal of Scientific Research*, pp. 265-278.

ALMEIDA, C. M., 2010 ALMEIDA, C. M, (2010). Avaliação do desgaste da ferramenta de metal duro revestida com TiN no fresamento do aço ABNT 4140 laminado a quente e temperado/revenido. In *Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais. Belo Horizonte*. Dissertação de mestrado no curso de Engenharia Mecânica

AMORIM, H., 2003 AMORIM, H. (2003). Notas de aula do curso ENG03343: Processos de fabricação por usinagem; Parte 7 - Materiais para ferramentas de corte. In . *DEMEC/UFRGS. Porto Alegre*.

ASM, 1989 ASM (1989). Metals Handbook - Machining, vol 16. In *USA*.

ÁVILA, R.F., 2003 ÁVILA, R.F. (2003). Desempenho de ferramentas de metal duro revestidas com Ti-N, Ti-C-N e Ti-Al-N (PAPVD) no torneamento do aço ABNT 4340 temperado e revenido. In *Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte* Tese de doutorado do curso de pós-graduação em Engenharia Metalúrgica.

ÁVILA, R.F., 2013 ÁVILA, R.F.; MANCOSU, R.D.; MACHADO, A.R.; VECCHIO, S.D.; SILVA, R.B.; VIEIRA, J.M. (2013). Comparative analysis of wear on PVD TiN and (Ti_{1-x}Al_x)N coatings in machining process. *Wear of Materials*.

ÁVILA, R.F., 2008 ÁVILA, R.F.; GODOY, C.; ABRÃO, A.M.; LIMA, M.M. (2008). Topographic analysis of the crater wear on TiN, Ti(C,N) and (Ti,Al)N coated carbide tools. *Wear*, 265., pp. 49-56.

ÁVILA, R.F., 2006 ÁVILA, R.F.; ABRÃO, A.M.; GODOY, G.C.D. (2006). The performance of TiN coated carbide tools when turning AISI 8620. In *Journal of Materials Processing Technology*, 179, pp. 161-164.

BAPTISTA, A. L. B., 2010 BAPTISTA, A. L. B.; SOARES, A. R.; NASCIMENTO, I. A. (2010). O Ensaio Metalográfico no controle da qualidade.

BAPTISTA, C., 2011 BAPTISTA, C. (2011). Medidas de Dureza. In *USP, São Paulo*

BOUZAKIS, K.D., 1999 BOUZAKIS, K.D.; VIDAKIS, N.; MICHAILIDIS, N.; LEYED-DECKER, T.; ERKENS, G.; FUSS, G. (1999) Quantification of properties modification and cutting performance of (TiAl)N coating at elevated temperatures. In . *Surface & coating technology v.120-121*, pp. 34-43.

CHIAVERINI, V., 2002 CHIAVERINI, V. (2002). Aços e Ferros Fundidos. In *ABM, São Paulo*.

CIMM, 2015 CIMM (2015). Centro de Informação Metal Mecânica. In *http : //www.cimm.com.br/portal/material_idatico/6565 – conversao – de – unidades – de – dureza*.

- COZACIUC, I., 2000 COZACIUC, I.; SILVA, L. R.; TOGN, M. A. (2000). Ensaio de materiais. In *UFPR, Curitiba*.
- CUNHA, L. S., 2006 CUNHA, L. S.; CRAVENCO, M. P. (2006). Manual Prático do Mecânico. In *Revista, Ampliada e Atualizada, Hemus*.
- DINIZ, A. E., 2006 DINIZ, A. E., MARCONDES, F. C., COPPINI, N. L. (2006) Tecnologia da Usinagem dos Materiais. In *São Paulo, Artliber*.
- ESKILDSSEN, S.S., 1999 ESKILDSSEN, S.S.; FOSS, M.; MATHIASSEN, C. (1999). Plasma CVD process capabilities and economic aspcts. In *Surface & coating technology v.116-119*, pp. 18-24.
- FALCETT, F., A., M., 2005 FALCETT, F., A., M. (2005). ., Tutorial do software Mathematica V5.0 para Windows. In *Universidade Estadual de Campinas - Unicamp*, p. 4.
- FERRARESI, D., 1977 FERRARESI, D. (1977). Fundamentos da Usinagem dos Metais. In *Editora Edgard Blucher Ltda, São Paulo*.
- GARCIA, A., 2008 GARCIA, A.; SPIM, J.A; SANTOS, C. A. (2008). Ensaio dos Materiais, LTC.
- GROOVER, M. P., 2014 GROOVER, M. P. (2014). Introdução aos processos de fabricação. In *1. ed.; Rio de Janeiro; LTC*.
- ISCAR, 2001 ISCAR (2001). . Conceitos básicos de usinagem.
- KENNETH, H., 1998 KENNETH, H.; MATTHEWS, A. (1998). Coatings Tribology: Techniques and Applications in Surface Engineering. In *Tribology Series, 28, Amsterdam*, p 442.

KLOCKE, F., 2007 KLOCKE, F.; SCHROEDER, T.; BOUZAKIS, E. (2007). Manipulation of coating and subsurface properties in reconditioning of WC-Co carbide cutting tools. In *Surface & coating technology v 202*, pp. 1194-1198.

KONING, H. C. KONING, H. C. Ing. Tecnologia de fabricação volume 3.

KONIG, W., 1999 KONIG, W.; KLOCKE, F. (1999). Fertigungsverfahren, Band 1: Drehen, Frasen, Bohren. 6. ed. In *Springer Verlag, Berlin*, p. 471.

KRATOCHVIL, R., 2004 KRATOCHVIL, R. (2004). Fresamento de acabamento em altas velocidades de corte para eletrodos de grafita industrial. In *Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis*, Dissertação de mestrado em engenharia mecânica.

MACHADO, A. R., 2011 MACHADO, A. R.; ABRÃO, A. M.; COELHO, R. T.; SILVA, M. B. (2011) Teoria da Usinagem dos Metais. 2ed. In *Blucher, São Paulo*.

MANCOSU, R. D., 2005 MANCOSU, R. D. (2005). Recobrimento Tribológico Cr-N e Nitretação a Plasma para Melhoria da Resistência à Erosão Cavitacional de um Aço Carbono ABNT 1045: Uma Abordagem Topográfica. In *Universidade Federal de Minas Gerais, UFMG*, Tese de Doutorado do Curso de Pós-Graduação em Engenharia Metalúrgica e de Minas.

MANERA, R. S., 2011 MANERA, R. S.; RODRIGUES, A. R.; MATSUMOTO, H.; GALLEGOS, J.; COELHO, R. T.; SILVA, E. J. (2011). Avaliação do Desempenho do Revestimento da Ferramenta de Corte na Usinagem de Liga Ti6Al4V. In *Caxias do Sul, RS*, VI Congresso Brasileiro de Engenharia de Fabricação.

- MARKUS, W., 2001 MARKUS, W. (2001). Aspectos Tecnológicos da Minimização e Eliminação de Fluido de Corte no Processo de Torneamento com Insertos de Metal-
duro Revestido com TiN. In *Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis*.
- MITSUBISHI, 2005 MITSUBISHI (2005). Mitsubishi Tooling Technology Level 1.
- ORNELAS SANTOS, J.A.B., 2004 ORNELAS SANTOS, J.A.B. (2004). Estudo da aplicação de revestimentos superficiais em Fresas Caracóis. In *PUC*, Dissertação de Mestrado no Curso de Engenharia Mecânica.
- PADILHA, A. F., 2000 PADILHA, A. F. (2000). Materiais de Engenharia: Microestrutura e Propriedades. In *Hemus SA*.
- PANJAN, P., 2008 PANJAN, P. et al. (2008). SEM study of defects in PVD hard coatings using focused ion beam milling. In *Surface and Coating Technology*, v. 202, pp. 2302-2305.
- PECKENER, D., 1977 PECKENER, D.; BERNSTEIN, I.M. (1977). Handbook of Stainless Steels. In *USA. McGraw Hill, Cap. 24*.
- PRENGEL, H.G., 1998 PRENGEL, H.G.; PFOUTS, W. R.; SANTHANAM, A.T. (1998) State of the art in hard coatings for carbide cutting tools. In *Surface & coating technology v.102*, pp. 183-190.
- Sá, V. M., 2010 Sá, V. M. (2010). Avaliação do desgaste da ferramenta de metal duro revestida com TiN no fresamento do aço ABNT4140 temperado e revenido, utilizando duas fresas de diâmetros diferentes. In *Pontifícia Universidade Católica, Minas Gerais, Pós-Graduação em Engenharia Mecânica*.

SANDVIK-COROMANT, 2000 SANDVIK-COROMANT (2000). Tools for Die and Mold Makers. In *Estocolmo*, p. 258.

SCHROETER, R. B., 2002 SCHROETER, R. B.; WEINGAERTNER, W. L. (2002). Tecnologia da Usinagem com Ferramentas de Geometria Definida - Parte 1. In *Apostila. Notas de aula*, p. 355.

SHAW, M. C., 1984 SHAW, M. C. (1984). Metal Cutting Principles. In *Great Britan. Clarendon Press*.

SILVA, A. L., 2008 SILVA, A. L. (2008). Metalografia dos produtos siderúrgicos comuns. In *Blucher, Quarta Edição*.

SILVA, J. K. M., 2008 SILVA, J. K. M. (2008). Desgaste de Aços AISI H13 recobertos com Filmes Finos Ternários $Ti_{1-x}Al_xN$ com Diferentes Estruturas Cristalinas. In *Universidade Federal de Minas Gerais, UFMG*.

SILVA, R.B., 2011 SILVA, R.B.; VIEIRA, J.M.; CARDOSO, R.N.; CARVALHO, H.C.; COSTA, E.S.; MACHADO, A.R.; ÁVILA R.F. (2011). Tool wear analysis in milling of medium carbon steel with coated cemented carbide inserts using different machining lubrication/cooling systems. In *Wear, Volume 271*, pp. 9-10.

STEMMER, C. E., 1995 STEMMER, C. E. (1995). Ferramentas de corte I. 2. ed. In *Florianópolis: Editora da UFSC*, p. 249.

TELES, J.M., 2007 TELES, J.M. (2007). Torneamento de ferro fundido nodular ferritizado com nióbio utilizando ferramenta de metal duro. In *Universidade Federal de Itajubá*, Dissertação de Mestrado.

TORRES, A. R., 2012 TORRES, A. R. (2012). Notas de aula da disciplina Processos de Usinagem do curso de Engenharia Mecânica.

TUBOAÇOS, 2015 TUBOAÇOS (2015). Catálogo de produtos da TUBOAÇOS da Amazônia LTDA.

TRENT, E.M., 2000 TRENT, E.M.; WRIGHT, P.K. (2000). Metal Cutting. 4rd Edition. In *Butteworths-Heinemann Ltda.*

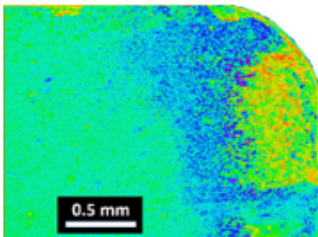
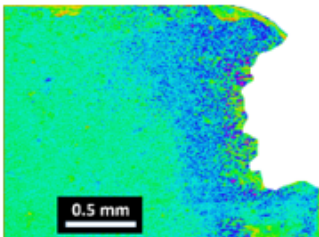
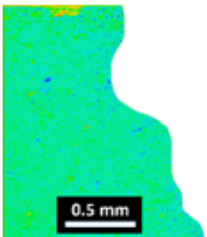
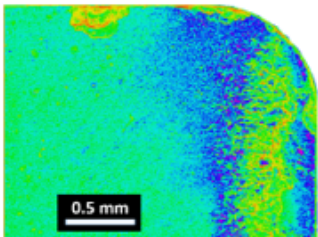
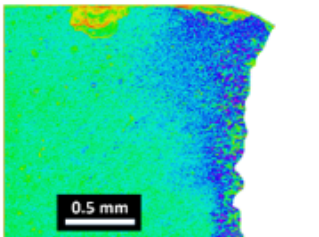
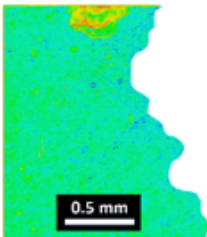
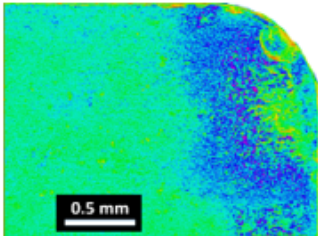
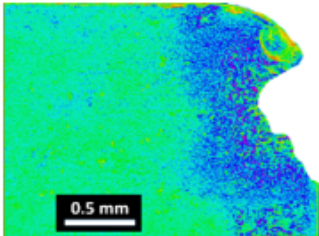
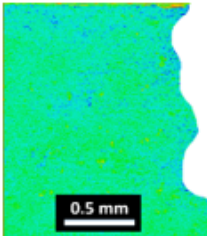
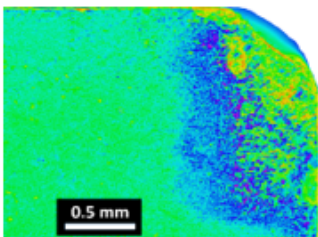
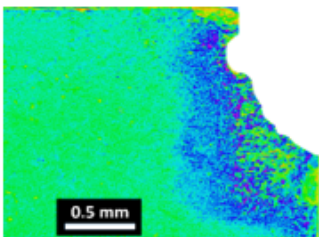
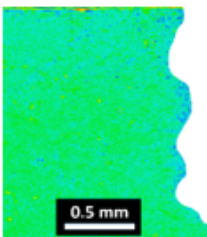
VOORT, G. F. V., 1984 VOORT, G. F. V. (1984). Metallography: Principles and Practice. In *ASM International*.

ZIPPERIAN, D. C., 2015 ZIPPERIAN, D. C. (2015). Metallographic Specimen Preparation. Pace Technologies. In *www.metallographic.com*.

APÊNDICE A

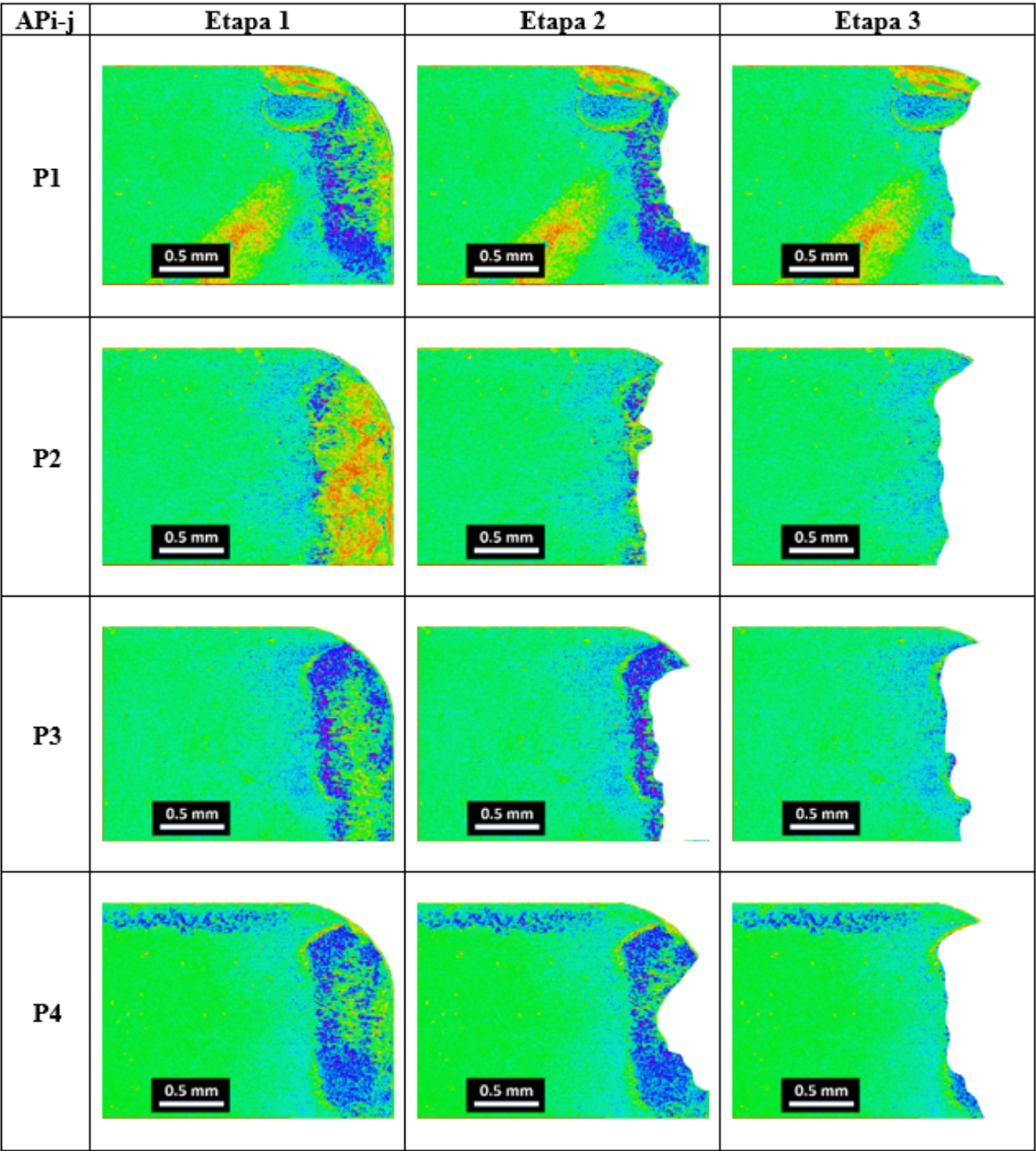
O produto final da edição de imagem, pode ser encontrado na Figura 7.1 que possui três colunas de imagens que correspondem as 3 etapas após edição de imagens. Portanto, a Figura 7.1 mostra imagens da pastilha WC-Co. Da mesma forma que as Figuras 7.2 e 7.3 mostram imagens das pastilhas TiAlN (AA) e (BA), respectivamente. E uma comparação por ponta.

Figura 7.1: Etapas de Edição de Imagens da Pastilha WC-Co para o Wolfram.

WPi-j	Etapa 1	Etapa 2	Etapa 3
P1			
P2			
P3			
P4			

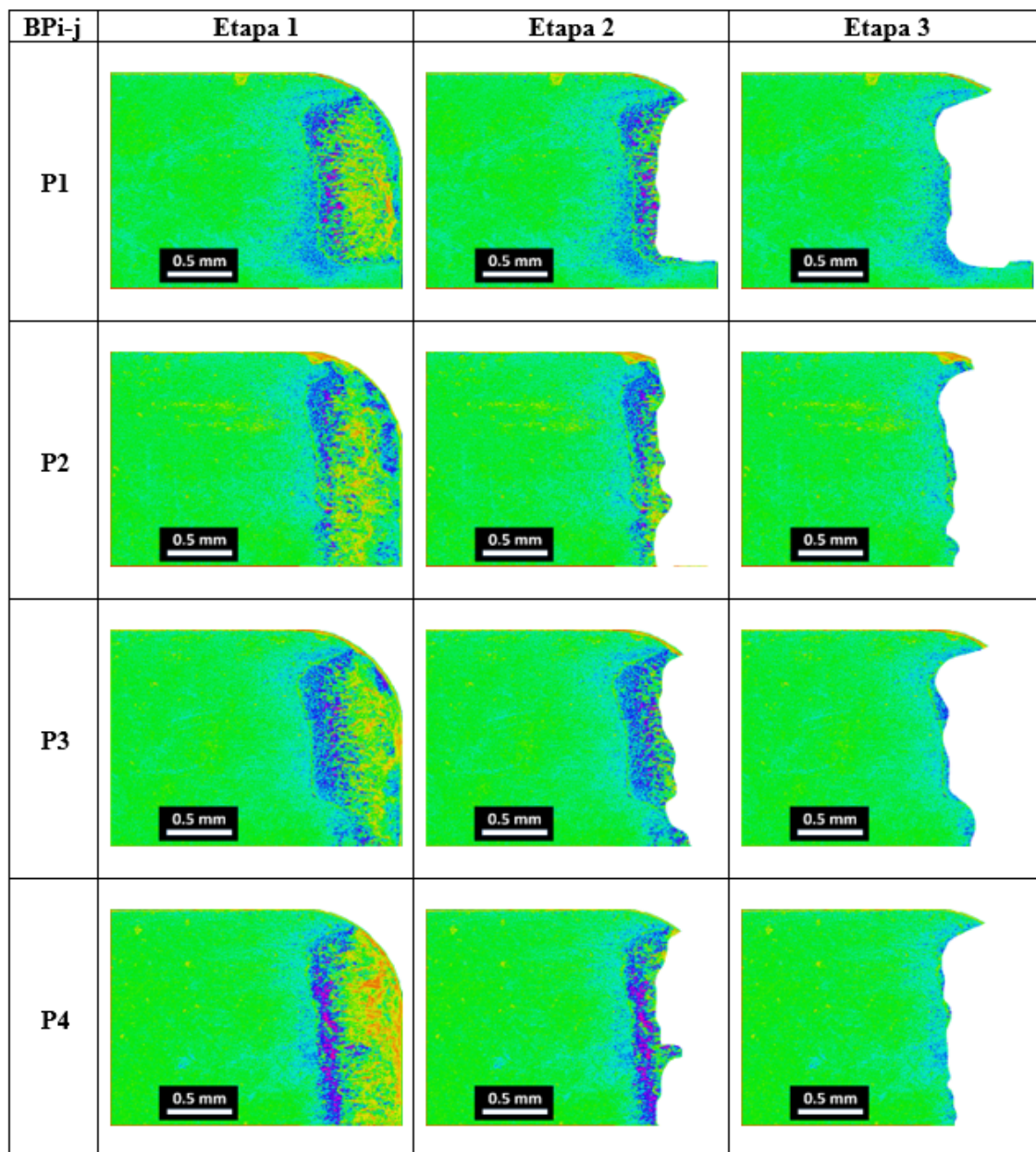
Fonte: Autora.

Figura 7.2: Etapas de Edição de Imagens da Pastilha TiAlN (AA) para o Wolfram.



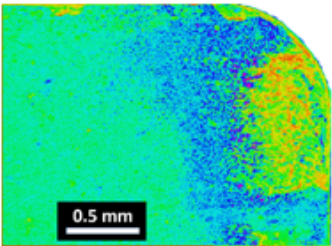
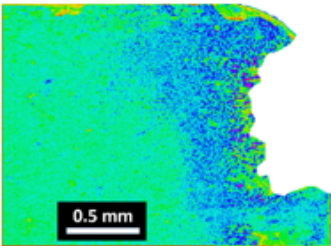
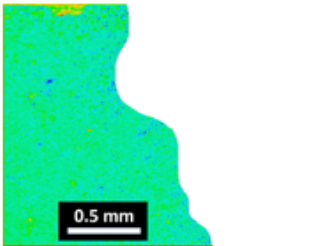
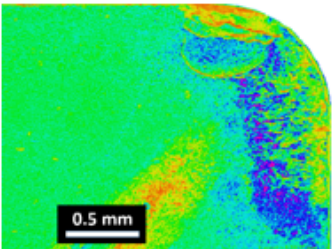
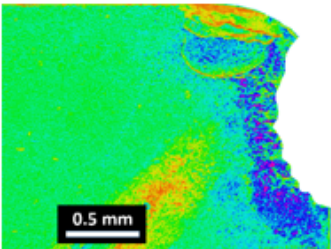
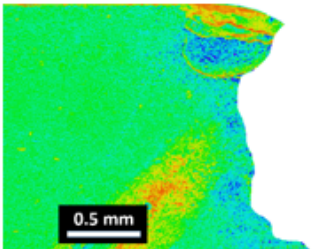
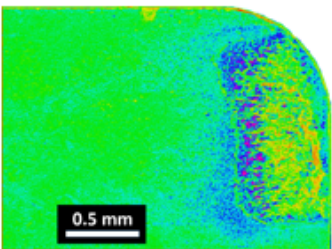
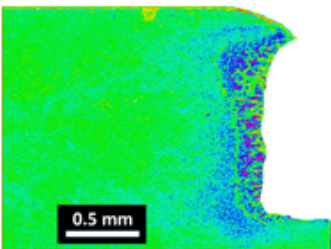
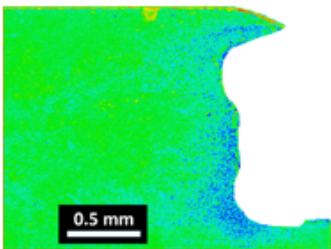
Fonte: Autora.

Figura 7.3: Etapas de Edição de Imagens da Pastilha TiAlN (BA) para o Wolfram.



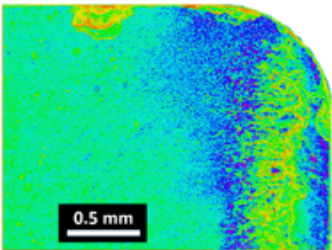
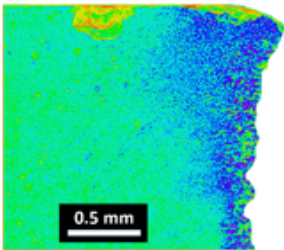
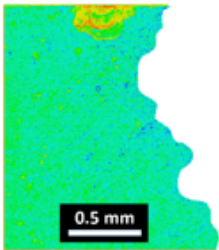
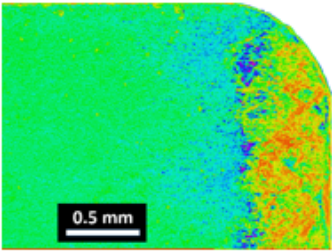
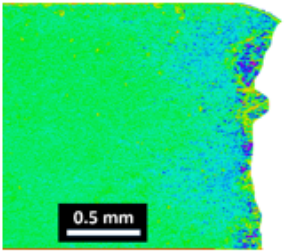
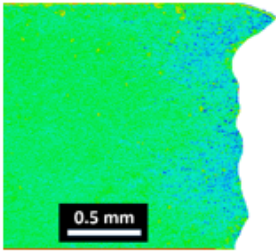
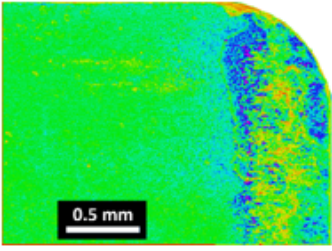
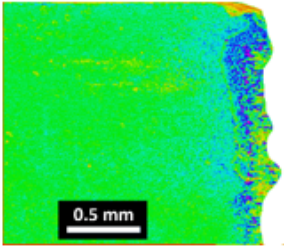
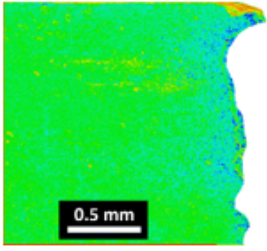
Fonte: Autora.

Comparação P1

P1	Pastilha desgastada (1)	Sem área da cratera (2)	Sem área do deslocam. (3)
WC-Co			
TiAlN (AA)			
TiAlN (BA)			

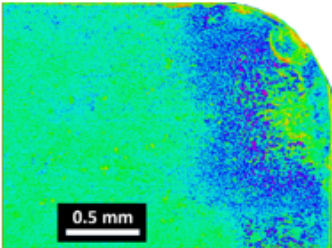
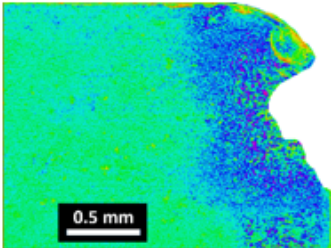
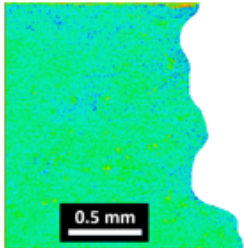
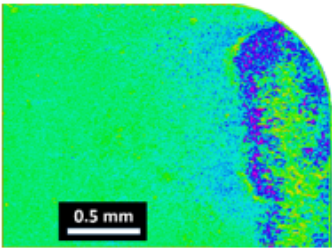
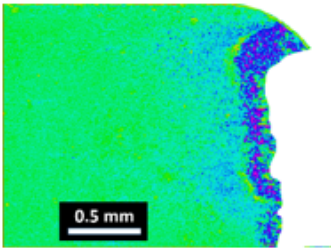
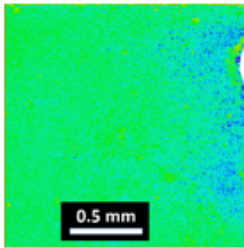
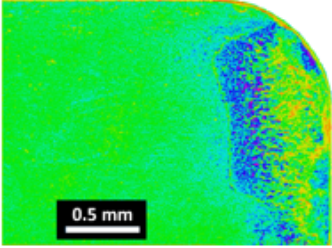
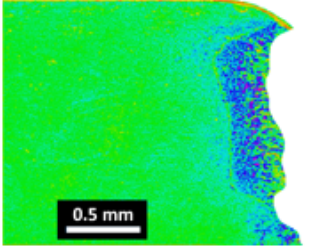
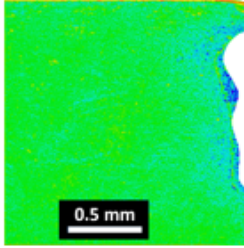
Fonte: Autora.

Comparação P2

P2	Pastilha desgastada (1)	Sem área da cratera (2)	Sem área do deslocam. (3)
WC-Co			
TiAlN (AA)			
TiAlN (BA)			

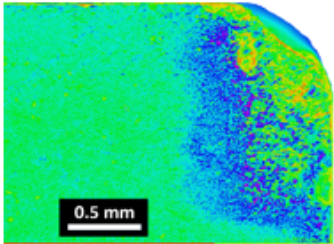
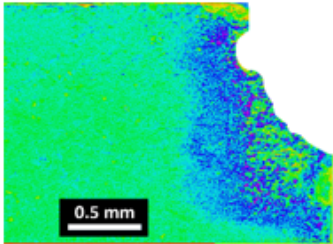
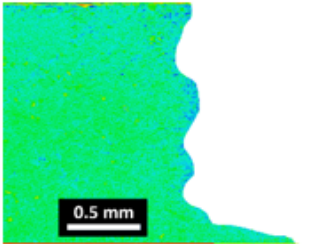
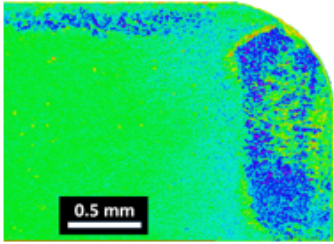
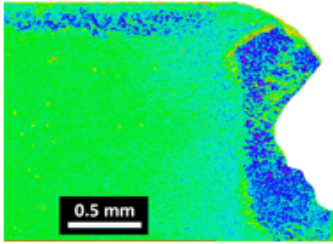
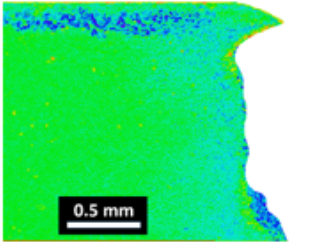
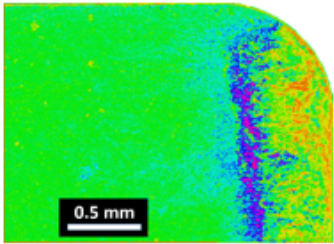
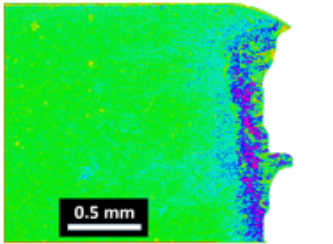
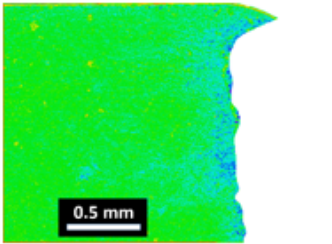
Fonte: Autora.

Comparação P3

P3	Pastilha desgastada (1)	Sem área da cratera (2)	Sem área do deslocam. (3)
WC-Co			
TiAlN (AA)			
TiAlN (BA)			

Fonte: Autora.

Comparação P4

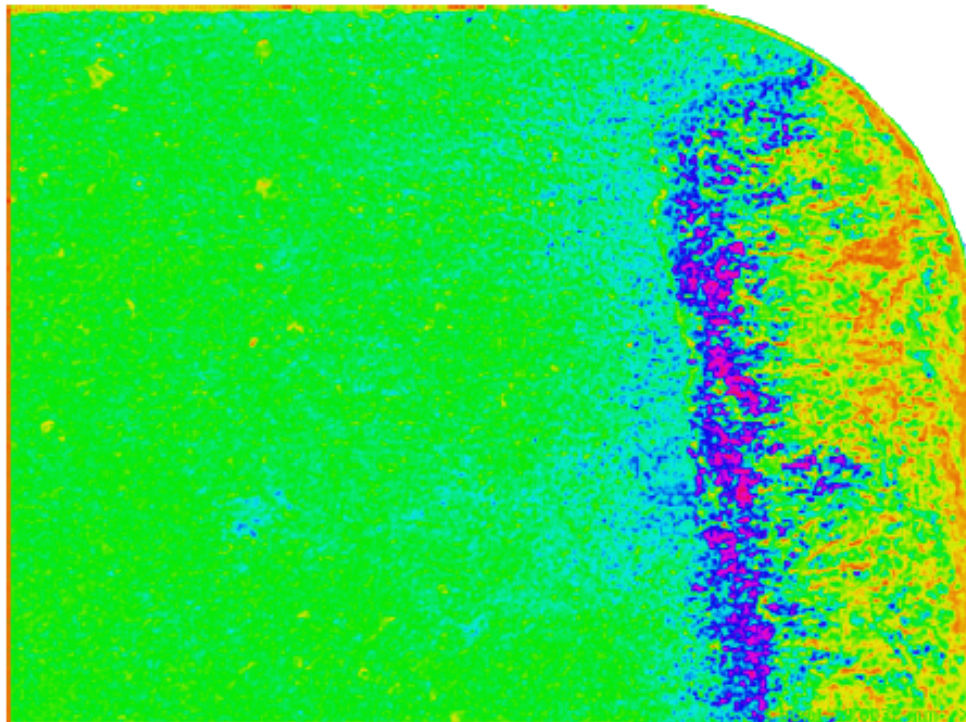
P4	Pastilha desgastada (1)	Sem área da cratera (2)	Sem área do deslocam. (3)
WC-Co			
TiAlN (AA)			
TiAlN (BA)			

Fonte: Autora.

APÊNDICE B

Importar a imagem principal

```
SetDirectory[NotebookDirectory[]];  
Imag01 = Import["BP4-1.bmp"]
```

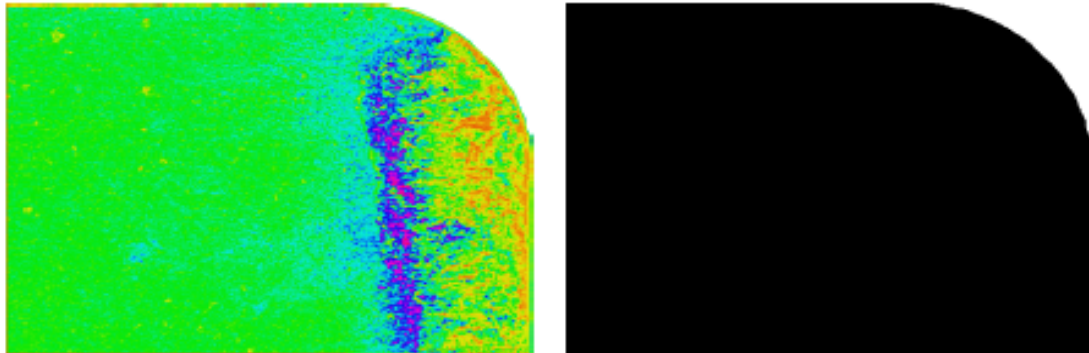


Obter a área da amostra (sem a área branca)

Função do Mathematica Binariza

```
Imag02 = Binarize[Imag01, Norm[# - List@@RGBColor[1, 1, 1]] < .5 &];
```

```
GraphicsGrid[{{Imag01, Imag02}}, ImageSize -> Large]
```



Cálculo do percentual da amostra em relação a área da imagem

```
nivel = ImageLevels[Imag02]
Area1 = nivel[[1, 2]] (*área dos pixels pretos -> área da amostra*)
Area2 = nivel[[2, 2]] (*área dos pixels brancos*)
porcentagemAmostra = (Area1 / (Area1 + Area2)) * 100 (*%*)
{{0, 380.791}, {1, 13.057}}
380.791
13.057
96.6848
```

Cálculo da área da amostra

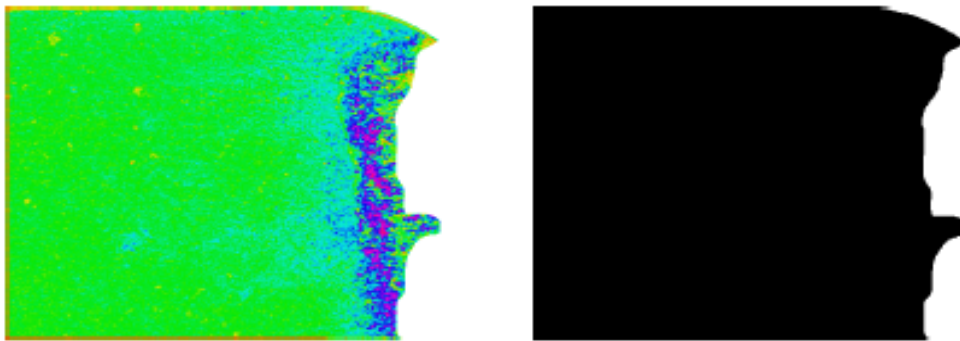
```
AreaTotalImagem = 4.0 (*mm²*)
4.

AreaTotalAmostra = AreaTotalImagem * (porcentagemAmostra / 100) (*mm²*)
3.86739

3.8914167418807226`
3.89142
```

Importar a segunda imagem (sem a área da cratera)

```
Imag04 = Import["BP4-2.bmp"];  
Imag05 = Binarize[Imag04, Norm[# - List@@RGBColor[1, 1, 1]] < .5 &];  
GraphicsGrid[{{Imag04, Imag05}}, ImageSize -> Large]
```



Cálculo do percentual da cratera em relação a área da amostra

```
nivel = ImageLevels[Imag05]  
Area3 = nivel[[1, 2]] (*área do pixels pretos*)  
Area4 = nivel[[2, 2]] (*área do pixels brancos*)  
porcentagemCratera =  $\left( \frac{\text{Area4} - \text{Area2}}{\text{Area1}} // N \right) * 100$  (%%)  
{(0, 318447), (1, 75401)}  
318447  
75401  
16.3722  
  
IntegerName[Area3]  
318 thousand 447
```

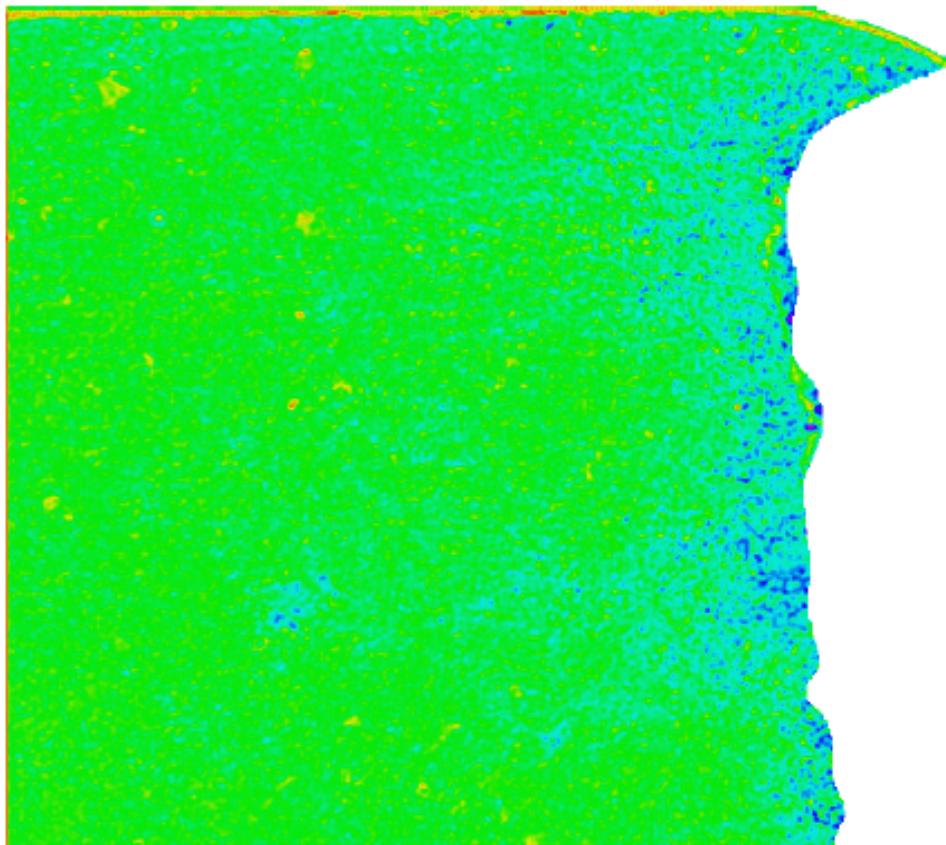
Área da Cratera

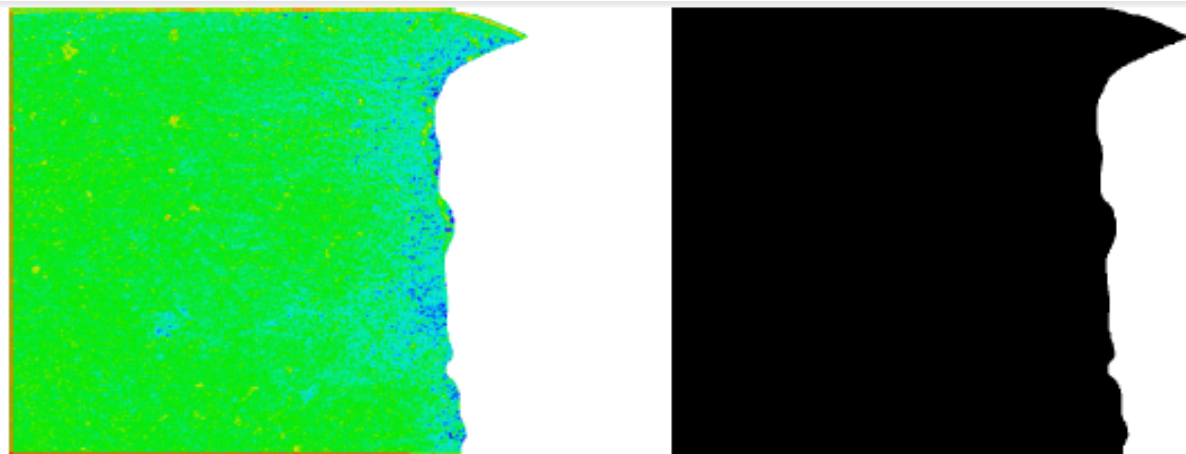
```
AreaCratera = (porcentagemCratera / 100) * AreaTotalAmostra(*mm²*)  
0.633178
```

Importar a terceira imagem

a imagem Importar terceira

```
Imag06 = Import["BP4-3.bmp"]
Imag07 = Binarize[Imag06, Norm[# - List@@RGBColor[1, 1, 1]] < .5 &];
GraphicsGrid[{{Imag06, Imag07}}, ImageSize -> Large]
nivel = ImageLevels[Imag07]
Area5 = nivel[[1, 2]] (*área do pixels pretos*)
Area6 = nivel[[2, 2]] (*área do pixels brancos*)
porcentagemDeslocada =  $\left( \frac{\text{Area6} - \text{Area4}}{\text{Area1}} // N \right) * 100$  (**)
```





```
{{0, 282 547}, {1, 111 301}}
```

```
282 547
```

```
111 301
```

```
9.42774
```

```
AreaDeslocada = (porcentagemDeslocada / 100) * AreaTotalAmostra(*mm2*)
```

```
0.364608
```

```
porcentagemDesgaste =  $\left( \frac{\text{Area6} - \text{Area2}}{\text{Area1}} // N \right) * 100 (**)$ 
```

```
25.8
```

```
AreaDesgastada = (porcentagemDesgaste / 100) * AreaTotalAmostra(*mm2*)
```

```
0.997786
```

```
check = AreaCratera + AreaDeslocada(*mm2*)
```

```
0.997786
```