

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ
DIRETORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

ERIEL BIAGINI SABINO

**CORRELAÇÃO ENTRE AS CARACTERÍSTICAS DE INSERTOS DE METAL
DURO UTILIZADOS NO FRESAMENTO DE FACEAMENTO DO AÇO ABNT 1045
E SUA VIDA ÚTIL**

DISSERTAÇÃO

PONTA GROSSA

2020

ERIEL BIAGINI SABINO

**CORRELAÇÃO ENTRE AS CARACTERÍSTICAS DE INSERTOS DE METAL
DURO UTILIZADOS NO FRESAMENTO DE FACEAMENTO DO AÇO ABNT 1045
E SUA VIDA ÚTIL**

Dissertação apresentada como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Engenharia Mecânica, do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Área de Concentração: Fabricação Mecânica e Materiais.

Orientador: Prof. Dr. Aldo Braghini Junior

PONTA GROSSA

2020

Ficha catalográfica elaborada pelo Departamento de Biblioteca
da Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Campus Ponta Grossa
n.19/20

S113 Sabino, Eriel Biagini

Correlação entre as características de insertos de metal duro utilizados no fresamento de faceamento do aço ABNT 1045 e sua vida útil. / Eriel Biagini Sabino, 2020.

107 f. : il. ; 30 cm.

Orientador: Prof. Dr. Aldo Braghini Junior

Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica. Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Ponta Grossa, 2020.

1. Microestrutura. 2. Fresadoras. 3. Metalurgia do pó. 4. Metais - Propriedades mecânicas. I. Braghini Junior, Aldo. II. Universidade Tecnológica Federal do Paraná. III. Título.

CDD 620.1

Elson Heraldo Ribeiro Junior. CRB-9/1413. 26/03/2020.

FOLHA DE APROVAÇÃO

Título de Dissertação Nº 39/2020

“CORRELAÇÃO ENTRE AS CARACTERÍSTICAS DE INSERTOS DE METAL DURO UTILIZADOS NO FRESAMENTO DE FACEAMENTO DO AÇO ABNT 1045 E SUA VIDA ÚTIL”

Por

Eriel Biagini Sabino

Esta dissertação foi apresentada às **9 horas de 28 de fevereiro de 2020**, na sala de **Reuniões da DIRPPG**, como requisito parcial para a obtenção do título de MESTRE EM ENGENHARIA MECÂNICA, com Área de Concentração em Fabricação Mecânica e Materiais, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica. O candidato foi arguido pela Banca Examinadora, composta pelos professores abaixo assinados. Após deliberação, a Banca Examinadora considerou o trabalho APROVADO.

Prof. Dr. Gelson Biscaia de Souza
(UEPG)

Prof. Dr. Luciano Augusto Lourençato
(UTFPR)

Prof. Dr. Aldo Braghini Junior
(UTFPR)
Orientador e Presidente da Banca



Visto do Coordenador:

Prof. Dr. Gerson Henrique dos Santos
Coordenador do PPGEM
UTFPR – Câmpus Ponta Grossa

Dedico este trabalho aos meus pais
Nilson Sabino (In Memoriam) e Irma Marli
Biagini Sabino, pela ajuda na formação de
meu caráter e pela educação recebida em
minha infância.

AGRADECIMENTOS

Certamente estes parágrafos não irão atender a todas as pessoas que fizeram parte dessa importante fase de minha vida. Portanto, desde já peço desculpas àquelas que não estão presentes entre essas palavras, mas elas podem estar certas que fazem parte do meu pensamento e de minha gratidão.

Agradeço a Deus em primeiro lugar, por me conceder vida, saúde e entendimento para que assim pudesse desenvolver este trabalho, em comunhão com cada uma das pessoas que enriqueceram minha vida, especialmente durante o tempo de permanência na universidade e na realização desta dissertação.

Agradeço ao meu orientador Prof. Dr. Aldo Braghini Junior e também ao Prof. Dr. Anderson Geraldo Marena Pukasiewicz, pela sabedoria com que me guiaram nesta trajetória.

Agradeço ao Prof. Dr. Gelson Biscaia de Souza pelas dúvidas esclarecidas e análises realizadas junto ao equipamento de nanoindentação instrumentado pertencente ao Complexo de Laboratório Multiusuários (C-Labmu) da Universidade Estadual de Ponta Grossa.

Agradeço ao Prof. Dr. Eder Carlos Ferreira de Souza pelo auxílio concedido na obtenção dos resultados na difração de raio-X.

Agradeço ao Prof. Dr. Francisco Carlos Serbena por proporcionar algumas análises de minhas amostras no Complexo de Laboratório Multiusuários (C-Labmu) da Universidade Estadual de Ponta Grossa.

Agradeço ao Prof. Dr. Luciano Augusto Lourençato pela ajuda concedida, dúvidas esclarecidas e motivação na conclusão desta dissertação.

Agradeço aos ex-alunos e hoje Engenheiros formados Juliana Soares de Souza e Tialin Barboza, pois pudemos trabalhar juntos em estudos direcionados a este trabalho.

À minha esposa Simone, pela compreensão, incentivo e carinho dedicados durante a realização do curso.

E por fim, a todos os que por algum motivo ou forma contribuíram para a realização desta pesquisa.

*Com a sabedoria edifica-se a casa, e com
inteligência ela se firma,
pelo conhecimento se encherão as
câmaras de toda sorte de bens preciosos
e deleitáveis.*

*Mais poder tem o sábio do que o forte, e o
homem de conhecimento, mais do que o
robusto.*

*Com medidas de prudência farás a
guerra; e na multidão de conselheiros está
a vitória.*

(Provérbios 24: 3 a 6)

RESUMO

SABINO, Eriel Biagini **Correlação entre as características de insertos de metal duro utilizados no fresamento de faceamento do aço ABNT 1045 e sua vida útil.** 2020. 107f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Ponta Grossa, 2020.

A indústria metal mecânica exige cada vez mais o desenvolvimento dos processos de fabricação, principalmente a modernização das máquinas operatrizes e a evolução constante das ferramentas de corte. A escolha correta das ferramentas de corte e dos parâmetros de usinagem não apenas se torna uma questão de acompanhamento da tecnologia, mas uma necessidade, em razão do aumento da demanda e da redução de custo do processo com garantia da qualidade dos produtos. As ferramentas de metal duro, de diferentes fabricantes apresentam diferenças microestruturais devido às características intrínsecas ao processo de fabricação aos quais são submetidos (metalurgia do pó). A presente pesquisa foi desenvolvida com o objetivo de verificar a relevância destas diferenças microestruturais e das propriedades das ferramentas. A caracterização se baseou na identificação dos elementos e componentes presentes na microestrutura, espessura do revestimento, tamanho médio dos grãos de carboneto, concentração de ligante. Foi constatado que ferramentas de metal duro de fabricantes diferentes, aplicadas em um mesmo processo de usinagem e mesmas classes ISO, possuem variação na granulometria do carboneto de tungstênio e diferenças na dureza, módulo de elasticidade e na tenacidade do substrato e do revestimento. Também foi possível entender alguns motivos que apontam para o ganho de vida útil de uma das ferramentas estudadas em relação a outra.

Palavras-chave: Microestrutura. Fresamento de faceamento. Metal duro. Carboneto de tungstênio. Propriedades mecânicas.

ABSTRACT

SABINO, Eriel Biagini. **Correlation between the characteristics of hard metal inserts used in the face milling of the ABNT 1045 steel casing and its useful life.** 2020. 107p. Thesis (Master Degree in Mechanical Engineering) –Federal University of Technology - Paraná. Ponta Grossa, 2020

The metalworking industry demands more and more the development of the manufacturing processes, mainly the modernization of the machine tools and the constant evolution of the cutting tools. The correct choice of cutting and machining parameters not only becomes a matter of monitoring the technology, but a necessity, due to the increased demand and cost reduction of the process with product quality assurance. The carbide tools, from different manufacturers present microstructural differences due to the characteristics intrinsic to the manufacturing process to which they are subjected (powder metallurgy). The present research was developed with the purpose of verifying the relevance of these microstructural differences and the properties of the tools. The characterization was based on the identification of the elements and components present in the microstructure, thickness of the coating, average size of the carbide grains, concentration of binder. It was found that carbide tools from different manufacturers, applied in the same machining process and the same ISO classes, have variation in the tungsten carbide granulometry and differences in hardness, elastic modulus and in the toughness of the substrate and coating. It was also possible to understand some reasons that point to the useful life gain of one of the tools studies in relation to the other.

Keywords: Microstructure. Face milling. Hard metal. Tungsten carbide. Mechanical properties.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Fresamento de faceamento (frontal ou de topo)	22
Figura 2 - Direção dos movimentos de corte, de avanço e efetivo no fresamento discordante. Ângulos da direção de avanço ϕ, da direção efetiva η e plano de trabalho.	23
Figura 3 - A grandeza 'ap' e a 'ae' no fresamento: (a) tangencial; (b) frontal.	24
Figura 4 - Metal duro 75,5WC- Ligas de substrato 16 (Ta, Ti, Nb)C com 8,5 Co como ligante, com revestimento duro de multicamadas. Reagente Murakami, 1 minuto, 1500 x	33
Figura 5 - Comparação das principais propriedades das coberturas mais utilizadas em metal duro.	33
Figura 6 - Desgaste de flanco em ferramentas de metal duro.....	35
Figura 7 - Desgaste de entalhe em ferramentas de metal duro.	36
Figura 8 - Deformação plástica da aresta de corte de ferramentas de metal duro....	36
Figura 9 - Lascamento provocado em arestas de corte.	37
Figura 10 - Trinca térmica presente em ferramentas de metal duro.....	37
Figura 11 - Microestrutura de um metal duro 97WC-3Co exemplificando a presença de porosidades representadas nas regiões escuras. 1500x.	42
Figura 12 - Representação da curva típica de carga versus profundidade de penetração (carregamento-descarregamento). O ciclo mostra os parâmetros: carga máxima de indentação (P_{max}), profundidade de penetração máxima ($h_{m\acute{a}x}$), profundidade final (h_f), profundidade d.....	43
Figura 13 - Desenho de um corte transversal após teste de carregamento e descarregamento.	45
Figura 14 - Modelo RG.....	47
Figura 15 - OPC Desenho Esquemático do Microfone de Eletreto	50
Figura 16 - Fluxograma de atividades	52
Figura 17 - Orientação de corte das ferramentas dos fabricantes A e B.....	55
Figura 18 - Disposição das amostras cortadas no suporte de prensagem do embutidor	56
Figura 19 - Imagens tratadas para realização do calculo da porcentagem média de WC e Co+poros em amostras do fabricante A	60
Figura 20 - Disposição da indentações em uma matriz 5 x 5, espaçadas em 100 μ m.	63
Figura 21 - Esquema experimental para a OPC utilizado no LAPTO da UTFPR – Ponta Grossa	66
Figura 22 - Corte de uma fatia com espessura de 10mm de aço ABNT 1045	67
Figura 23 - Corte de amostras quadradas de 50 por 50mm.....	68
Figura 24 - Cabeçote de fresador.....	71
Figura 25 - Rotações (a) e avanço por eixo (b) da máquina	72
Figura 26 - Microscopia Eletrônica de Varredura, obtidas por detecção de elétrons retro espalhados (BSE) nas amostras dos fabricantes A (a) e B (b).	75

Figura 27 - Imagens obtida por MEV, Raio de Ponta (a), Corpo da Ferramenta (b) fabricante A	77
Figura 28 - Imagens obtida por MEV, Raio de ponta (a), Corpo da Ferramenta (b) fabricante B	77
Figura 29 - Comparação dos difratogramas - Substrato da ferramenta de fresamento de faceamento dos fabricantes A e B.....	78
Figura 30 - Imagem eletrônica de MEV (a), imagem eletrônica de EDS (b), imagem eletrônica de WC (c) e imagem eletrônica de Co (d) - Fabricante A	79
Figura 31 - Espectro de energia dispersiva gerado por EDS com os elementos químicos presentes no substrato da amostra de ferramenta do fabricante A	80
Figura 32 - Imagem eletrônica de MEV (a), imagem eletrônica de EDS (b), imagem eletrônica de WC (c) e imagem eletrônica de Co (d) - Fabricante B	80
Figura 33 - Espectro de energia dispersiva gerado por EDS com os elementos químicos presentes no substrato da amostra de ferramenta do fabricante B	80
Figura 34 - Imagem eletrônica de MEV (a), imagem eletrônica de EDS (b), imagem eletrônica de Al (c) e imagem eletrônica de O (d), imagem eletrônica de Ti (e), imagem eletrônica de C (f), imagem eletrônica de W (g) e imagem eletrônica de Co (h) - Fabricante A	81
Figura 35 - Espectro de energia dispersiva gerado por EDS com os elementos químicos presentes no revestimento da amostra de ferramenta do fabricante A.....	82
Figura 36 - Imagem eletrônica de MEV (a), imagem eletrônica de EDS (b), imagem eletrônica de Al (c), imagem eletrônica de Ti (d), imagem eletrônica de W (e), imagem eletrônica de Co (f) e imagem eletrônica de O (g) - Fabricante B	83
Figura 37 - Espectro de energia dispersiva gerado por EDS com os elementos químicos presentes no revestimento da amostra de ferramenta do fabricante B.....	83
Figura 38 - Comprimentos de trincas que se formam nos cantos de uma indentação Vickers.	88
Figura 39 - Desgaste na aresta de alisamento (a) e na aresta de corte primária (b) com 142:12min na condição de usinagem 3.	94
Figura 40 - Desgaste na aresta de alisamento e na aresta de corte primária com 6:05min (a), 54:43min (b) e 103:32min (c) na condição de usinagem 4.....	95
Figura 41 - Desgaste na aresta de alisamento e na aresta de corte primária com 12:38min (a), 44:13min (b) e 94:48min(c) na condição de usinagem 1.....	97
Figura 42 - Desgaste na aresta de alisamento e na aresta de corte primária com 12:10min (a), 30:25min (b) e 60:31min(c) na condição de usinagem 2.....	99

LISTA DE FOTOGRAFIAS

Fotografia 1 - Ferramentas de fresamento de faceamento dos fabricantes A (a) e B (b).....	53
Fotografia 2 - Cortadeira automática marca Buehler modelo Isomet 4000	54
Fotografia 3 - Embutidora Buehler Simplimet XPS1 (a); Baquelite preto (b); Esfera de Zr (c).....	56
Fotografia 4 - Politriz automática Buehler Beta	57
Fotografia 5 - Microscópio eletrônico de varredura (MEV) Tescan Vega 3 LMU (a); Metalizador Quorum SC7620 (b).....	58
Fotografia 6 - Difratorômetro de raio-X Rigaku – Ultima IV	61
Fotografia 7 - Amostras seccionadas dos insertos dos fabricantes A (a) e B (b) para análise de difusividade térmica.	61
Fotografia 8 - Amostras seccionadas dos insertos dos fabricantes A (a) e B (b) para ensaio de indentação instrumentada.....	62
Fotografia 9 - Nanoindentador Instrumentado UNAT - ASMEC/Zwick/Roell.	63
Fotografia 10 - Máquina de ensaio universal Shimadzu, modelo Autograph AGS-X 5kN.....	64
Fotografia 11 - Serra Fita Horizontal, marca Acra, Modelo SBS-1335.....	68
Fotografia 12 - Durômetro Pantec RBS.....	69
Fotografia 13 - Espectrômetro de Emissão Ótica Shimadzu PDA-7000	70
Fotografia 14 - Fresadora Universal Clarck modelo FH 4x1000mm.....	72

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Elementos de liga, composição média e efeitos dos elementos nos aços rápidos	26
Quadro 2 - Classificação do metal duro segundo a ISO	31
Quadro 3 - Reagentes, composição e procedimento de ataque para metal duro	41
Quadro 4 - Duração para o ataque do reagente Murakami	41
Quadro 5 - Valores característicos referentes a cada indentador.	44
Quadro 6 - Propriedades térmicas e físicas de alguns materiais.	49
Quadro 7 - Espessuras das amostras.	62
Quadro 8 - Informações pré estabelecidas dos fabricantes.	71
Quadro 9 - Parâmetros de Corte.	73
Quadro 10 - Medidas de espessura dos revestimentos das ferramentas dos fabricantes A e B.	77
Quadro 11 - Penetração Máxima (h) em função da carga (P)	85
Quadro 12 - Dureza (H) e módulo de elasticidade (E) em amostras de substrato e revestimento da ferramenta de fresamento do fabricante A.	85
Quadro 13 - Dureza (H) e módulo de elasticidade (E) em amostras de substrato e revestimento da ferramenta de fresamento do fabricante B.	85
Quadro 14 - Média dos comprimentos da semi-diagonal de impressão + trinca (C) das ferramentas dos fabricante A e B.	88
Quadro 15 - Tenacidade à fratura das ferramentas dos fabricante A e B.	88
Quadro 16 - Resultados da Difusividade Térmica das amostras dos fabricantes A e B	89
Quadro 17 - Valores de difusividade térmica encontrados na literatura para amostras sinterizadas	90
Quadro 18 - Comparação entre as características encontradas de cada ferramanta.	91
Quadro 19 - Média da dureza rockwell regular (HRBW) encontrada nas amostras de aço SAE 1045 comercial.	92
Quadro 20 - Composição química do aço SAE 1045.	92
Quadro 21 - Composição química encontrada do aço SAE 1045 comercial.	93
Quadro 22 - Parâmetros de Corte x Tempo de Vida.	93

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 - Média de WC por área das imagens em amostras dos fabricantes A e B.	76
Gráfico 2 - Média de Co+Poros por área das imagens em amostras dos fabricantes A e B.	76
Gráfico 3 - Variação da carga (P) em função da profundidade de penetração (h) carregamento elasto-plástico e descarregamento elástico.	84
Gráfico 4 - Gráfico com a dureza média dos substratos e revestimentos das ferramentas dos fabricantes A e B.	86
Gráfico 5 - Gráfico com o módulo de elasticidade médio dos substratos e revestimentos das ferramentas dos fabricantes A e B.	87
Gráfico 6 - Curva de vida da ferramenta de corte na condição 1 de usinagem.....	95
Gráfico 7 - Curva de vida da ferramenta de corte na condição 2 de usinagem.....	96
Gráfico 8 - Curva de vida da ferramenta de corte na a condição 3 de usinagem.....	98
Gráfico 9 - Curva de vida da ferramenta de corte na condição 4 de usinagem.....	100
Gráfico 10 - Gráfico de comparação da vida útil das ferramentas de corte nas condições de usinagens estipuladas.	100
Gráfico 11 - Gráfico de comparação da vida útil dos revestimentos das ferramentas de corte nas condições de usinagens estipuladas.	102

LISTA DE ABREVIATURAS, SIGLAS E ACRÔNIMOS

LETRAS LATINAS

A	Área da seção de corte
a_e	Profundidade radial de corte
a_p	Profundidade axial de corte
D_c	Diâmetro de corte
f	avanço por volta
F_{ap}	Força de apoio
F_c	Força de corte
F_e	Força efetiva de corte
F_f	Força de avanço
F_p	Força passiva ou de profundidade
F_t	Força de ativa
F_u	Força de usinagem
F_x	Componente de força no eixo x
F_y	Componente de força no eixo y
f_z	Avanço por dente
F_z	Componente de força no eixo z
h	Espessura do cavaco
k	Número de variáveis independentes
k_c	Força específica de corte
k_s	Pressão específica de corte
KT	Profundidade da cratera
P_a	Potência de acionamento
P_c	Potência de corte
Q	Volume de cavaco removido
R^2	Coefficiente de determinação
$R^2(\text{adj})$	Coefficiente de determinação ajustado
VB	Desgaste de flanco
VB_B	Desgaste de flanco médio

VB_{max}	Desgaste de flanco máximo
VB_N	Desgaste de entalhe
v_c	Velocidade de corte
v_f	velocidade de avanço
χ_r	Ângulo de posição da ferramenta

LETRAS GREGAS

Σ	Somatório
x_i	Variáveis independentes
α	Distância dos pontos axiais em relação aos pontos centrais
β	Coeficiente do modelo matemático a ser estimado
β_i	Coeficientes a serem estimados
ε	Erro experimental
φ	Ângulo da direção do avanço

ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
Al_2O_3	Óxido de alumínio
C	Carbono
CVD	Chemical Vapor Deposition
ISO	International Organization for Standardization
Mn	Manganês
N	Newton
NBR	Norma Brasileira
P_{max}	Fósforo máximo
PVD	Physical Vapor Deposition
R	Raio
S_{max}	Enxofre máximo

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	17
1.1 OBJETIVOS	19
1.1.1 Objetivo Geral:	19
1.1.2 Objetivos Específicos:	19
1.2 JUSTIFICATIVA	19
1.3 ESTRUTURA DO TRABALHO	20
2 REFERENCIAL TEÓRICO	21
2.1 FRESAMENTO	21
2.1.1 Fresamento de Faceamento (Frontal)	22
2.1.2 Parâmetros de Corte para o Processo de Fresamento	22
2.2 MATERIAIS UTILIZADOS EM FERRAMENTAS DE CORTE	24
2.3 PROPRIEDADES E CLASSIFICAÇÃO DO METAL DURO	29
2.4 REVESTIMENTOS EM FERRAMENTAS DE METAL DURO	31
2.4.1 Revestimento por Processo de Deposição Química a Vapor (CVD)	34
2.4.2 Revestimento por Processo de Deposição Física a Vapor (PVD)	34
2.5 TIPOS DE AVARIAS E DESGASTES DA FERRAMENTA DE CORTE	35
2.6 DESGASTE E VIDA DA FERRAMENTA DE CORTE	38
2.7 CARACTERIZAÇÃO DO METAL DURO	39
2.8 DUREZA E MÓDULO DE ELASTICIDADE MEDIDAS POR NANOINDENTAÇÃO	42
2.9 DIFUSIVIDADE TÉRMICA POR TÉCNICA FOTOACÚSTICA	46
2.9.1 Classificação das Amostras com Base em Parâmetros Ópticos e Térmicos	50
3 METODOLOGIA	52
3.1 AMOSTRAS	53
3.2 CARACTERIZAÇÃO MICROESTRUTURAL DAS FERRAMENTAS DE CORTE	54
3.2.1 Preparação das Amostras	54
3.2.1.1 Corte das amostras	54
3.2.1.2 Embutimento das amostras	55
3.2.1.3 Lixamento e polimento	56
3.2.2 Imagem por Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV-EDS)	58
3.2.3 Análise da Fração de Matriz (Co) e Carboneto (WC) da Ferramenta de Corte	59
3.3 CARACTERIZAÇÃO QUÍMICA DO METAL DURO	60
3.3.1 Preparação das Amostras	60
3.3.2 Difração de Raio X	60
3.4 CARACTERIZAÇÃO DAS PROPRIEDADES MECÂNICAS E FÍSICAS DO METAL DURO	61
3.4.1 Preparação das Amostras	61

3.4.2 Dureza e Módulo de Elasticidade.....	62
3.4.4 Tenacidade à fratura por indentação.....	64
3.4.5 Difusividade Térmica pelo Método de Célula Fotoacústica Aberta - OPC	65
3.5 CARACTERIZAÇÃO DO AÇO ABNT 1045.....	67
3.5.1 Corte das Amostras.....	67
3.5.2 Dureza.....	69
3.5.3 Espectroscopia de Emissão Ótica.....	70
3.6 ENSAIO DE VIDA ÚTIL DAS FERRAMENTAS	70
3.6.1 Definição dos Parâmetros de Fresamento	70
4 RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	74
4.1 CARACTERIZAÇÃO MICROESTRUTURAL DO METAL DURO POR MEIO DA MICROSCOPIA ELETRÔNICA DE VARREDURA (MEV).....	74
4.2 OBTENÇÃO DA PORCENTAGEM DE WC E CO+POROS POR ÁREA DA IMAGEM.....	75
4.3 OBTENÇÃO DA ESPESSURA MÉDIA DOS REVESTIMENTOS DE AMBAS AS FERRAMENTAS	76
4.4 CARACTERIZAÇÃO QUÍMICA POR DIFRAÇÃO DE RAIOS X.....	78
4.5 CARACTERIZAÇÃO QUÍMICA POR MEIO DE ESPECTROSCOPIA POR ENERGIA DISPERSIVA (EDS).....	79
4.6 CARACTERIZAÇÃO DAS PROPRIEDADES MECÂNICAS POR DUREZA E MÓDULO DE ELASTICIDADE DAS FERRAMENTAS	84
4.7 CARACTERIZAÇÃO DA TENACIDADE DAS FERRAMENTAS.....	87
4.8 CARACTERIZAÇÃO DA PROPRIEDADE FÍSICA POR DIFUSIVIDADE TÉRMICA	89
4.9 CARACTERIZAÇÃO DA PROPRIEDADE MECÂNICA POR DUREZA DO AÇO SAE 1045	92
4.10 CARACTERIZAÇÃO QUÍMICA DO AÇO SAE 1045 POR ESPECTROSCOPIA POR EMISSÃO ÓTICA	92
4.11 ACOMPANHAMENTO DO DESGASTE DAS FERRAMENTAS POR MICROSCOPIA ELETRÔNICA DE VARREDURA.....	93
5 CONCLUSÕES.....	103
REFERÊNCIAS.....	104

1 INTRODUÇÃO

Mesmo com a grande demanda de produção de peças usinadas, as empresas deste setor produtivo ainda tem a necessidade de reduzir os custos de fabricação para obter um lucro maior. Tais necessidades evidenciam o crescimento constante de estudos e trabalhos científicos, os quais buscam analisar e desenvolver determinadas características de processos de fabricação e ferramentas de usinagem que auxiliam diretamente na redução dos custos de fabricação.

O aumento no desenvolvimento industrial está relacionado com a utilização de materiais com propriedades distintas para fabricação dos produtos industriais, e com isso, obter um aumento de produtividade, diminuição dos custos de produção e custos de energia, e ainda obter um aumento na qualidade do produto final. Para as ferramentas utilizadas na construção de máquinas e instrumentos de diversas áreas da indústria, tal desenvolvimento leva à contínua busca do aumento da resistência mecânica, da resistência ao desgaste e da dureza das mesmas. Estes fatores determinam o desenvolvimento contínuo das aplicações das ferramentas, o que permite satisfazer as exigências da industria atual.

Os carbonetos são amplamente utilizados em operações de corte, perfuração, e usinagem de modo geral que requerem alta remoção de material, e altas velocidades de corte (GOMES, 1995). Além das aplicações mencionadas, podem-se destacar também as ferramentas para matrizes de conformação, brocas de mineração e componentes resistentes ao desgaste.

O metal duro é um compósito que consiste em uma fase dura (carbonetos), que possui alta dureza a quente e a temperaturas ambiente, boa resistência à corrosão, elevada resistência a compressão e ao desgaste, estabilidade térmica e baixo coeficiente de expansão térmica. Esta fase dura consiste em grãos de carboneto de tungstênio (WC), como elemento principal, mas em algumas aplicações são adicionadas pequena quantidade de carbonetos refratários, tais como: TaC, NbC ou TiC para melhorar a dureza a quente e a resistência ao desgaste. A fase ligante consiste de cobalto ou níquel, mas também pode ser substituída por ferro, onde tal fase confere tenacidade e plasticidade ao conjunto.

A fase ligante nos metais duros mais utilizados na indústria é formada principalmente pelo cobalto que durante a sinterização dissolve pequenos teores de W, C e outros dependendo da solubilidade dos carbonetos presentes. As

propriedades do metal duro podem ser facilmente alteradas e ajustadas à aplicação pretendida, pela simples mudança na proporção dessas fases.

Este material é fabricado pelo processo de metalurgia do pó, uma técnica já conhecida, e, por isso, bastante confiável e estabelecida, porém as empresas que fabricam as ferramentas de corte de metal duro mantêm o processo de fabricação em segredo, e existem detalhes do processo de fabricação destas ferramentas que não são encontrados na literatura técnica e não são divulgados pelas fabricantes das referidas ferramentas. A concentração de ligante, a dureza e o material do revestimento representam algumas características das ferramentas que podem variar devido às peculiaridades do processo de fabricação. Tal variação do processo de fabricação pode influenciar no substrato da ferramenta e em seu revestimento.

A seleção da ferramenta de metal duro, com características que satisfaçam determinado processo de fabricação com maior eficiência, pode ser realizada com êxito, a partir da compreensão dos aspectos que influenciam diretamente na vida destas ferramentas.

Os metais duros utilizados como ferramenta de corte em fresamento são amplamente comercializados e aplicados devido ao seu melhor custo benefício em relação aos demais materiais utilizados com o mesmo propósito.

O fresamento de faceamento é uma operação com vasto emprego na indústria metal mecânica em função de seu alto rendimento, além da boa qualidade superficial e precisão dimensional das peças usinadas.

Estudos na literatura mostram que existe uma relação entre vida útil da ferramenta de corte, condições de usinagem, material da peça a ser usinada e da ferramenta. A motivação para realização do presente trabalho é a verificação da influência das variações das características das ferramentas encontradas no mercado que são destinadas à mesma operação de fresamento na vida das mesmas.

Busca-se através deste trabalho identificar e caracterizar a microestrutura e as propriedades de algumas ferramentas de metal duro de diferentes fabricantes, que são destinadas à mesma operação de fresamento, disponíveis no mercado, e correlacioná-las com a vida das ferramentas estudadas. Isto permitirá uma melhor compreensão da influência das diferenças metalúrgicas de tais ferramentas e suas peculiaridades.

1.1 OBJETIVOS

Os objetivos deste trabalho estão divididos em objetivos gerais e objetivos específicos.

1.1.1 Objetivo Geral:

Correlacionar as características microestruturais, composição química e propriedades mecânicas de insertos de metal duro utilizados no fresamento de faceamento do aço ABNT 1045 com a vida útil dos mesmos.

1.1.2 Objetivos Específicos:

- Caracterizar os insertos de metal duro utilizados em fresas de faceamento utilizadas na usinagem do aço ABNT 1045, quanto à sua microestrutura (granulometria e concentração de carbonetos), composição química e propriedades mecânicas e físicas;
- Obter as curvas de vida de ferramenta dos insertos estudados no fresamento de faceamento do aço ABNT 1045;
- Correlacionar os dados obtidos na caracterização dos insertos estudados com a vida dos mesmos.

1.2 JUSTIFICATIVA

Nos processos de usinagem as ferramentas de corte são submetidas a condições extremamente desfavoráveis durante as operações de usinagem. As altas temperaturas de corte, tensão de compressão e de cisalhamento, variações térmicas e cargas mecânicas cíclicas são algumas condições adversas que ocasionam desgastes e danos nestas ferramentas (MELO *et al.*, 2006).

Portanto o conhecimento e percepção do estado da ferramenta durante a usinagem juntamente com o conhecimento no que se diz respeito as propriedades mecânicas das mesmas, é extremamente importante para que a eficiência do

processo de manufatura seja estabelecido, e assim as ferramentas de corte possam usinar maiores quantidades de material sem que seja necessário a troca da ferramenta em questão, ou seja, aumentando a vida da ferramenta.

O possível conhecimento das características da ferramenta influenciam na vida da mesma, fica mais fácil fazer a escolha pela ferramenta de melhor custo benefício.

1.3 ESTRUTURA DO TRABALHO

O primeiro capítulo tem como objetivo apresentar a introdução do problema de pesquisa, a contextualização do tema de pesquisa, identificação do objetivo geral e específicos, justificativa da pesquisa (científica e aplicada ao meio industrial) e por último a estrutura do trabalho.

O capítulo 2 apresenta os conceitos necessários para a fundamentação teórica desta pesquisa. São apresentados os principais conceitos relacionados ao processo de fresamento de faceamento, materiais para ferramenta de corte e conceitos sobre a caracterização microestrutural dos insertos de metal duro.

O capítulo 3 detalha os materiais, ferramentas e os equipamentos empregados na pesquisa para alcançar os objetivos específicos desta pesquisa.

O capítulo 4 apresenta os resultados obtidos nos experimentos, como composição química, medição da dureza, módulo de elasticidade, microestrutura e análise de vida útil da ferramenta.

No capítulo 5 encontram-se as conclusões obtidas com a pesquisa realizada.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

Este capítulo apresenta uma revisão teórica sobre o tema tratado neste trabalho. Serão apresentados os tópicos relacionados ao processo de usinagem por fresamento de faceamento, materiais utilizados nas ferramentas de corte, propriedades e classificação do metal duro, revestimentos em ferramentas de metal duro, tipos de avarias e desgastes da ferramenta de corte e os conceitos sobre a caracterização dos insertos de metal duro.

2.1 FRESAMENTO

O fresamento é um processo de usinagem convencional capaz de gerar diversas superfícies utilizando uma ferramenta multicortante denominada fresa. Devido à rotação desta ferramenta, cada aresta tem a função de remover uma certa quantidade de material em forma de cavaco.

As fresas podem apresentar diferentes formas, portanto, o processo de fresamento pode executar uma variedade de cortes e gerar peças com superfícies de diversos tipos e formatos, conferindo ao processo um caráter de versatilidade (DINIZ *et al.*, 2013).

O fresamento, ainda que complexo, é um dos processos de usinagem com maior emprego na indústria atual, devido a aspectos como alta taxa de remoção de material e produção de formas com boa precisão dimensional e geométrica, além de ser um processo de elevada flexibilidade, sendo utilizado na fabricação de superfícies planas, contornos, ranhuras e cavidades. No fresamento, a peça permanece estática, fixada sobre a mesa, que se move ou não, enquanto a ferramenta é rotacionada (DINIZ *et al.*, 2013).

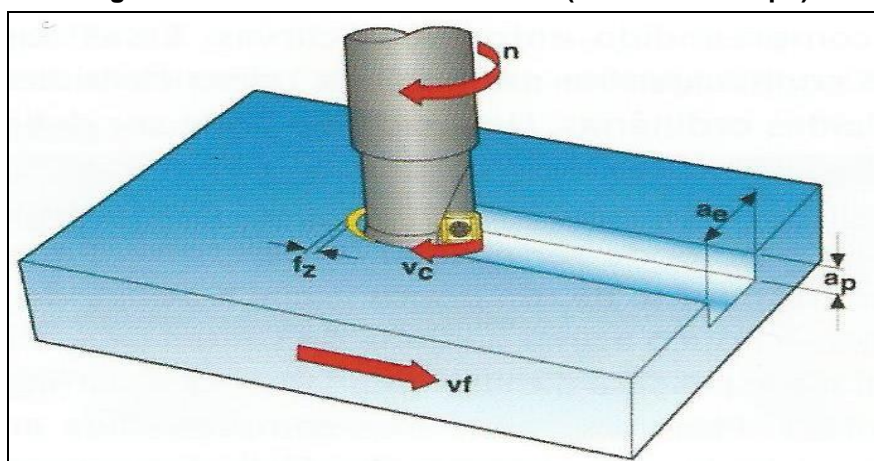
Para Ferraresi (2013), o processo de fresamento se divide basicamente em fresamento cilíndrico tangencial e fresamento frontal. No entanto, ele também pode ser dividido de acordo com o movimento relativo peça-ferramenta, em relação ao sentido de corte e avanço, como discordante (para cima) e concordante (para baixo), ou então, de acordo com a posição do eixo-árvore da máquina-ferramenta em horizontal, vertical e inclinado (DINIZ *et al.*, 2013).

2.1.1 Fresamento de Faceamento (Frontal)

Processo de usinagem em que os dentes ativos da fresa estão situados na superfície frontal da ferramenta (denominadas fresas frontais ou de topo), figura 1, e a superfície plana obtida é perpendicular ao eixo de rotação da ferramenta (FERRARESI, 2013; DINIZ *et al.*, 2013).

O fresamento de faceamento é caracterizado pelas marcas de usinagem deixadas pelos dentes da fresa, conforme o avanço por volta (f) e por dente (f_z). Neste processo a superfície usinada é resultado de uma ação combinada das arestas cortantes da periferia com os dentes situados na face frontal da fresa. A penetração de trabalho (a_e) é consideravelmente maior que a profundidade de corte (a_p) (STEMMER, 2005).

Figura 1 - Fresamento de faceamento (frontal ou de topo)



Fonte: Seco Tools AB (2016).

2.1.2 Parâmetros de Corte para o Processo de Fresamento

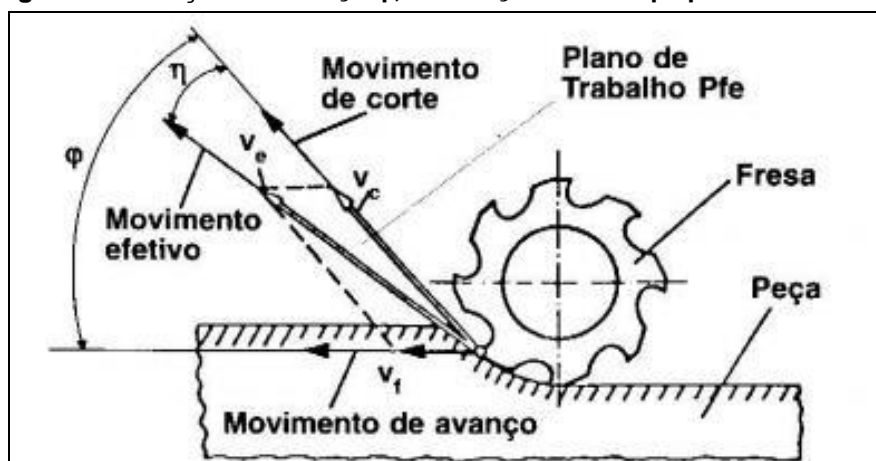
Ao usinar uma superfície é necessário providenciar um movimento relativo adequado entre a ferramenta e a peça. Para isso, alguns parâmetros de corte devem ser determinados antes do processo de usinagem, como a direção de corte, a direção de avanço, a velocidade de corte (v_c), o avanço por dente (f_z), a velocidade de avanço (v_f), a profundidade de usinagem (a_p), a penetração de trabalho (a_e), entre outros fatores (MACHADO *et al.* 2009).

A velocidade de corte para o processo de fresamento, onde os movimentos de avanço e de corte ocorrem concomitantemente, é definida como a velocidade tangencial instantânea, que resulta da rotação da ferramenta em torno da peça. Neste processo, é necessário ter cuidado ao escolher a velocidade de corte, pois ela tem maior influência no desgaste da ferramenta que os demais parâmetros, além de exercer influência sobre a temperatura de corte, visto que o aumento desta grandeza faz com que aumente a força de impacto entre a aresta de corte e a peça (DINIZ *et al.*, 2013).

O avanço por dente é definido como o percurso de avanço a cada dente e é medido na direção do avanço. Ele corresponde à distância estabelecida entre duas superfícies em usinagem consecutiva. Na escolha deste parâmetro para o processo de fresamento deve-se levar em conta o tipo de fresa, a potência da máquina, o material da ferramenta (MACHADO *et al.* 2009).

A velocidade de avanço definida como a velocidade instantânea no ponto da aresta cortante, na direção e sentido de avanço, figura 2, pode ser obtida através do produto entre o avanço pela rotação da peça (MACHADO *et al.* 2009).

Figura 2 - Direção dos movimentos de corte, de avanço e efetivo no fresamento discordante. Ângulos da direção de avanço ϕ , da direção efetiva η e plano de trabalho.



Fonte: Diniz, Marcondes e Coppini (2006).

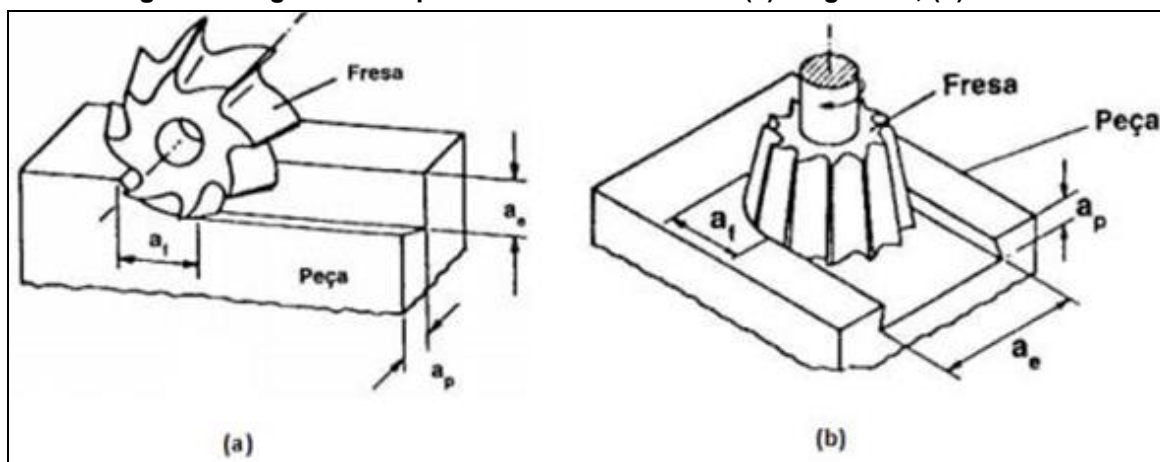
A penetração de trabalho é a penetração da ferramenta em relação à peça. Ela é medida no plano de trabalho e perpendicularmente em relação à direção de avanço. Esta grandeza é considerada muito importante no processo de fresamento, pois o seu crescimento tende a provocar uma queda acentuada da vida da ferramenta. Por isso, dependendo da potência da máquina e/ou da rigidez do

sistema, é melhor realizar várias passadas para retirar o volume de material desejado (DINIZ *et al.*, 2013 FERRARESI, 2013).

A profundidade ou largura de usinagem é definida, no fresamento de faceamento, como a profundidade de penetração da ferramenta em relação à peça. Já no fresamento tangencial, ela é a largura de penetração. A profundidade axial de corte (a_p) é medida perpendicularmente em relação ao plano de trabalho. Esta grandeza tem pouca influência no desgaste da ferramenta, então, do ponto de vista econômico, pode-se utilizar a maior profundidade possível. Neste caso, os fatores que irão limitar o a_p serão: a potência e rigidez da máquina, as vibrações, a rigidez da fixação da peça, bem como a rigidez da própria peça, e acabamento superficial desejado para a peça a ser usinada (DINIZ *et al.*, 2013).

São ilustrados na figura 3 as grandezas ' a_e ' e ' a_p ', bem como a penetração de avanço ' a_f ', no fresamento tangencial e frontal.

Figura 3 - A grandeza ' a_p ' e a ' a_e ' no fresamento: (a) tangencial; (b) frontal.



Fonte: Diniz, Marcondes e Coppini, (2013).

2.2 MATERIAIS UTILIZADOS EM FERRAMENTAS DE CORTE

Muitos materiais vêm sendo utilizados ao longo do tempo como ferramentas de corte. Estes materiais quando muito duros, não possuem a tenacidade adequada para serem utilizados como materiais de corte (TRENT; WRIGHT, 2000). Essa falta de tenacidade não permite a aplicação destes materiais na usinagem de superfícies de peças muito rugosas com elevada dureza e peças muito frágeis que formam

cavacos de ruptura, fatores que elevam o número de choques mecânicos provenientes do processo de usinagem de peças com estas características.

Trent e Wright (2000) ainda citam as várias tentativas de muitos pesquisadores de encontrar materiais com características adequadas às principais necessidades de resistência a determinadas solicitações dos processos de usinagem, entre elas estão: elevadas temperaturas alcançadas pelos materiais da ferramenta durante o processo; elevada pressão; choques mecânicos.

Para a seleção do material adequado da ferramenta de corte a ser utilizada no processo de usinagem, é necessário que sejam identificadas e analisadas as principais características dos fatores envolvidos no processo. Entre estes fatores, Diniz *et al.* (2013), citam como principais aspectos a serem avaliados os materiais que serão usinados: a identificação da dureza; o tipo do cavaco formado por estes; o tipo do processo de usinagem. Outro fator envolve as condições da ferramenta de corte, especificando a forma e dimensões da ferramenta além do custo do material utilizado na fabricação destes insertos.

A partir da definição dos fatores envolvidos no processo de usinagem é possível avaliar as principais características dos materiais, que podem ser classificadas como indispensáveis a uma ferramenta de usinagem, para que esta possa otimizar o processo produtivo no qual é submetida (BISCAIA, 2013).

É extremamente importante o conhecimento das principais características do processo de usinagem que será realizado, para que a seleção da ferramenta a ser utilizada, seja adequada às necessidades de aplicação, sejam elas a severidade da operação, as condições de usinagem empregadas e condições da máquina-ferramenta, além da necessidade de conhecimento do tipo de material a ser usinado (BISCAIA, 2013).

Diniz *et al.* (2013) listam quatro características dos materiais de ferramenta que devem ser atendidas, distinguindo-se em relevância conforme a aplicação. Os quatro fatores citados são:

- Dureza a quente do material: deve ser elevada para resistir às tensões do corte a altas temperaturas que, em algumas operações, podem ultrapassar 1.000°C;
- Elevada resistência ao desgaste: principalmente abrasivo, propriedade que está estritamente ligada à dureza a quente do material e pode ser considerada como a resistência ao atrito provocado pela interação ferramenta e peça;

- Associação da tenacidade à elevada dureza: propriedades extremamente necessárias para essas ferramentas, devido à severidade de alguns processos de usinagem. A tenacidade é indispensável a processos que exigem elevada resistência a choques inerentes da operação de corte;

- Elevada estabilidade química: para evitar o desgaste por difusão ocasionando possível alteração da microestrutura superficial da peça.

Com base nestas considerações acima, os materiais utilizados como ferramenta podem ser divididos conforme suas características químicas, e agrupados em: aços rápidos (com ou sem cobertura); metal duro (com ou sem cobertura); materiais cerâmicos; cermets; nitreto de boro cúbico (**NBC**); diamante.

A partir da divisão destes materiais é possível relacionar algumas características e propriedades de tais materiais:

a) Aços rápidos (com ou sem cobertura) - os aços rápidos foram desenvolvidos no final do século XIX e foram responsáveis pela minimização da utilização de ferramentas de aço carbono e aço liga, devido à alta velocidade de corte obtida em relação aos materiais citados. Segundo Teles (2007), os aços rápidos representaram na época o primeiro grande salto tecnológico na história do processo de fabricação por usinagem. São materiais tenazes e, se comparados à materiais de aço carbono, apresentam elevada dureza a quente e resistência ao desgaste. São aços de alta liga com microestrutura martensítica e inclusões de carbonetos. O Quadro 1 exemplifica os principais efeitos dos elementos de liga dos aços rápidos.

Quadro 1 - Elementos de liga, composição média e efeitos dos elementos nos aços rápidos

ELEMENTO	COMP. MÉDIA (%)	EFEITO
Carbono	0,7 – 1,6	Aumenta a dureza
Tungstênio	18 – 20	Aumenta a resistência ao desgaste; formador de carbonetos.
Molibdênio	3 – 9,5	
Vanádio	1 – 5	Aumenta a dureza a quente; formador de carbonetos.
Nióbio	1 – 5	
Cromo	4 – 4,5	Diminui a oxidação; garante temperabilidade.
Cobalto	4 - 12	Aumenta a dureza a quente; evita crescimento de grão.

Fonte: Chiaverini (2001)

Sobre as ferramentas de aço rápido, ainda com a finalidade de melhorar propriedades da ferramenta tais como: aumentar a dureza, diminuir o coeficiente de atrito, torná-la quimicamente inerte, é realizada a deposição de revestimentos através de processos de CVD ou PVD. Sendo que as principais coberturas mais utilizadas a serem depositadas nestes materiais são as de nitreto de titânio (TiN) e carbonitreto de titânio (TiCN), também nitreto de titânio-alumínio (TiAlN) e nitreto de titânio-alumínio-cromo (TiAlCrN) (DINIZ *et al.*, 2013).

Uma das limitações dos aços rápidos na aplicação como ferramenta de corte é a sua perda de dureza à quente e a presença de deformações permanentes quando as operações chegam a temperaturas de aproximadamente 650°C (TRENT; WRIGHT, 2000). Fato que limita sua aplicação na usinagem de materiais dúcteis que formam cavacos contínuos e conseqüentemente geram elevadas temperaturas durante o processo.

b) Metal Duro - material utilizado como ferramenta de corte e que possui vasta aplicação na engenharia. Segundo Diniz *et al.* (2013), o metal duro é um dos materiais mais utilizados na engenharia por apresentar a melhor relação dentre os materiais citados quanto ao custo e benefício.

Para Koelsch (2000), este material é muito utilizado devido à evolução das classes que suportam altas temperaturas e abrasão inerente ao processo de corte de materiais com baixa usinabilidade. Os principais avanços tecnológicos que possibilitaram essa aplicabilidade do metal duro são basicamente a diminuição do tamanho de grão, melhores ligantes, variações de concentração de cobalto e grande evolução de tipos de cobertura.

O metal duro e seus revestimentos serão caracterizados e citados com mais detalhes no tópico 2.3.

c) Cerâmicas - existe no mercado as ferramentas de material cerâmico, que começou a se destacar no mercado a partir de 1980. Apresenta como principal propriedade como ferramentas de corte a elevada dureza a quente que é extremamente importante em processos que necessitam altas velocidades de corte e resultam em elevadas temperaturas. Além desta propriedade, este material apresenta baixa tenacidade e baixa condutividade térmica, ocasionando, respectivamente, possíveis quebras da ferramenta e dificultando a transferência de calor, elevando assim a temperatura nas interfaces cavaco-ferramenta e peça-ferramenta (DINIZ *et al.*, 2013).

As principais ferramentas cerâmicas segundo Trent e Wright (2000) são:

- Ferramentas a base de óxido de alumínio (Al_2O_3) – materiais com grãos finos de alumina (Al_2O_3), elevada densidade e apresenta porosidade abaixo de 2%. Pode ou não apresentar em sua estrutura whiskers de carbonetos de silício (SiC), que são compósitos responsáveis por aumentar a tenacidade da liga.
- Ferramentas a base de nitreto de silício (Si_3N_4) – apresenta dureza elevada e baixo coeficiente de expansão térmica.

d) Cermets - materiais que são compostos de duas fases sendo uma cerâmica e outra metálica, os quais possuem alta resistência ao desgaste, estabilidade química, e dureza à quente intermediária ao metal duro e às cerâmicas, apresentando tenacidade semelhante à do metal duro. Também podem ter revestimentos para melhorar propriedades deficientes a determinados processos (DINIZ *et al.*, 2013). A diferença básica entre os Cermets e o Metal Duro, é possuir como carboneto predominante em sua estrutura, o TiC (carboneto de titânio), além de TiN (nitreto de titânio). E a fase metálica, responsável pela ligação é, usualmente, o níquel (MACHADO *et al.*, 2009).

e) Nitreto de Boro Cúbico - os CBN/NBCs (cubic boron nitride/nitreto de boro cúbico) são mais caros que as ferramentas cerâmicas, mas por apresentarem melhores propriedades e, conseqüentemente, maior vida, ou seja, podem usinar mais peças com a mesma aresta de corte além de diminuir o tempo de troca de ferramenta, podem compensar o custo maior. O CBN tem propriedades semelhantes aos diamantes, mas possuem melhor estabilidade química (TRENT, WRIGHT, 2000).

f) Diamantes - os diamantes utilizados podem ser naturais ou sintéticos. O diamante sintético policristalino (PCD) é produzido pela sinterização de partículas de diamante com cobalto com elevadas pressões e temperaturas entre 1.400° a 2.000°C .

Os diamantes naturais são os materiais mais duros encontrados na natureza, mas sua utilização como ferramenta de corte é limitada pelo seu elevado custo (DINIZ *et al.*, 2013). Possuem estrutura cristalina isotrópica, e sua dureza e resistência ao desgaste abrasivo são dependentes diretamente da orientação cristalográfica. Apresentam certa instabilidade química e são materiais com extrema deficiência de tenacidade.

O diamante sintético policristalino (PCD) apresenta elevada capacidade de condutividade térmica, elevadas dureza e resistência ao desgaste por abrasão além da tenacidade que pode, devido sua elevada dureza, ser considerada alta. Por outro lado, tais materiais apresentam anisotropia o que faz com que o material apresente heterogeneidade de propriedades em diferentes regiões de sua superfície, além da possibilidade de elevado desgaste por difusão quando são usinados materiais que contém ferro em sua estrutura. Pois, na zona de contato da peça com o diamante, devido à alta temperatura, o carbono transforma-se em grafite e reage com o ferro. Isto leva a um rápido desgaste do gume (DINIZ *et al.*, 2013). São indicados para usinagens de metais leves, bronze, cobre, ligas de estanho, borracha dura e mole, vidro, plásticos e pedras. Aplicam-se para a usinagem fina (grande precisão e qualidade superficial semelhante ao polimento).

2.3 PROPRIEDADES E CLASSIFICAÇÃO DO METAL DURO

A vasta aplicação do metal duro na engenharia se dá pelas suas características principais sendo elas, a alta dureza a quente e à temperatura ambiente, boa resistência à ruptura (tenacidade), boas resistências à corrosão e ao desgaste e baixo coeficiente de expansão térmica (SANTOS; KLEIN; CORREA, 2010).

O metal duro é obtido a partir do processo de metalurgia do pó. Sua fabricação é realizada a partir da obtenção dos pós metálicos de W, misturado ao carbono puro (negro de fumo), onde esta mistura é levada a um forno e se obtém carboneto de tungstênio, ou pode-se dizer que o tungstênio é inicialmente carbonetado. A partir deste processo deve-se obter carbonetos contendo de 6,10% a 6,15% de carbono, nos quais 0,05% a 0,10% deverá estar na forma livre. Além disso, ainda é possível que ocorra uma terceira fase que é a grafita livre, caracterizando no material, uma queda da resistência mecânica e densidade do material final obtido, devido à formação de porosidades no produto (CHIAVERINI, 2001).

A partir da obtenção das partículas finamente divididas de carbonetos, estas, são sinterizadas com a fase responsável por aglomerar as partículas dos carbonetos e conferir ao material a tenacidade requerida a determinadas aplicações.

A principal vantagem da metalurgia do pó na obtenção do metal duro para Trent e Wright (2000), é a possibilidade do controle rigoroso da composição da liga e do tamanho dos grãos do carboneto.

Entre os principais materiais refratários encontrados, os carbonetos de tungstênio se destacam devido a sua elevada dureza, podendo ser, assim, utilizados em ferramentas de usinagem e em processos de trefilação.

Para suprir determinadas desvantagens em relação às propriedades do carboneto de tungstênio, são introduzidos ao composto, diferentes carbonetos, entre eles, os de titânio, tântalo e nióbio.

Dentre os aglomerantes, Chiaverini (2001) ressalta que o cobalto é considerado o melhor aglomerante nos sistemas mais complexos que contém partículas de carboneto de tungstênio (WC), carboneto de tântalo (TaC), carboneto de nióbio (NbC) e carboneto de titânio (TiC).

O níquel é um dos metais que pode ser uma alternativa para substituição do cobalto, pois este material é relativamente escasso, caro e prejudicial à saúde humana em várias aplicações, devido a possível formação de seu pó ou vapor (SANTOS; KLEIN; CORREA, 2010).

Segundo Trent e Wright (2000), os metais duros com carboneto de tungstênio e cobalto (WC-Co) apresentam na sua composição, de 4 a 30% do peso de cobalto, e destes, na usinagem é comumente utilizado metais duros com cobalto na faixa de 4 a 12%. Apresenta também, uma variação média de tamanho de grão do carboneto entre 0,5 e 10 μm . Esses fatores são essenciais para classificação da ferramenta de corte conforme seu desempenho.

Diniz *et al.* (2013) ressaltam a queda de dureza e de resistência à compressão do metal duro quando se aumenta o percentual de cobalto na liga, mas ao mesmo tempo o material adquire maior resistência à ruptura. Outro fator que influencia a tenacidade do material é o aumento do tamanho de grão dos carbonetos, que, também acarreta na diminuição da resistência à compressão e dureza do material.

Devido às diversas variações de propriedades que podem ser atribuídas a este tipo de material, a International Organization for Standardization (ISO), classificou os metais duros de acordo com o tipo de utilização da ferramenta, ou seja, diferenciando os metais duros em relação às suas propriedades (como

percentual de carbonetos e aglomerantes no material, dureza, densidade, resistência a ruptura), estabelecendo assim, uma série de característica do metal duro que são selecionadas dependendo de determinadas condições de usinagem e do material a ser usinado (DINIZ *et al.*, 2013).

Segundo a ISO, as principais classes de metal duro são designadas pelas letras P, M e K. Segundo Diniz *et al.* (2013) foi expandido o número de classes N, S e H (quadro 2). Sendo que as seis classes citadas ainda são expandidas a subgrupos, diferenciando-se dentro das subdivisões em relação à caracterização das propriedades dos materiais (quando a dureza e resistência ao desgaste crescem, diminui a tenacidade do metal duro).

Quadro 2 - Classificação do metal duro segundo a ISO

CLASSE ISO	APLICAÇÃO
P	Aço, aço fundido, ferro maleável de cavacos longos
M	Aço manganês, aço inox austenítico
K	Ferro fundido cinzento e nodular
N	Metais não ferrosos: alumínio, latão, cobre, plástico, fibra de vidro
S	Ligas resistentes a alta temperaturas, ligas de titânio
H	Aços temperados, ferro fundido endurecido

Fonte: O Autor

Com a intenção de se obter melhores propriedades mecânicas que podem auxiliar na melhoria do processo fabricação por usinagem, muitas ferramentas de metal duro possuem camadas superficiais responsáveis por atribuir ao material determinada propriedade na superfície da ferramenta, mantendo as características do metal duro no substrato.

2.4 REVESTIMENTOS EM FERRAMENTAS DE METAL DURO

A finalidade principal do revestimento em ferramentas de metal duro é aumentar a resistência ao desgaste da camada superior que entra em contato com o cavaco e com a peça, sendo que o núcleo ou substrato da ferramenta permanece com a tenacidade característica do metal duro mais simples (WC+Co), assim,

consegue-se em muitos casos, aumentar bastante a vida da ferramenta e diminuir os esforços de corte. Com isto, é possível conjugar no mesmo material, características que eram até inconciliáveis, quais sejam, tenacidade com resistência ao desgaste e dureza a quente (DINIZ *et al.*, 2013).

Existem ferramentas com uma, duas e até três camadas de revestimento, onde os materiais mais usados são o carboneto de titânio (TiC), óxido de alumínio (Al_2O_3), nitreto de titânio (TiN), carbonitreto de titânio (TiCN) e o nitreto de titânio-alumínio (TiAlN) (DINIZ *et al.*, 2013).

As principais características de cada uma destas camadas são:

- Carboneto de titânio (TiC) e carbonitreto de titânio (TiCN) - possuem excelente resistência ao desgaste por abrasão, além de funcionarem como elemento que promove a adesão das demais camadas de cobertura com o metal duro do núcleo, já que não se consegue uma forte adesão entre o óxido de alumínio e o substrato de metal duro, devido à diferença entre os coeficientes de dilatação térmica destes dois materiais.

Outras características importantes destes materiais são a baixa tendência de soldagem com o material da peça, dificultando o desgaste por adesão e a formação de aresta postiça de corte e o baixo coeficiente de dilatação térmica.

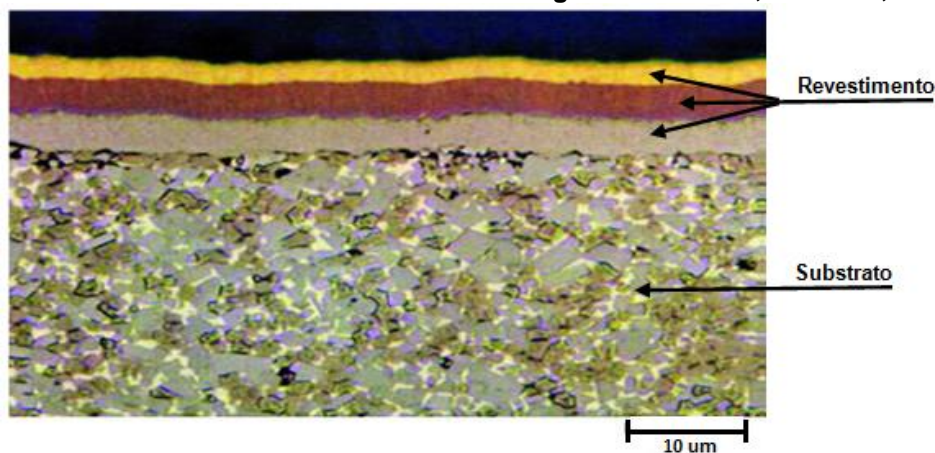
- Óxido de alumínio (Al_2O_3) - garante estabilidade térmica necessária em temperaturas elevadas devido ao fato de ser um material cerâmico refratário e também possuir alta resistência ao desgaste por abrasão, além de alta resistência a oxidação e alta estabilidade química na presença do Fe. É a principal responsável pela baixa tendência de formação de desgaste de cratera das ferramentas de metal duro recoberto, e por outro lado apresenta pequena resistência a choque térmicos e mecânicos.

- Nitreto de titânio (TiN) - reduz o coeficiente de atrito entre a ferramenta e o cavaco. É quimicamente mais estável que o TiC, ou seja, tem menor tendência à difusão com aços.

- Nitreto de titânio-alumínio (TiAlN) - apresenta maior resistência à oxidação, o que permite o uso de temperaturas mais altas. Possui baixa condutividade térmica, o que protege a aresta de corte e aumenta a remoção de calor através do cavaco. Apresenta alta dureza a frio e a quente. Possui alta estabilidade química, o que reduz o desgaste de crateras. Seu coeficiente de atrito é ainda mais baixo que aqueles obtidos nas camadas de TiN e TiCN.

Na figura 4 é possível observar as camadas de revestimento depositado no metal duro (microestrutura composta de 75,5% de WC, 16% de TiC, TaC e NbC e 8,5% de cobalto (Co) representando a fase ligante do material) para conferir ao mesmo, maior dureza superficial.

Figura 4 - Metal duro 75,5WC- Ligas de substrato 16 (Ta, Ti, Nb)C com 8,5 Co como ligante, com revestimento duro de multicamadas. Reagente Murakami, 1 minuto, 1500 x

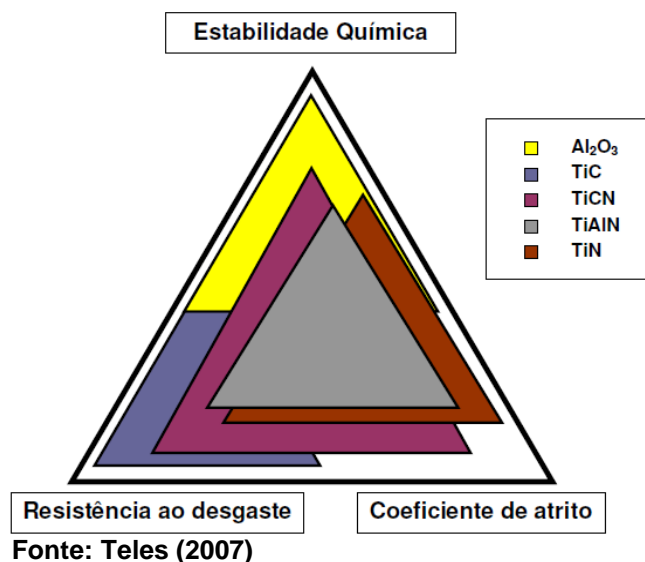


Fonte: ASM Metals Handbook (2004)

A espessura dos revestimentos devem ser controladas para que ocorram um equilíbrio em relação às propriedades de dureza e tenacidade da ferramenta sendo que a espessura em geral pode variar de 2 a 12 μm (TELES, 2007).

A figura 5 representa a comparação das principais propriedades dos revestimentos mais utilizados em metais duros:

Figura 5 - Comparação das principais propriedades das coberturas mais utilizadas em metal duro.



2.4.1 Revestimento por Processo de Deposição Química a Vapor (CVD)

O revestimento por processo de deposição química a vapor é realizado a temperaturas que variam entre 800° a 1.100°C. As principais coberturas adicionadas por este processo são os carbonetos, óxidos e nitretos, sendo que a espessura total pode variar de 2 a 20µm. As principais propriedades deste processo estão relacionadas ao fato de que pode se obter um maior número de combinações possíveis de revestimentos, sendo responsável por propiciar ao revestimento boa aderência no substrato, mas pode induzir a tensões residuais e trincas.

O processo de deposição química ocorre a partir de um vapor que passa por uma reação química próxima, ou na superfície de um determinado substrato, e gera um material sólido de revestimento (SHAW, 2005).

Devido à característica intrínseca do processo de deposição química, de reduzir a tenacidade superficial da ferramenta, as ferramentas revestidas por tal processo, não são indicadas à usinagem com corte interrompido (MACHADO *et al.*, 2009).

O processo CVD é utilizado na aplicação de camadas múltiplas de carboneto de titânio (TiC), óxido de alumínio (Al₂O₃), nitreto de titânio (TiN), e carbonitreto de titânio (TiCN) e o nitreto de titânio-alumínio (TiAlN) nos revestimentos de ferramentas de metal duro.

2.4.2 Revestimento por Processo de Deposição Física a Vapor (PVD)

O revestimento por processo de deposição física vapor é realizado à temperaturas que variam de 200° a 500°C, e são responsáveis pela deposição, normalmente, de camadas de nitreto de titânio, carbonitreto de titânio e nitreto de titânio-alumínio, gerando espessuras que podem variar entre 2 e 7µm. O processo é incapaz de revestir geometrias complexas, sendo que, apesar de gerar menor tensão entre o revestimento e o substrato, pode induzir tensões residuais de compressão.

O revestimento por PVD propicia uma cobertura mais fina sobre as ferramentas de corte e, assim, arestas mais afiadas, o que é importante quando se

deseja melhores acabamentos superficiais ou quando se usinam materiais muito dúcteis (DINIZ *et al.*, 2013).

O processo PDV é utilizado na aplicação de multicamadas de nitreto de titânio-alumínio (TiAlN) sobre a ferramenta de corte (DINIZ *et al.*, 2013).

2.5 TIPOS DE AVARIAS E DESGASTES DA FERRAMENTA DE CORTE

Segundo Diniz (2013), desgaste é a perda contínua e microscópica de partículas da ferramenta devido à ação do corte. As demais ocorrências podem ser denominadas de avarias.

Os tipos de desgastes e avarias podem ser classificados como:

- Desgaste de flanco, figura 6 - ocorre na superfície de folga da ferramenta causado pelo contato entre ferramenta e peça.

À medida que este desgaste ocorre, a aresta de corte se retrai e a dimensão da peça usinada muda. Em geral, a sua ocorrência é incentivada pelo aumento da velocidade de corte.

Figura 6 - Desgaste de flanco em ferramentas de metal duro.



Fonte: Coromant, Sandvik (2004).

- Desgaste de entalhe, figura 7 - em algumas ocasiões, também ocorre a formação destes desgastes nos dois extremos de contato entre a superfície de folga e a peça. Este tipo de desgaste muda a forma da ponta da ferramenta e influencia no acabamento da superfície usinada. É incentivado pelo aumento da temperatura e velocidade de corte.

Figura 7 - Desgaste de entalhe em ferramentas de metal duro.



Fonte: Coromant, Sandvik (2004).

- Deformação plástica da aresta de corte, figura 8 - é um tipo de avaria da ferramenta. Muitas vezes a pressão aplicada à ponta da ferramenta, somada à alta temperatura, gera deformação plástica da aresta de corte. O crescimento dessa deformação pode gerar a quebra da aresta de corte. Esta avaria pode ser evitada pelo emprego de uma ferramenta com maior dureza a quente e maior resistência à deformação plástica, ou pela mudança das condições de usinagem, visando diminuir a pressão e a temperatura de corte.

Figura 8 - Deformação plástica da aresta de corte de ferramentas de metal duro.



Fonte: Coromant, Sandvik (2004).

- Lascamento, figura 9 - outro tipo de avaria da ferramenta, que ao contrário do desgaste frontal e de entalhe, que retiram continuamente partículas muito pequenas da ferramenta, no lascamento as partículas maiores são retiradas subitamente. Ocorrem principalmente em ferramentas com material frágil ou quando

a aresta de corte é pouco reforçada. Este tipo de avaria prejudica o acabamento superficial da peça e podem provocar a quebra da ferramenta.

Figura 9 - Lascamento provocado em arestas de corte.



Fonte: Coromant, Sandvik (2004).

- Trincas, figura 10 - são avarias provocadas pela variação de temperatura ou dos esforços mecânicos. Quando as trincas têm origem térmica, elas ocorrem perpendicularmente à aresta de corte, e quando têm origem mecânica são paralelas à aresta. Alguns fatores que geram variações de temperatura ou de esforços mecânicos na usinagem são: corte interrompido, acesso irregular do fluido de corte e variação da espessura de corte.

Figura 10 - Trinca térmica presente em ferramentas de metal duro.



Fonte: Coromant, Sandvik (2004).

- Quebra - quando os desgastes e avarias da ferramenta crescem, podem causar a quebra da aresta. Algumas vezes a quebra pode ocorrer inesperadamente devido a alguns fatores como: ferramenta muito dura, carga excessiva sobre a ferramenta, raio de ponta, ângulo de ponta ou ângulo de cunha pequenos, corte

interrompido, parada instantânea do movimento de corte, entupimento dos canais de expulsão de cavacos ou dos bolsões de armazenamento dos cavacos, etc.

2.6 DESGASTE E VIDA DA FERRAMENTA DE CORTE

A vida da ferramenta é o tempo em que a mesma trabalha efetivamente até perder sua capacidade de corte, dentro de um critério previamente estabelecido (DINIZ *et al.*, 2013).

Alguns fatores que podem determinar o valor-limite de desgaste para o fim da vida da ferramenta são:

- O desgaste da aresta de corte atingir proporções tão elevadas que se receia a quebra da mesma;
- O desgaste da superfície de folga da ferramenta se apresentar de tal forma que não é mais possível a obtenção de tolerâncias e bons acabamentos superficiais da peça;
- Os desgastes crescem muito, fazendo com que a temperatura da aresta cortante ultrapasse a temperatura na qual a ferramenta perde o fio de corte;
- O aumento da força de usinagem, proveniente dos desgastes elevados da ferramenta, interfere no funcionamento da máquina.

Nas ferramentas de metal duro, o desgaste frontal é geralmente maior que o desgaste de cratera. Os desgastes aumentam progressivamente até a quebra da cunha cortante, que deve ser evitada devido às suas consequências danosas ao sistema.

Em operações de acabamento, a ferramenta deve ser retirada muito antes de o desgaste atingir valores que ponham em risco a aresta de corte, a fim de não comprometer a precisão da peça e seu acabamento superficial.

As condições de usinagem afetam diretamente no desgaste e na vida da ferramenta de corte. A progressão do desgaste é influenciada principalmente pela velocidade de corte, depois pelo avanço e por último, pela profundidade de usinagem.

Quanto maior é a velocidade de corte, maior será a energia (calor) que é imputada ao processo, sem crescer a área da ferramenta que recebe este calor (DINIZ *et al.*, 2013).

Quanto maior o avanço, também maior é a quantidade de calor imputada ao processo, porém simultaneamente aumenta-se a área da ferramenta que recebe este calor (DINIZ *et al.*, 2013).

A influência da profundidade de usinagem é menor, já que ao ser aumentada, não altera a energia destinada ao corte por unidade de área, nem a velocidade de retirada do cavaco, mas somente faz com que um maior volume seja retirado por meio do uso de uma maior porção da aresta de corte (DINIZ *et al.*, 2013).

2.7 CARACTERIZAÇÃO DO METAL DURO

Como já mencionado anteriormente, o metal duro é proveniente do processo de metalurgia do pó, obtido a partir de partículas finas e extremamente duras de carbonetos de tungstênio (WC), associados ou não, a carbonetos de tântalo (TaC), nióbio (NbC) e titânio (TiC), aglomeradas com um ligante de ferro (Fe), cobalto (Co) ou níquel (Ni).

Chiaverini (2001) cita que ferramentas empregadas na usinagem de peças que formam cavacos curtos, como ferro fundido, apresentam a constituição básica de carboneto de tungstênio mais o cobalto (WC-Co), sendo que nessas classes existe a ocorrência, em algumas ferramentas, da presença de pequenas quantidades de carboneto de titânio (TiC) e carboneto de tântalo (TaC). Já na usinagem de materiais mais moles que formam cavacos, como os aços, as ferramentas de usinagem utilizadas apresentam mais compostos em sua estrutura como exemplo ligas contendo carboneto de tungstênio (WC) mais carbonetos de titânio (TiC), tântalo (TaC), nióbio (NbC) e o cobalto (Co).

Segundo Teles (2007), a combinação de características microestruturais, como o tamanho de grão e a proporção da liga, dos carbonetos, define as condições finais do inserto de metal duro, definindo sua propriedade e aplicabilidade. Portanto para que se consiga obter o balanço adequado entre dureza e tenacidade, estas

propriedades estruturais devem ser trabalhadas durante o processo de fabricação dos insertos de usinagem.

O metal duro com tamanho de grão menor caracteriza uma vantagem à ferramentas que operam com altas velocidades de corte, pois quanto menor o tamanho dos grãos, menor a condutividade térmica do material, fazendo com que alta porcentagem do calor gerado no processo não seja destinado ao material da ferramenta de corte (Diniz *et al.*, 2013).

Um dos métodos que auxilia no aumento da dureza é a utilização de grãos de carboneto em escala nanométrica. Segundo Jia *et al.* (1998) na comparação de dois metais duros, sendo um com grão em escala convencional, e outro com grãos em escala nanométrica, observou que para uma mesma dureza, o metal duro com granulometria nanométrica apresentou tenacidade maior em aproximadamente 30%. Ainda para uma mesma dureza, Fang e Eason (1995) constataram que materiais com grãos de carboneto nanométricos apresentam maior dureza superficial, aumentando a resistência à quebra e lascamentos. Mas o que limita a produção do metal duro com grãos de carbonetos de tungstênio nanométricos são os mecanismos de crescimento de grão existentes nos processos de sinterização, além dos custos de processabilidade mais elevados.

A análise das propriedades pode ser realizada macro e microscopicamente, sendo que determinadas características são de extrema relevância na qualificação de um inserto de metal duro para futuras aplicações e para análises de resistência a determinados desgastes e fim de vida da ferramenta.

Mannesson (2011) ressalta que a identificação das propriedades de uma ferramenta de metal duro são extremamente importantes para a caracterização do desempenho deste inserto, e dependem principalmente do teor de ligante e do tamanho de grão do material.

Um procedimento citado no ASM Metals Handbook (2004) para a realização de uma análise metalográfica adequada é a divisão desta, em três fases:

- a) Avaliação qualitativa da porosidade e tamanho de grão dos carbonetos presentes;
- b) Realização de ataques na amostra polida utilizando o reagente Murakami;
- c) Ataque final por aproximadamente 2 minutos para a análise global da estrutura.

Na metalografia quantitativa os parâmetros que podem ser analisados são basicamente: o volume de poros; a fração do volume de ligantes; tamanho e forma dos grãos de carboneto presentes; entre outras (ASM METALS HANDBOOK, 2004, V.9).

Para realização da identificação e caracterização da microestrutura, é necessário que sejam feitos ataques na superfície do metal duro. Os principais reagentes utilizados para tal fim e os procedimentos de utilização destes podem ser observados no quadro 3.

Quadro 3 - Reagentes, composição e procedimento de ataque para metal duro

Reagente	Composição	Procedimento
Murakami	10g - $\text{K}_3\text{Fe}(\text{C.N})_6$ (Ferrocianeto de potássio), 10g - NaOH (Hidróxido de sódio), e 100mL - H_2O . Preparar novo para utilização.	Movimente a amostra continuamente no recipiente do reagente pelo tempo apropriado (tabela 1).
Cloreto de ferro	3g - FeCl_3 e 100mL - H_2O . Preparar novo para utilização.	Espécimes obtidos por esfregaço continuamente por 10s (para remoção de níquel e cobalto ligante).

Fonte: ASM Metals Handbook (2004)

O reagente Murakami é o responsável por identificar as fases presentes na estrutura do metal duro, sendo que o tempo de reação para cada fase está discriminado no quadro 4.

Quadro 4 - Duração para o ataque do reagente Murakami

Componente	Duração Ataque (s)
Co, Ni	não reage
WC	120
(Ta,Ti,Nb,W)C	60
Fase η (Co_6W_6) C	3
Fase η (Co_3W_3) C	3

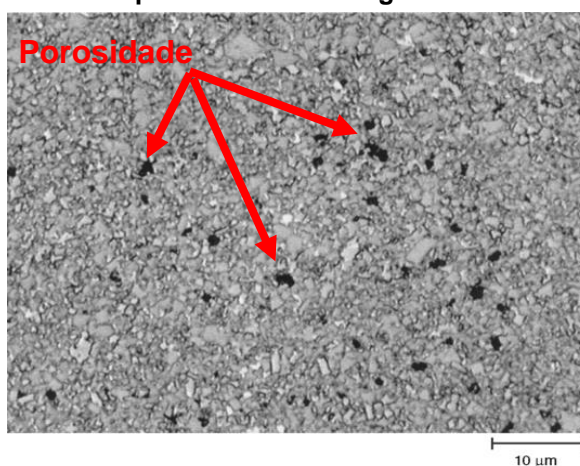
Fonte: Adaptado de ASM Metals Handbook (2004)

Chiaverini (2001) classifica, segundo a ASTM, a porosidade do metal duro que pode ser examinada em amostras polidas, com aumentos microscópicos de 200 vezes, em três tipos e o grau de porosidade é definido por números de 1 a 6. Os três tipos de porosidade são:

- Tipo A, com diâmetros inferiores a 10 μm .
- Tipo B, compreendendo diâmetros entre 10 e 40 μm
- Tipo C, representando poros evidenciados devido a presença de carbono em excesso.

A figura 11 evidencia a presença de porosidades na microestrutura de um metal duro 97WC-3Co, com uma dureza de 95HRA e tendo o cobalto como ligante, representadas pelas regiões mais escuras do material analisado.

Figura 11 - Microestrutura de um metal duro 97WC-3Co exemplificando a presença de porosidades representadas nas regiões escuras. 1500x.



Fonte: ASM Metals Handbook (2004)

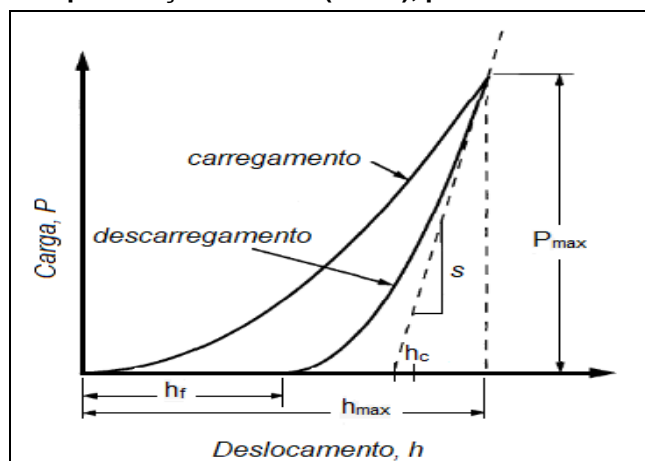
2.8 DUREZA E MÓDULO DE ELASTICIDADE MEDIDAS POR NANOINDENTAÇÃO

Com grandes avanços nos últimos anos, foi possível o desenvolvimento de técnicas capazes de medir as propriedades mecânicas de materiais na escala submicrométrica, devido ao desenvolvimento de instrumentos que medem continuamente a força e o deslocamento do indentador no processo de indentação. Esta técnica consiste em fazer penetrar uma ponta de diamante no material, controlando e registrando os valores da carga aplicada e da profundidade de penetração.

As propriedades mecânicas das amostras são obtidas a partir da análise do diagrama carga aplicada versus deslocamento (Figura 12), utilizando o método desenvolvido por Oliver e Pharr (1992). Esse método leva em consideração a interação entre o penetrador e o material estudado, a partir do ciclo completo da curva de carregamento e descarregamento da ponta na amostra, permitindo assim a

determinação do módulo de elasticidade (E) e da dureza (H), sem necessidade de determinar a área da impressão por microscopia ótica.

Figura 12 - Representação da curva típica de carga versus profundidade de penetração (carregamento-descarregamento). O ciclo mostra os parâmetros: carga máxima de indentação (P_{max}), profundidade de penetração máxima (h_{max}), profundidade final (h_f), profundidade d



Fonte: Adaptado de OLIVER; PHARR(1992).

O módulo de elasticidade é definido como a medida da rigidez do material e depende da composição química, das forças de ligação interatômicas e da estrutura cristalográfica, sendo, portanto, uma propriedade intrínseca dos materiais. Deste modo, quanto mais rígido for o material, menor será a deformação elástica resultante da aplicação de uma tensão e maior será o módulo de elasticidade do material.

Quando em contato mecânico, superfície e indentador sofrem uma deformação elásto-plástica. A aquisição dos dados é obtida sob a forma de uma curva de carga versus deslocamento, a qual permite calcular a rigidez elástica de contato (S), dada pela derivada da curva de descarregamento em relação à profundidade (h) no ponto de carga máxima (Equação 1):

$$S = \frac{dP}{dh} \quad (1)$$

Quando em contato, embora a deformação do indentador seja pequena, indentador e amostra sofrem deformação por não serem perfeitamente rígidos deve ser levado em consideração no processo de indentação. Desta maneira, obtém-se o módulo de elasticidade reduzido (E_r) referente ao conjunto indentador - amostra pela relação definida pela Equação 2:

$$\frac{1}{E_r} = \frac{(1-\nu^2)}{E} + \frac{(1+\nu_i^2)}{E_i} \quad (2)$$

onde ν é a razão de Poisson da amostra; E_i e ν_i são o módulo de elasticidade e o coeficiente de Poisson do indentador. Os indentadores comercializados são de diamante, pelo fato deste apresentar a maior dureza ($E_i = 1141$ GPa e $\nu_i = 0,07$).

O coeficiente de Poisson (ν) relaciona as deformações transversal relativa e longitudinal relativa de um material. Ele está relacionado com os módulos volumétrico e de cisalhamento e, por consequência, também indica características dos materiais como a facilidade de densificarem ou cisalharem. Trata-se de uma grandeza adimensional que varia entre 0,18 e 0,30 para vidros (GREEN, 1998).

A rigidez elástica de contato (S) e o módulo de elasticidade reduzido (E_r) estão associados pela seguinte relação (Equação 3):

$$S = \frac{dP}{dh} = \frac{2\beta\sqrt{A}}{\Pi} E_r \quad (3)$$

sendo β um parâmetro adimensional que depende da geometria da ponta do indentador e A a área da superfície projetada em função da profundidade de contato.

Para o cálculo da área, é necessário saber a profundidade de contato (h_c), que para um indentador Berkovich é igual a $24,56 h_c^2$.

O quadro 5 apresenta valores de: área de contato projetada, semiângulo entre a face do indentador com o eixo normal central e o fator de correção ϵ para cada tipo de indentador, parâmetros esses que dependem da sua geometria (FISCHER-CRIPPS, 2000).

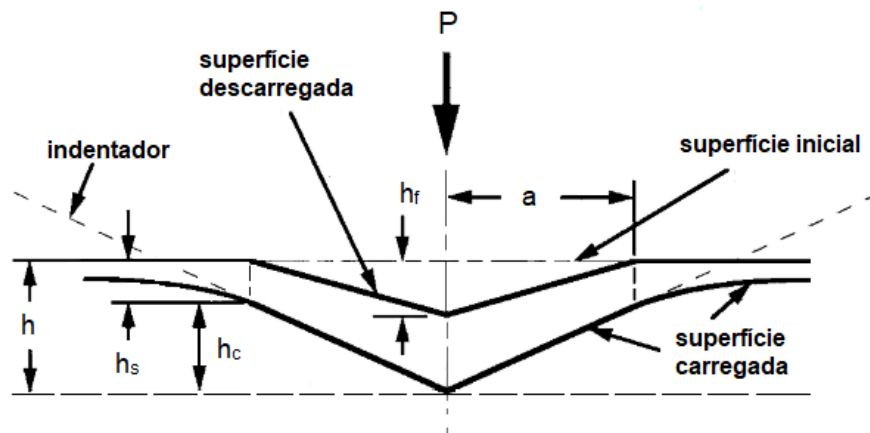
Quadro 5 - Valores característicos referentes a cada indentador.

Indentador	Área Projetada	Semiângulo θ (deg)	Fator de Intercepção - ϵ	Fator de Correção - β
Berkovich	$A(h_c)=24,56h_c^2$	$65,3^\circ$	0,75	1,034

Fonte: Adaptado de FISCHER-CRIPPS (2000).

A Figura 13 mostra uma seção transversal de um recuo e identifica os parâmetros usados na análise quando a amostra está sujeita à aplicação de uma carga.

Figura 13 - Desenho de um corte transversal após teste de carregamento e descarregamento.



Fonte: Adaptado de OLIVER; PHARR(1992).

Na região de indentação, a amostra sofre uma pequena deflexão na superfície (h_s). A profundidade máxima, ou deslocamento total, (h_{max}) é a soma da profundidade de contato (h_c) e do deslocamento que a superfície sofre em relação a posição inicial (h_s) (Equação 4):

$$h_{max} = h_c + h_s \quad (4)$$

Sendo que o deslocamento da superfície sob carregamento é dado pela Equação 5:

$$h_s = \varepsilon \frac{P_{max}}{S} \quad (5)$$

onde P_{max} é a carga máxima e ε é um parâmetro que depende do tipo de indentador. Para o indentador Berkovich, $\varepsilon = 0,75$ (Quadro 5).

Substituindo a equação 4 na equação 5, tem-se (Equação 6):

$$h_c = h_{max} - \varepsilon \frac{P_{max}}{S} \quad (6)$$

Para determinar a dureza num ciclo completo de penetração, é necessário medir S , a fim de determinar também a área de contato projetada. A dureza está relacionada com a deformação plástica permanente verificada em um material penetrado. Quanto menor for a deformação plástica permanente, maior o valor de H .

O valor da H é determinado pela razão da carga aplicada na amostra com a área de contato projetada pela Equação 7.

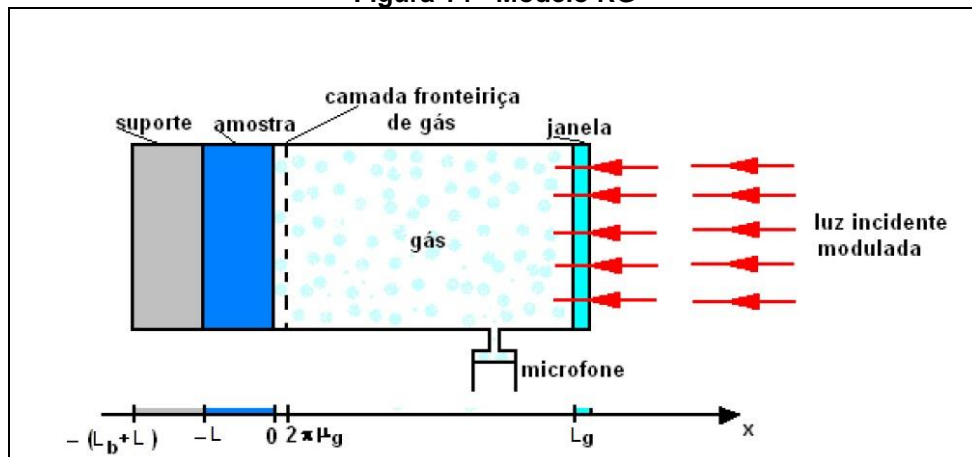
$$H = \frac{P_{\max}}{A(h_c)} \quad (7)$$

2.9 DIFUSIVIDADE TÉRMICA POR TÉCNICA FOTOACÚSTICA

As técnicas fotoacústicas são técnicas não destrutivas usadas para determinar as propriedades térmicas e ópticas de uma amostra em estudo. A versatilidade dessas técnicas está no fato do sinal fotoacústico produzido ser dependente tanto da quantidade de calor gerado na amostra quanto de como esse calor se difunde na mesma. Fundamentadas no princípio fototérmico, onde o estado térmico do material é mudado através de uma luz incidida, estas técnicas oferecem duas possibilidades como técnicas de monitoramento. Uma possibilidade como técnica espectroscópica monitorando a evolução dos espectros fotoacústicos durante o período de processamento da amostra (DIAS, D. T. *et al*, 2014). E, outra usando a técnica fototérmica para estudar como a difusão térmica é afetada por um dado tratamento na amostra (ZIEGLER G., HASSELMAN, 1981).

A Espectroscopia Fotoacústica (PAS) segue o modelo padrão proposto por Rosencwaig e Gersho, conhecido como o modelo RG, o qual consiste de uma pequena célula com gás e uma amostra em seu interior, à uma distância L_g de uma janela transparente de vedação, conforme a figura 14. Um feixe de luz modulada passa pela janela e incide na amostra. Um microfone capacitivo capta as flutuações de pressão no gás, resultante da transferência de calor originado pelo aquecimento periódico do material em estudo (ROSENCWAIG e GERSHO, 1976).

Figura 14 - Modelo RG



Fonte: DIAS, D.T (2005)

Os pulsos de calor provocado pela luz incidente na amostra geram ondas acústicas no gás da câmara fotoacústica. Esses pulsos são caracterizados por três principais mecanismos: difusão térmica, expansão térmica e flexão termoelástica (DIAS, D. T., 2005).

No mecanismo da difusão térmica, a luz de frequência modulada é absorvida pela amostra e energia térmica é transferida. O processo é o de difusão, decorrente da transferência de calor na amostra por condução, onde é o gás aquecido que sofre expansão e contração. Este mecanismo é característico em baixas frequências de modulação.

No mecanismo de expansão térmica, em decorrência do aquecimento gerado, a amostra sofre uma expansão e posteriormente contração. Efeito comum em materiais com baixo coeficiente de absorção óptico.

Finalmente no mecanismo de flexão termoelástica, gradientes de temperatura fazem com que ondas elásticas se formem e se propaguem na extensão da amostra. Devido a um aquecimento não homogêneo da amostra e ao fato de as suas bordas estarem presas o efeito de curvatura termoelástica é formado. Este mecanismo é característico em altas frequências de modulação.

Quando o mecanismo de difusão térmica é predominante na geração do sinal fotoacústico a variação de pressão dentro da câmara fotoacústica segue a Equação 8:

$$\delta P(t) = \frac{VP_0\theta_s(0)}{\sqrt{2I_g a_g T_0}} x e^{j(\omega t - \frac{\pi}{4})} \quad (8)$$

em que, $V=C_p/C_v$ é a razão entre os calores específicos, T_0 é a temperatura média na superfície da amostra, P_0 é a pressão ambiente, l_g é a espessura do gás, $\theta_s(0)$ é a temperatura na interface amostra - gás ($x=0$), a_g é o coeficiente de difusão térmica do gás, $\omega=2\pi f$, e f é a frequência de modulação da radiação incidente.

A difusividade térmica indica como o calor se difunde através de um material, ela expressa a velocidade que um material tem de se ajustar por inteiro à temperatura no seu entorno. O parâmetro difusão de calor na amostra, ou seja, é a difusividade térmica (α) (Equação 9):

$$\alpha = \frac{k}{\rho C} \quad (9)$$

em que, k é a condutividade térmica, uma propriedade física dos materiais que descreve a habilidade do mesmo conduzir calor através de uma espessura, numa direção normal à superfície devido a um gradiente de temperatura; ρ a densidade a qual é definida pela razão da massa pelo volume, e C o calor específico à uma pressão constante definido pela quantidade de calor necessária para aquecer 1°C uma unidade de massa a uma dada temperatura.

O quadro 6 mostra as propriedades térmicas de alguns metais. A importância da medida da difusividade térmica é devida a este parâmetro ser único para cada material (ALMOND e PATEL, 1996), caracterizando fisicamente o “seu interior”. Além disso, sua determinação implica indiretamente na medida da condutividade térmica, desde que a densidade e o calor específico sejam conhecidos. Portanto, utilizando a segunda possibilidade de monitoramento das técnicas fotoacústicas, nomeada como Técnica de Célula Fotoacústica Aberta (OPC – Open Photoacoustic Cell) (SILVA, M. D. *et al*, 1987) é possível explorar as medidas de difusividade térmica para o estudo de parâmetros tais como o grau de cristalinidade, a presença de impurezas e defeitos na microestrutura. Sabe-se que a difusão de calor em materiais depende intensamente da densidade e da natureza das imperfeições encontradas na rede cristalina. Discordâncias, lacunas e o grau de cristalinidade e de reticulação (DIAS, D. T., 2005), como também, defeitos microestruturais (poros e rugosidades), afetam diretamente a difusão do calor. Impurezas, em alguns casos inibem o processo de difusão térmica, sendo assim tem-se que a eficiência e a qualidade de alguns materiais dependem desse processo de difusão térmica (ZIEGLER G., HASSELMAN, 1981).

Quadro 6 - Propriedades térmicas e físicas de alguns materiais.

Material	Densidade (kg/m ³)	Calor Específico (J.kg ⁻¹ .k ⁻¹)	Condutividade Térmica (W.m ⁻¹ .k ⁻¹)	Difusividade Térmica (cm ² /s)
Alumínio (Puro)	2700	945	238	0,9328
Cobre (puro)	8933	385	401	1,166
Ferro (puro)	7870	447	80,2	0,228
Aço (AISI 1010)	7832	434	63,9	0,188
Tungstênio	19300	132	174	0,683

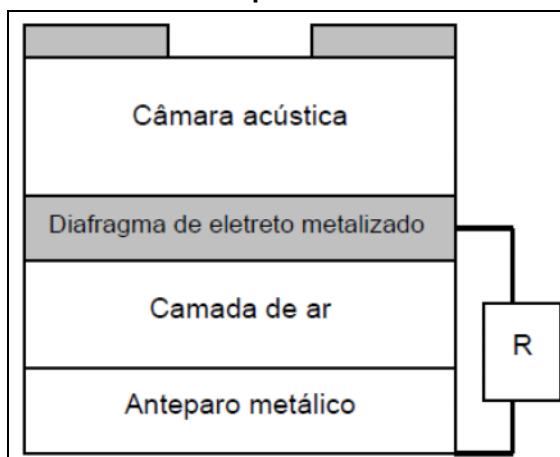
Fonte: Adaptado de (ALMOND *et al.*, 1996)

Para a obtenção de medidas de difusividade térmica dos insertos de metal duro o método fotoacústico utilizado foi a OPC (do inglês, Open Photoacoustic Cell), onde a incidência da luz modulada ocorre primeiramente na superfície frontal da amostra, ou seja, a transmissão se dá pela amostra. Portanto, na técnica OPC a incidência é traseira.

Na Técnica OPC se utiliza a câmara frontal interna de um microfone de eletreto comercial como câmara fotoacústica convencional. A amostra é montada diretamente sobre a superfície superior do microfone de eletreto, de modo que a câmara do microfone seja vedada. Ambos, microfone e amostra, são posicionados em frente à radiação, para que a amostra seja iluminada.

Como demonstrado na figura 15, o microfone de eletreto consiste basicamente de um fino diafragma de eletreto metalizado, uma camada de ar e uma placa de metal nas respectivas ordens. Na face superior encontra-se um orifício circular, o qual deve ser obstruído pela amostra. O sinal elétrico é gerado quando a onda sonora atinge a membrana do eletreto e provoca oscilações na espessura da camada de ar, alterando o campo elétrico e induzindo cargas nas camadas metálicas. As oscilações de pressão na câmara defletem a membrana e geram uma diferença de potencial devido à presença do resistor.

Figura 15 - OPC Desenho Esquemático do Microfone de Eletreto



Fonte: Paiva, R. 2006

2.9.1 Classificação das Amostras com Base em Parâmetros Ópticos e Térmicos

A equação que representa o sinal fotoacústico será dada pelo comportamento não temporal da equação 8. Pode-se perceber que esta equação não é trivial. No entanto, o que atrai a utilização de técnicas fotoacústicas é que, dependendo das propriedades ópticas e térmicas do material, simplificações significativas podem ser feitas. Tais simplificações transformam-se em casos especiais que dependem da forma como as amostras podem ser classificadas, com base em parâmetros ópticos e térmicos, obtendo o respectivo sinal fotoacústico.

O parâmetro óptico (de absorção) é o comprimento de absorção óptico l_{β} que é a distância percorrida pela radiação na amostra até atingir $1/e$ da intensidade incidente. Segundo este parâmetro a amostra é caracterizada em termos de três casos:

$l_{\beta} \ll$ espessura da amostra	\Rightarrow	amostra opticamente opaca
$l_{\beta} \approx$ espessura da amostra	\Rightarrow	amostra absorvedora
$l_{\beta} \gg$ espessura da amostra	\Rightarrow	amostra opticamente transparente.

O parâmetro térmico é o comprimento de difusão térmica μ_s que é a distância na qual uma amplitude de oscilação térmica, transmitida de uma fonte de calor, se atenua ao valor de $1/e$ na amplitude da fonte. Com isso,

$\mu_s \ll$ espessura da amostra	\Rightarrow	amostra termicamente grossa
$\mu_s \gg$ espessura da amostra	\Rightarrow	amostra termicamente fina.

Onde (Equação 10)

$$\mu = \frac{1}{a_i} = \sqrt{\frac{2\alpha_i}{\omega}} \quad (10)$$

A dependência de μ_s com f (frequência de modulação da luz) também possibilita a variação de μ_s e, portanto, uma amostra pode passar de termicamente fina para termicamente grossa aumentando-se a frequência de modulação f . Denomina-se frequência de corte (f_c), a frequência na qual ocorre essa transição, e é dada por (Equação 11):

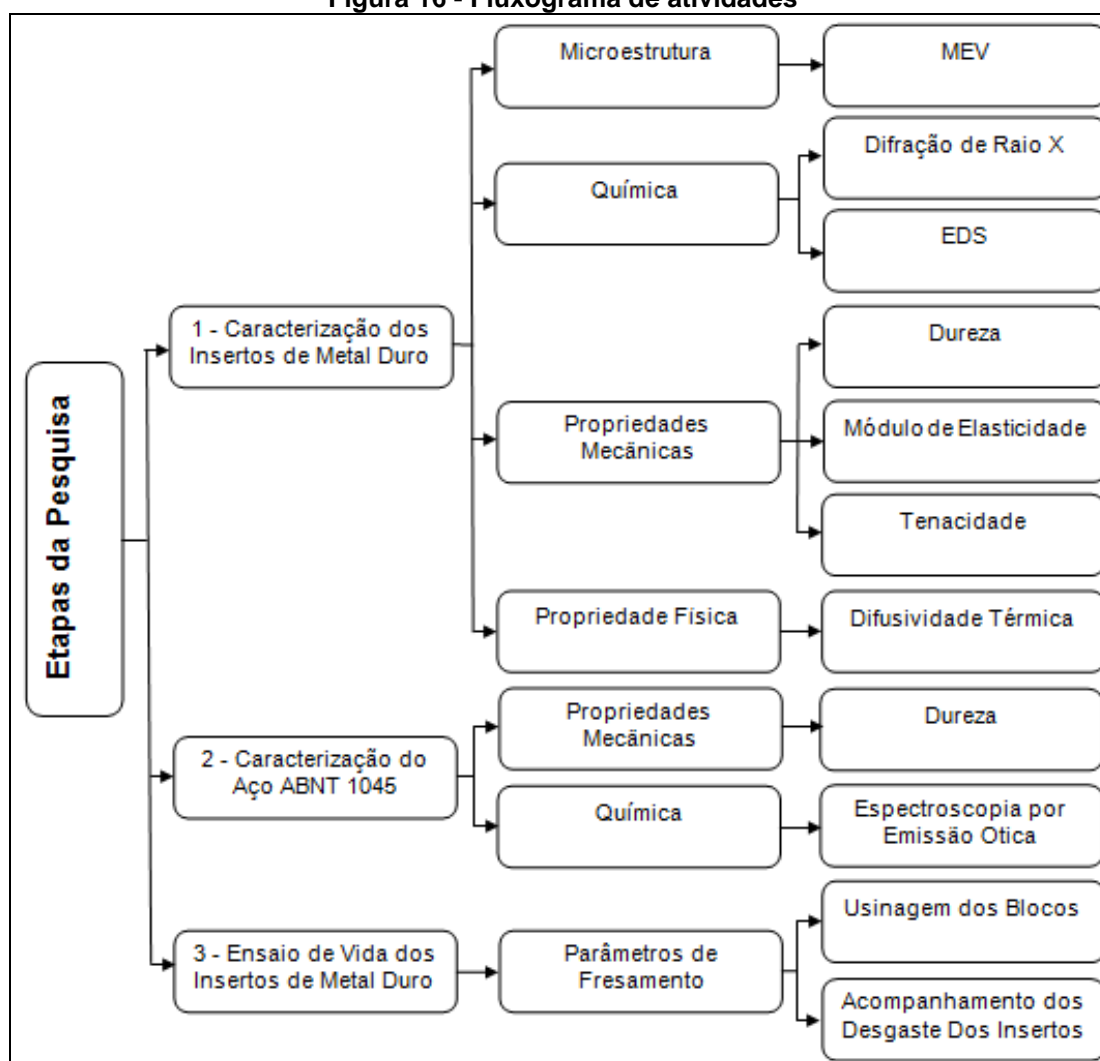
$$\mu_s = 1 \Rightarrow f_c = \frac{\alpha_s}{\pi d^2} \quad (11)$$

3 METODOLOGIA

Neste capítulo são descritas as etapas de desenvolvimento da pesquisa, onde encontram-se os materiais e métodos utilizados, bem como, a forma de análise dos resultados. A metodologia divide-se na caracterização microestrutural das amostras das ferramentas, onde se limita na identificação dos elementos e componentes presentes na microestrutura, espessura do revestimento, tamanho médio dos grãos de carboneto, concentração de ligante e carbonetos; na identificação da microdureza; na caracterização dos corpos de prova de aço ABNT 1045 e na experimentação por usinagem destes corpos de prova.

A sequência de atividades realizadas para os processos de caracterizações das ferramentas de corte do presente trabalho é descrita pelo fluxograma da figura 16.

Figura 16 - Fluxograma de atividades



Fonte: O Autor

3.1 AMOSTRAS

A identificação das ferramentas de corte adotadas para o trabalho estão descritas na sequência:

Ferramenta/Fabricante A (ISO P40), segundo o catálogo do fabricante.

- Classe de metal duro com cobertura CVD ($\text{Ti}(\text{C},\text{N})+\text{Al}_2\text{O}_3+\text{TiN}$) para operações que exigem tenacidade no fresamento de aços. Para os conceitos de cantos a 90° e fresamento de topo, deve ser utilizada em condições mais estáveis como balanço curto, faceamento, fresamento de cantos a 90° raso, etc. Adequada para produção de pequenos lotes de materiais mistos. Funciona bem com ou sem refrigeração (Fotografia 1.a).

O processo de deposição do revestimento supostamente é feito pelo método CVD (com média temperatura, na faixa de 750 a 900°C).

Ferramenta/Fabricante B (ISO P40), segundo o catálogo do fabricante.

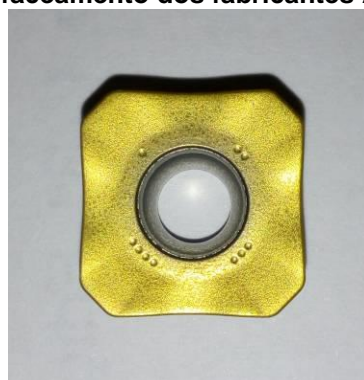
- Classe de metal duro com cobertura PVD (Ti,Al)N -TiN para fresamento em acabamento e semi-desbaste. Primeira escolha para fresamento com baixos avanços e/ou baixas velocidades. Excelente para operações onde exista o risco de vibrações ou quando se necessita refrigeração. Recomendada para usinagem de superligas (Fotografia 1.b).

O processo de deposição do revestimento é feito pelo método PVD (com temperaturas que variam de 200° a 500°C).

Fotografia 1 - Ferramentas de fresamento de faceamento dos fabricantes A (a) e B (b).



(a)



(b)

Fonte: O Autor

3.2 CARACTERIZAÇÃO MICROESTRUTURAL DAS FERRAMENTAS DE CORTE

3.2.1 Preparação das Amostras

Para realizar a caracterização microestrutural das ferramentas de metal duro, foi necessário realizar o corte das ferramentas e posteriormente realizar o lixamento e o polimento das mesmas para se obter uma superfície regular e adequada para as análises.

3.2.1.1 Corte das amostras

Foi realizado o corte da ferramenta de metal duro em dimensões pré determinadas para que pudesse ser embutido. Para o corte foi utilizado um disco com alta concentração de diamante, modelo Series 15 HC, com diâmetro de 178mm (7in) da marca Buehler em uma cortadeira automática, também da marca Buehler, modelo Isomet 4000 (fotografia 2) pertencente ao Laboratório de Materiais da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR) Campus Ponta Grossa. A velocidade de corte foi controlada, segundo recomendações do fabricante do disco, onde foi utilizado um avanço de 2,5 milímetros por minuto em uma rotação de 4.000 rpm. Foi utilizado também, por recomendação do manual do equipamento, um fluido refrigerante para evitar o aquecimento da amostra e efetuar a limpeza do disco de corte e amostra.

Fotografia 2 - Cortadeira automática marca Buehler modelo Isomet 4000



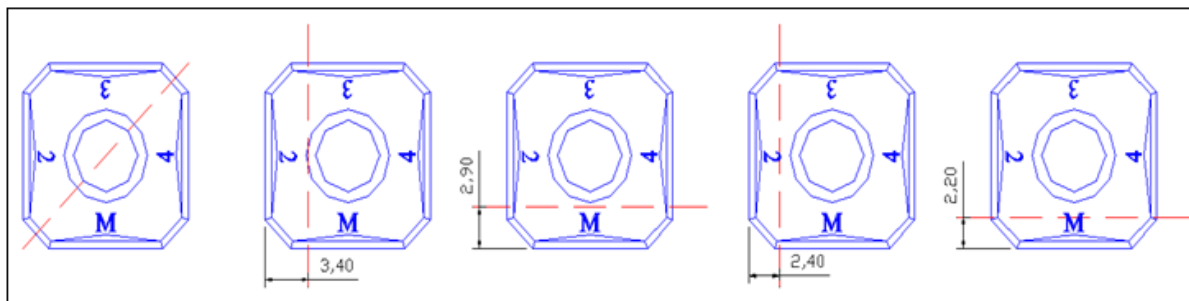
Fonte: O autor

Foram preparadas cinco amostras de insertos distintos de metal duro de cada fabricante, alterando também as dimensões das mesmas e, com isso, obter áreas transversais diversas com diferentes posições, e assim, ter uma ampla visão do substrato na sequência da pesquisa.

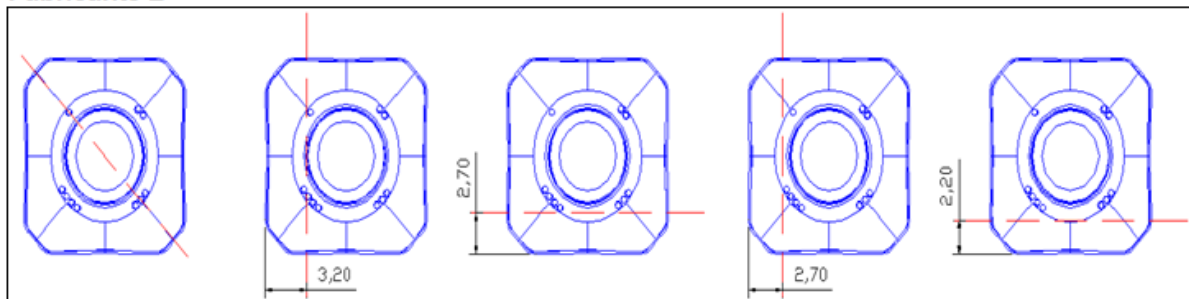
Na figura 17, a qual apresenta o desenho esquemático da ferramenta de corte de cada fabricantes, é possível ver a posição em que cada amostra foi cortada observando a linha tracejada. Nesta figura também é possível observar as espessuras com que cada amostra foi cortada.

Figura 17 - Orientação de corte das ferramentas dos fabricantes A e B

Fabricante A



Fabricante B

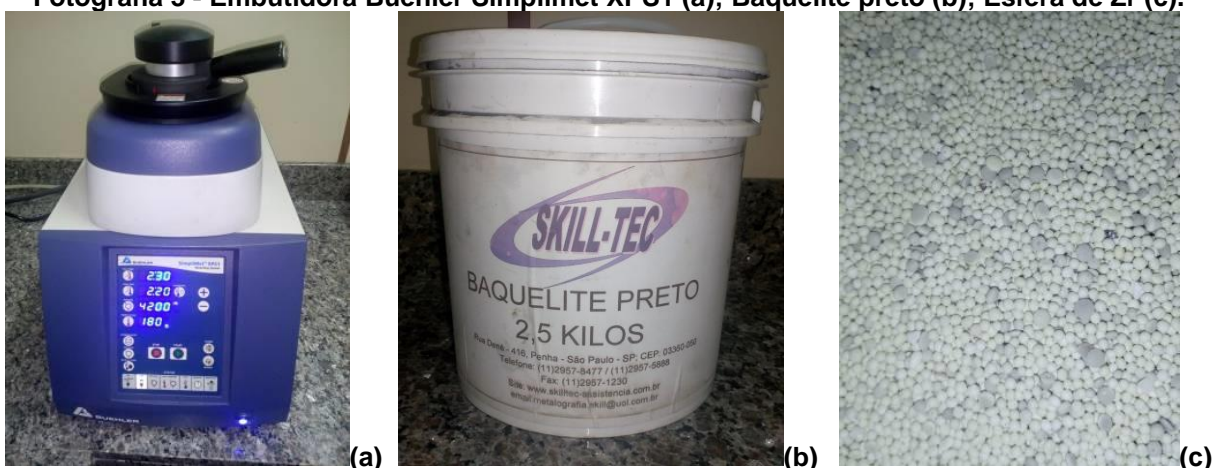


Fonte: O autor

3.2.1.2 Embutimento das amostras

O embutimento das amostras foram realizados na embutidora da marca Buehler, modelo Simplimet XPS1 (fotografia 3.a) pertencente ao Laboratório de Materiais da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR) Campus Ponta Grossa.

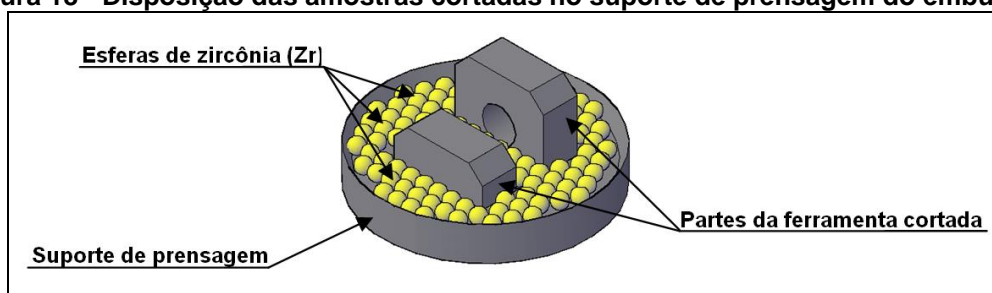
Fotografia 3 - Embutidora Buehler Simplimet XPS1 (a); Baquelite preto (b); Esfera de Zr (c).



Fonte: O autor

Para o embutimento das amostras foi utilizado resina termofixa, ou pó de baquelite (figura 3.b) como é chamado comumente. E para tentar eliminar ou minimizar os prováveis arredondamentos de superfície que podem ocorrer nas amostras da ferramenta de metal duro devido a diferença de resistência entre o baquelite e a amostra, foram colocadas as duas partes da ferramenta cortada, ambas com a face cortada voltada para baixo, no suporte de prensagem do embutidor (Figura 19). Além disso, foi colocado também esferas de zircônia (Zr) (fotografia 3.c) ao redor das amostras, eliminando assim o desgaste excessivo do baquelite, durante o processo de lixamento e polimento.

Figura 18 - Disposição das amostras cortadas no suporte de prensagem do embutidor



Fonte: O autor

3.2.1.3 Lixamento e polimento

Para a visualização e análise da superfície do metal duro, é necessário que as amostras ainda sejam submetidas ao processo de lixamento e polimento. Para tais processos foi utilizado uma politriz automática da marca Buehler modelo Beta

(fotografia 4), pertencente ao Laboratório de Materiais da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR) Campus Ponta Grossa.

Fotografia 4 - Politriz automática Buehler Beta



Fonte: O autor

A utilização da politriz contribuiu para que os parâmetros como forças, refrigeração e tempo de processo fossem controlados com maior precisão.

No processo de lixamento realizado para eliminar riscos provenientes do corte e deixar a superfície mais plana possível, foi utilizando um disco de diamante com base magnética da marca Struers, modelo MD-Piano 120, de 200 milímetros de diâmetro (8"), projetado e desenvolvido para o lixamento de materiais que variam de 150-2.000HV. Adotou-se um tempo de 4 minutos e uma força de 25N numa rotação de 300 rpm (rotação por minuto).

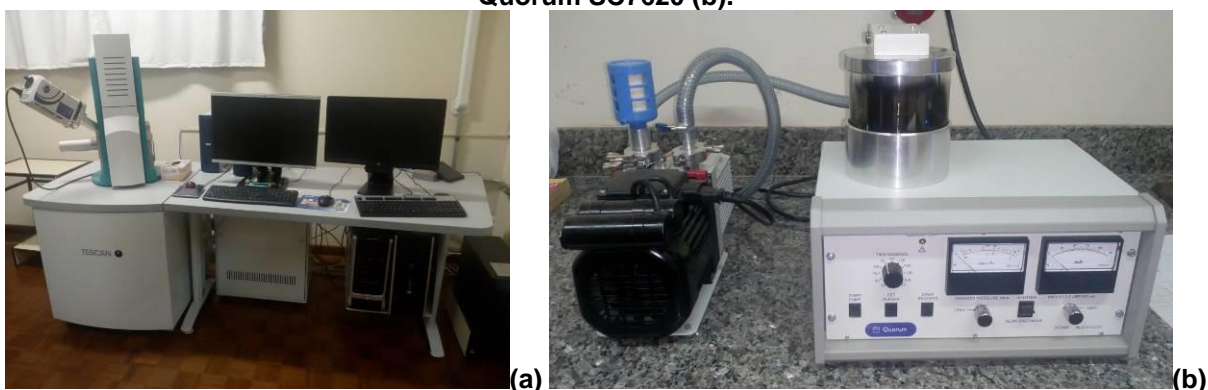
Para o polimento, foi utilizado um pano de polir em fibras de poliéster com base magnética da marca Buehler, modelo Ultra MB, de 203 milímetros (8"), projetado para conferir/conseguir a planicidade do prato, destinado a polimento grosso de amostras que requerem planicidade absoluta com compostos de diamante com 15 micron ou mais fino. Sobre este pano de polir, foi utilizado uma suspensão de diamante de 0,25 micron (μm) também da marca Buehler. Para tal polimento, utilizou-se na politriz uma rotação de 250 rpm, por um tempo de 5 minutos, também numa força de 25N. O processo foi realizado até que o acabamento superficial estivesse adequado à análise das imagens. O processo de limpeza das amostras entre cada polimento foi realizado em ultrassom com álcool, pois a água pode reagir pelo processo de eletrólise com o cobalto quimicamente ativo presente no metal duro (ASM METALS HANDBOOK, 2004).

Dentre as cinco amostras embutidas de cada fabricante, duas foram atacadas. O reagente utilizado foi o Murakami (10g KOH ou NaOH + 10g $K_3Fe(CN)_6$ + 100ml H_2O). As amostras permaneceram no reagente por dois minutos e em seguida foram limpas com álcool 96% e secas.

3.2.2 Imagem por Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV-EDS)

A partir do ataque foi realizada a caracterização do metal duro, com as observações das imagens obtidas no microscópio eletrônico de varredura (MEV), modelo VEGA 3 LMU da Tescan (fotografia 5.a) pertencente ao Laboratório de Materiais da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR) Campus Ponta Grossa.

Fotografia 5 - Microscópio eletrônico de varredura (MEV) Tescan Vega 3 LMU (a); Metalizador Quorum SC7620 (b).



Fonte: O autor

As amostras foram metalizadas no metalizador da marca Quorum modelo SC7620 (fotografia 5.b) por um tempo de dois minutos.

A metodologia adotada na análise microestrutural das imagens obtidas no MEV, para identificação dos elementos químicos presentes, foram baseadas nas seguintes técnicas:

- Microanálise – EDS (Energy Dispersive System / espectroscopia por energia dispersiva) para verificar quais os elementos que estão presentes na microestrutura: pode ser realizada pontual para avaliação de um determinado grão ou de uma região pré-estabelecida;

- Mapeamento – É realizado a partir da microanálise que identifica a localização dos componentes em determinada região da amostra;

- Linha – É realizado a partir da microanálise e identifica os componentes presentes em uma determinada linha escolhida da amostra;

- Medições diversas – É realizado a partir da microanálise e identifica o tamanho de partículas e espessuras, mas para isso é necessário obter uma imagem com alta resolução para evitar possíveis erros de medição. Com esta técnica, pode-se encontrar a espessura do revestimento de ambas as amostras

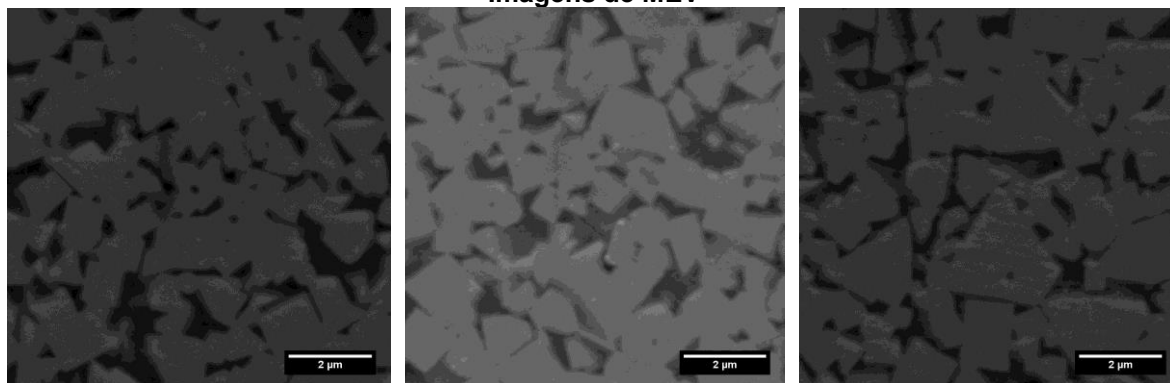
Segundo Mannesson (2011), devido a dificuldade em se obter alta qualidade em imagens microestruturais de metal duro, é extremamente difícil de se utilizar análises automáticas de imagens.

3.2.3 Análise da Fração de Matriz (Co) e Carboneto (WC) da Ferramenta de Corte

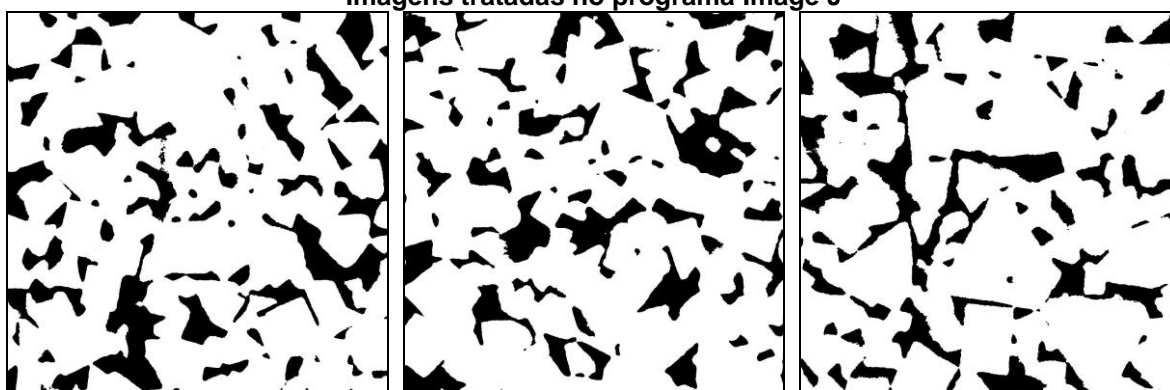
Para determinação da fração de carboneto de tungstênio na estrutura da amostra foi utilizado o software Image J, a partir das imagens obtidas no MEV. Também foi caracterizada nesta mesma metodologia de análise, a concentração do ligante e porosidade. Para determinação da concentração, foram avaliadas imagens, tomadas em diferentes regiões das amostras. Com o levantamento das concentrações em cada imagem, foi realizada a média aritmética dos valores encontrados e estabelecido o percentual de carbonetos e do ligante mais poros.

Para verificação do tamanho médio de grão foi utilizado o software Image J, que realiza a identificação das interseções por meio da validação dos contornos dos grãos através do tratamento das imagens (figura 19). Devido ao tamanho dos grãos presentes na microestrutura se apresentar na faixa de 0,5 a 4 μm , a verificação das interseções foi realizada manualmente. Assim, foi possível o estabelecimento de um padrão mais homogêneo de verificação dos contornos para ambas as amostras. Em ambas as ferramentas foram avaliadas as imagens geradas a partir do modo de elétrons secundários que realçam os relevos dos grãos dos carbonetos. A ampliação adotada foi de 15.000 vezes.

Figura 19 - Imagens tratadas para realização do cálculo da porcentagem média de WC e Co+poros em amostras do fabricante A
Imagens de MEV



Imagens tratadas no programa Image J



Fonte: O Autor

3.3 CARACTERIZAÇÃO QUÍMICA DO METAL DURO

3.3.1 Preparação das Amostras

Para a Difração de Raio X, foi utilizada uma amostra do revestimento já preparada para o ensaio de Difusividade Térmica e uma ferramenta ainda intacta de cada fabricante.

3.3.2 Difração de Raio X

O objetivo principal da análise por difração de raios X foi verificar as fases presentes nas amostras dos fabricantes A e B. O difratograma foi medido usando uma fonte de $\text{Cu K}\alpha$ ($\lambda_{\text{K}\alpha 1} = 1,54046 \text{ \AA}$), 40kV e 30mA e de varredura contínua de 2θ , variando de 5° a 80° .

O equipamento utilizado foi o difratômetro de raio X Rigaku – Ultima IV (Fotografia 6) pertencente ao Complexo de Laboratórios Multiusuários (C-Labmu) da Universidade Estadual de Ponta Grossa (UEPG).

Fotografia 6 - Difratômetro de raio-X Rigaku – Ultima IV



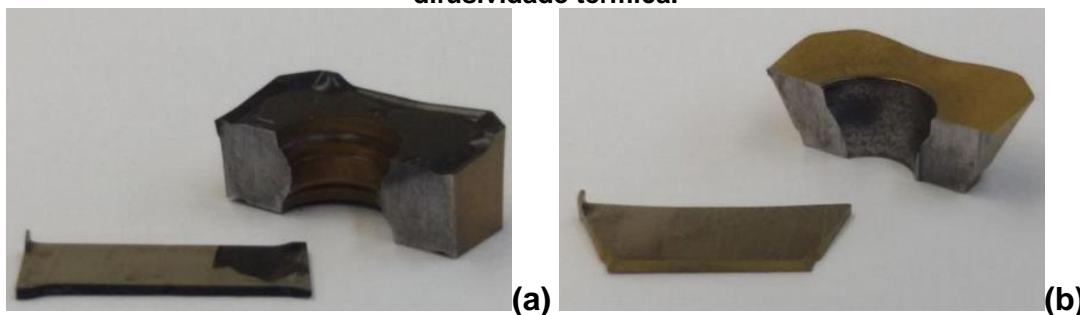
Fonte: O autor

3.4 CARACTERIZAÇÃO DAS PROPRIEDADES MECÂNICAS E FÍSICAS DO METAL DURO

3.4.1 Preparação das Amostras

Para realizar as análises de difusividade térmica pelo método de célula fotoacústica - OPC, foram cortadas fatias de amostras (Fotografia 7) das ferramentas dos fabricantes A e B em uma cortadeira automática, conforme já descrito no item 3.2.1.1, com espessuras informadas no quadro 7.

Fotografia 7 - Amostras seccionadas dos insertos dos fabricantes A (a) e B (b) para análise de difusividade térmica.



Fonte: Souza, J. S. 2016

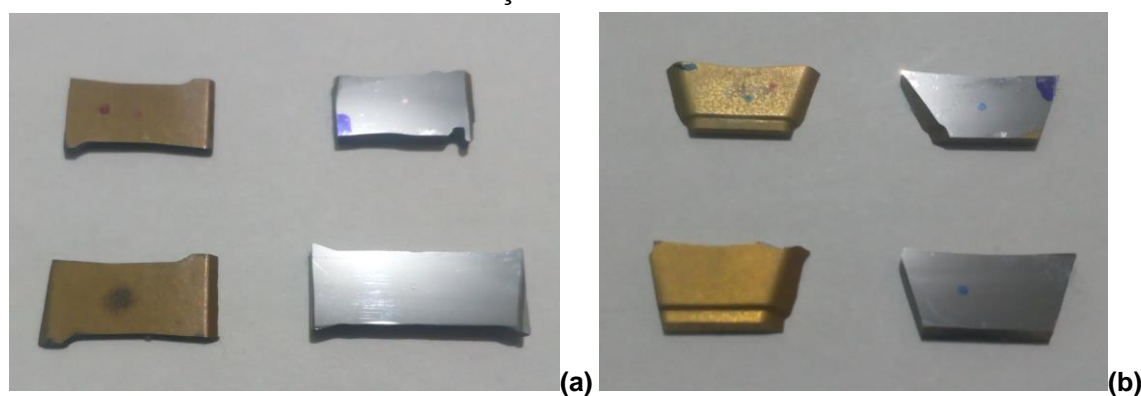
Quadro 7 - Espessuras das amostras.

ESPESSURAS DAS AMOSTRAS		
AMOSTRA / SUBSTRATO	FABRICANTE A	FABRICANTE B
1	505 μm	655 μm

Fonte: O Autor

Para a determinação da dureza (H) e do módulo de elasticidade (E) nos ensaios de indentação instrumentada, foram cortadas duas amostras do revestimento e duas amostras do substrato de cada fabricante, totalizando oito amostras (Fotografia 8), com uma espessura média de 1mm.

Fotografia 8 - Amostras seccionadas dos inserts dos fabricantes A (a) e B (b) para ensaio de indentação instrumentada.



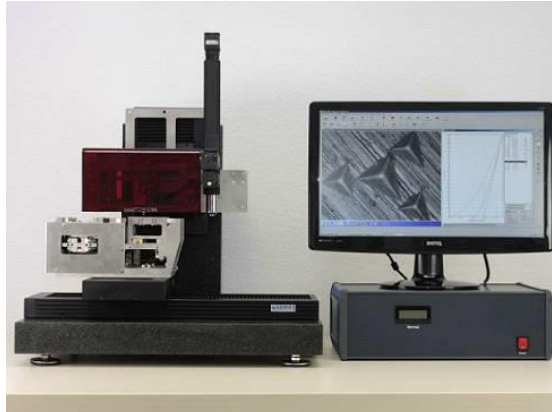
Fonte: O autor

Para os ensaios de difusividade térmica, dureza e módulo de elasticidade, foi realizado o lixamento e polimento conforme descrito no item 3.2.1.3. Sendo que para as análises dos revestimentos, foi feito apenas o lixamento na parte posterior dos mesmos para acertar o paralelismo das faces e na espessura das amostras.

3.4.2 Dureza e Módulo de Elasticidade

Para a determinação da dureza (H) e do módulo de elasticidade (E), foram realizados ensaios de indentação instrumentada (método de Oliver e Pharr) em amostras de ferramentas de fresamento de metal duro. Os ensaios foram realizados em um Nanoindentador Instrumentado, Modelo: UNAT-ASMEC/Zwick/Roell, no Complexo de Laboratório Multiusuários (C-Labmu) da Universidade Estadual de Ponta Grossa (Fotografia 9).

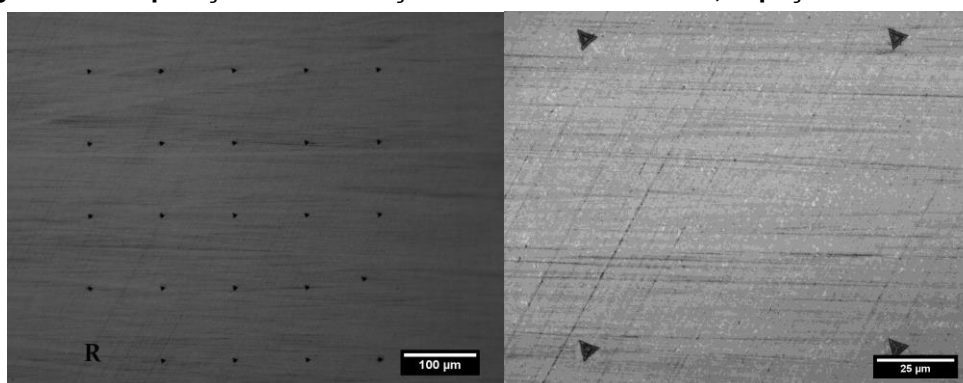
Fotografia 9 - Nanoindentador Instrumentado UNAT - ASMEC/Zwick/Roell.



Fonte: O autor

O ensaio consistiu na realização de uma matriz com 25 indentações dispostas numa matriz (5 x 5) (Figura 20), espaçadas 100 μm entre elas, para que não haja interação dos campos de tensão gerados pelas indentações, mascarando assim os resultados obtidos. Utilizou-se o método QCSM (Quasi Continuous Stiffness Measurement) no qual um sinal senoidal é com carregamento e descarregamento, com carga máxima de 400 mN. O penetrador utilizado para os ensaios foi uma ponta do tipo Berkovich, (ponta piramidal com base triangular).

Figura 20 - Disposição da indentações em uma matriz 5 x 5, espaçadas em 100 μm .



Fonte: O autor

Para este ensaio foram preparadas duas amostras contendo apenas o substrato da ferramenta e duas amostras contendo o revestimento da ferramenta, sendo isso para cada fabricante, totalizando oito amostras a serem ensaiadas.

Foram realizadas duas medições tanto para o substrato quanto para o revestimento, sendo estas submetidas a uma correção. A correção consistiu em ajustar o ponto inicial de contato da ponta com a amostra, visto que a rugosidade

dificultou sua determinação automática. O método foi o ajuste posição inicial da curva pela equação de Hertz.

A intenção deste ensaio é verificar as diferenças da dureza e do módulo de elasticidade entre o substrato e o revestimento de ambas as ferramentas.

3.4.4 Tenacidade à fratura por indentação

A tenacidade à fratura é uma propriedade mecânica dos materiais muito estudada na literatura, sendo definida como a energia necessária para provocar a propagação de uma trinca no material até ocasionar sua ruptura.

Para este estudo, foram realizadas quatro indentações em cada uma das duas amostras do substrato de cada fabricante, já preparadas anteriormente. As indentações foram feitas utilizando uma ponta Vickers de diamante com carga de 190N, com tempo de permanência de 15s e distância entre as indentações de 1,5mm.

O equipamento utilizado para fazer as indentações foi uma máquina de ensaio universal Shimadzu, modelo Autograph AGS-X 5kN (Fotografia 10) pertencente ao Laboratório de Propriedades Mecânicas e Superfícies da Universidade Estadual de Ponta Grossa (UEPG).

Fotografia 10 - Máquina de ensaio universal Shimadzu, modelo Autograph AGS-X 5kN.



Fonte: O autor

Após as indentações, as amostras foram levadas para o MEV, onde pode-se obter as imagens das indentações e também fazer as medições das trincas que se formaram no ensaio.

Com a média dos comprimentos das trincas e a média da dureza e módulo de elasticidade dos substratos de cada ferramenta, foi realizado o cálculo utilizando a Equação 12 para encontrar a tenacidade do substrato das ferramentas.

$$K_c = 0,016 \cdot \left(\frac{E}{H_v} \right)^{1/2} \cdot \frac{P}{C^{3/2}} \quad (12)$$

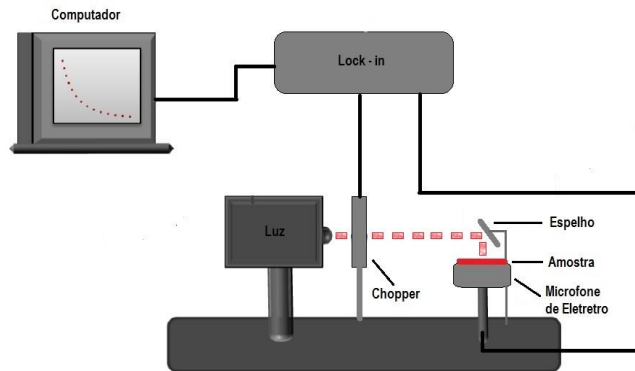
Onde:

- P é a carga aplicada durante o teste de dureza Vickers;
- E é o módulo de elasticidade;
- H é a dureza Vickers;
- C é a média do comprimento da semi-diagonal mais trinca encontrado nas indentações.

3.4.5 Difusividade Térmica pelo Método de Célula Fotoacústica Aberta - OPC

O conjunto dos equipamentos que compõem a Técnica de Célula Fotoacústica Aberta para as medidas de difusividade térmica, pertencente ao LAPTO da Universidade Tecnológica Federal do Paraná, campus Ponta Grossa, pode ser visualizado conforme a figura 21. Constituído por uma luz emitida pelo laser de estado sólido com 635 nm, 25 mW (Radius da Coherent). O feixe de luz passa através do chopper (modelador) modelo SR540 (da Stanford Research Systems). Por intermédio de um espelho ótico, de 25 mm de diâmetro e foco de 50 mm, a radiação modulada é direcionada até a amostra no centro do microfone de eletreto. Tanto o chopper quanto o microfone são conectados ao lock-in (amplificador) SR840 (Stanford Research Systems) que mede a variação de pressão transformada em sinal elétrico amplificado pelo microfone. O amplificador é conectado ao computador que gerencia, faz a aquisição de dados e comanda o próprio lock-in nas medidas de varreduras de frequência.

Figura 21 - Esquema experimental para a OPC utilizado no LAPTO da UTFPR – Ponta Grossa



Fonte: Souza, J. S. 2016

Para finalizar o experimento, se extrai o sinal (S) gerado para cada frequência, do programa de gerenciamento de dados, como segue a Equação 13:

$$S = \frac{A}{f} \exp(-b\sqrt{f}) \quad (13)$$

para uma amostra termicamente grossa ($\mu_s \ll$ espessura da amostra) e opaca. Em seguida, o sinal é tratado com o auxílio de um programa matemático. Primeiramente é feita a correção do sinal obtido, usando S/X , onde X é a função resposta do microfone de eletreto, dada pela Equação 14:

$$\bar{X} = |X * X|^{\frac{1}{2}} = \frac{\omega T_E}{[1 + (\omega T_E)^2]^{\frac{1}{2}}} \quad (14)$$

em que $T_E = RC$, sendo R a resistência e C a capacitância.

O valor da difusividade térmica é obtida fazendo o ajuste da equação 15, uma vez que já se conhece a espessura do material (Equação 15):

$$\alpha = \frac{\pi L^2}{b^2} \quad (15)$$

A OPC é uma técnica que não exige muita preparação da amostra a ser avaliada. Portanto para o presente estudo as amostras de ferramenta de fresamento foram cortadas por uma serra de alta precisão, obtendo uma amostra do fabricante A de 505 μm de espessura e uma amostra do fabricante B de 655 μm de espessura, ambas medidas com o auxílio de um micrômetro.

A varredura de frequência para as medidas do sinal fotoacústico foi de 25-55 Hz, de 1 em 1 Hz e numa média de 10 pontos para cada frequência. Para cada

amostra foi realizado o experimento de varredura quatorze vezes. A amostra era retirada do microfone para posteriormente executar uma varredura de modo a intercalar o experimento entre a amostra dos fabricantes A e B.

3.5 CARACTERIZAÇÃO DO AÇO ABNT 1045

Para a realização do ensaio de vida útil das ferramentas de fresamento, foi adquirido blocos de aço ABNT 1045 com dimensões de 250mm de largura por 150mm de altura e 500mm de comprimento.

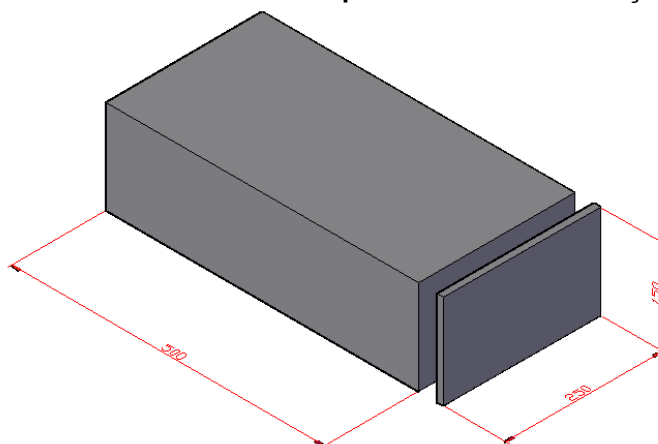
Para se ter uma certeza de que os blocos de aço adquiridos possuem as mesmas propriedades e não haja grandes diferenças entre eles, fez-se necessário os ensaios de Microdureza e Espectroscopia por Emissão Óptica para caracterizá-los.

É importante ressaltar que os blocos de aço ABNT 1045 vieram diretamente da usina e não passaram por um processo de tratamento/normalização, e que também não se teve condições necessárias para fazer este tratamento/normalização devido a falta de equipamentos (forno) e também por se tratar de blocos com aproximadamente 148kg.

3.5.1 Corte das Amostras

Para os ensaios de caracterização destes blocos, foram cortadas fatias com aproximadamente 10mm de espessura (Figura 22 em um corte transversal).

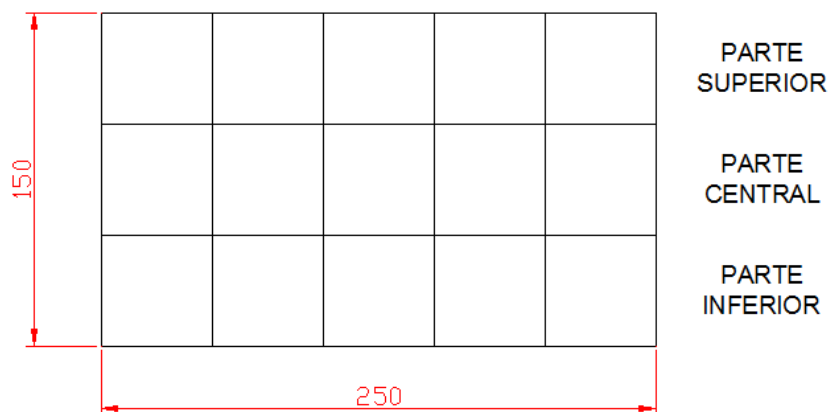
Figura 22 - Corte de uma fatia com espessura de 10mm de aço ABNT 1045



Fonte: O autor

Posteriormente, desta fatia de 10mm de espessura, foram cortadas tiras com largura de 50mm e comprimento de 250mm, separando-as em parte superior, parte central e parte inferior, e destas tiras foram tiradas cinco amostras quadradas de 50 por 50mm conforme figura 23.

Figura 23 - Corte de amostras quadradas de 50 por 50mm.



Fonte: O autor

Para ambos os cortes, utilizou-se de uma serra fita horizontal, marca Acra, Modelo SBS-1335 pertencente ao Laboratório de Desenvolvimento de Produto da UTFPR - PG, conforme fotografia 11.

Fotografia 11 - Serra Fita Horizontal, marca Acra, Modelo SBS-1335



Fonte: O autor

Antes de realizar o ensaio de dureza, as amostras tiveram as duas faces retificadas em uma retífica plana tangencial modelo PFG 3060AH marca Perfect, pertencente ao Laboratório de Usinagem da UTFPR-PG. Esta retificação foi realizada para obter o paralelismo desejado entre as faces das amostras.

3.5.2 Dureza

Os ensaios de dureza nas amostras do aço comercial SAE 1045, foram realizados em um Durômetro Pantec Modelo RBS Analógico (Fotografia 12), do Laboratório de Ensaio Destrutivos da UTFPR – PG, seguindo a norma ABNT NBR ISO 6508-1:2019, Materiais Metálicos - Ensaio de Dureza Hockwell.

Fotografia 12 - Durômetro Pantec RBS



Fonte: O autor

Para se chegar a um valor de dureza médio, foram feitas nove indentações em cada uma das amostras já mencionadas no item 3.5.1.

Neste método, a carga do ensaio é aplicada em etapas, ou seja, primeiro se aplica uma carga preliminar, para garantir um contato firme entre o penetrador e o material ensaiado, e depois aplica-se a carga do ensaio propriamente dita. A leitura do grau de dureza é feita diretamente num mostrador acoplado à máquina de ensaio, de acordo com uma escala predeterminada, adequada à faixa de dureza do material.

O penetrador utilizado na máquina de ensaio de dureza foi do tipo esférico (esfera de aço temperado) de 1,5875mm, com carga preliminar de 98,07N.

A escala de dureza rockwell regular (HRBW) foi a utilizada, a qual possui uma faixa aplicável de 10 HRBW a 100HRBW. Posteriormente foi realizada a comparação dos valores em uma tabela de conversão de dureza para se chegar a dureza Brinell (HB), utilizada normalmente na nomenclatura de aços comerciais.

3.5.3 Espectroscopia de Emissão Ótica

O ensaio de Espectroscopia de Emissão Ótica foi realizado no equipamento Shimadzu, modelo PDA-7000, pertencente ao Centro de Transformação de Materiais (CETEM) da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR) Campus Ponta Grossa. (Fotografia 13)

Fotografia 13 - Espectrômetro de Emissão Ótica Shimadzu PDA-7000



Fonte: O autor

Esta atividade foi realizada utilizando três das amostras já cortadas para o ensaio de dureza de cada fatia do bloco, sendo uma amostra da parte superior, outra da para inferior e outra da parte central da fatia.

Em cada amostra foram feitas três queimas no espectrômetro, e assim pôde-se obter uma média por amostra dos elementos constantes por amostra e posteriormente uma média dos elementos constantes por fatia/bloco do aço SAE 1045 comercial.

3.6 ENSAIO DE VIDA ÚTIL DAS FERRAMENTAS

3.6.1 Definição dos Parâmetros de Fresamento

Por se tratar de ferramentas de corte de dois fabricantes diferentes, primeiramente verificou-se na literatura de cada um, informações pré estabelecidas e indicadas para o bom uso das ferramentas como o avanço por dente (f_z), a

velocidade de corte (v_c) e a profundidade de corte (a_p) conforme apresentado no quadro 8.

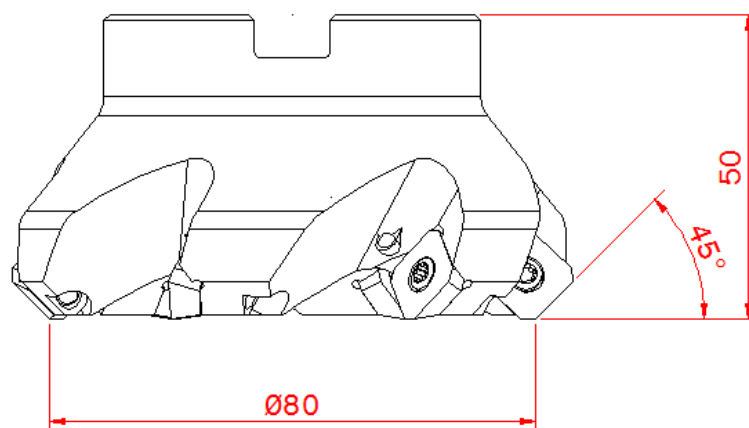
Quadro 8 - Informações pré estabelecidas dos fabricantes.

Fabricante	Classificação ISO	Avanço por Dente (f_z)	Velocidade de Corte (v_c)	Profundidade de Corte Máxima (a_{pmax})
A	P40	0,30 mm/aresta (0,15 - 0,45 mm/aresta)	250m/min (205 - 305m/min)	6,0mm
B	P40	0,25 mm/aresta (0,10 - 0,40 mm/aresta)	180m/min (150 - 235m/min)	4,5mm

Fonte: O Autor

O cabeçote fresador adotado para ambas as ferramentas foi o cabeçote com diâmetro nominal de 80mm e disposição para seis insertos, conforme figura 24.

Figura 24 - Cabeçote de fresador



Fonte: Adaptado de Seco Tools AB (2016).

Os ensaios de vida útil das ferramentas foram realizados em uma Fresadora Universal Marca Clark, modelo FH 4 x 1000mm, pertencente ao Laboratório de Desenvolvimento de Produto da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR) Campus Ponta Grossa (Fotografia 14).

Fotografia 14 - Fresadora Universal Clarck modelo FH 4x1000mm



Fonte: O autor

Por se tratar de uma fresadora universal convencional, a mesma já possui rotações e avanços estabelecidos e são selecionados através de alavancas conforme é possível verificar na figura 25.

Figura 25 - Rotações (a) e avanço por eixo (b) da máquina

	I			II		
	A	B	C	A	B	C
L	70	94	130	178	252	346
M	466	642	864	1176	1590	2160

(a)

		X, Y, Z mm/min					
		I			II		
60 Hz		X	Y	Z	X	Y	Z
A	M	26	26	12	150	140	60
	L	61	58	24	325	303	130
B	M	45	42	18	235	218	94
	L	96	90	36	505	470	200

(b)

Fonte: O Autor

Com as informações já mencionadas, foi possível realizar os cálculos necessários e chegar aos parâmetros de corte descritos no quadro 9. É importante salientar que foi utilizado o avanço no eixo X da máquina para os ensaios.

No quadro 8, nota-se que o range de velocidade de corte entre as ferramentas se sobrepõe de 205 a 235m/min. Devido a isso, no quadro 9 manteve-se quatro experimentos que contemplaram v_c para as ferramentas A e B para uma possível comparação.

Quadro 9 - Parâmetros de Corte.

Fabricante	Número do Experimento	Rotação da Máquina (RPM)	Velocidade de Corte (v_c) mm/min	Avanço da Máquina (f) mm/min	Avanço por Dente (f_z) mm/aresta	Profundidade de Corte (a_p) mm	Número de Insertos	Número de Passes no Bloco	Tempo Médio de Corte Efetivo (min)
A	1	864	217,1	235	0,272	1,5	1	3	6:19
A	2	864	217,1	325	0,376	1,5	1	4	6:05
B	3	864	217,1	235	0,272	1,5	1	3	6:19
B	4	864	217,1	325	0,376	1,5	1	4	6:05

Fonte: O Autor

As usinagens foram realizadas em blocos do aço ABNT 1045 com dimensões de 500mm de comprimento, 250mm de largura e 150mm de altura. Por se tratar de um bloco com aproximadamente 148kg, este bloco foi soldado por pequenos cordões de solda a uma chapa já preparada e com furações próprias para fixação na mesa de trabalho da fresadora. O tipo de fresamento adotado foi o concordante.

A cada tempo médio de corte efetivo, as ferramentas foram retiradas do cabeçote fresador e levadas ao MEV para acompanhar o desgaste e possíveis avarias nas mesmas. Também foi adotado um desgaste total de 200 μ m na aresta de alisamento da ferramenta ou avarias como quebra, trincas e entalhes para encerrar o ensaio.

Houve a repetição dos ensaios para confrontar o resultado e ter uma confirmação das informações.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Inicialmente são apresentados, e discutidos, nessa seção os resultados da caracterização microestrutural do metal duro realizada por meio de microscopia eletrônica de varredura, tratamento de imagens com o programa Image J, obtenção da porcentagem de WC e Co+poros por área quadrada da imagem e obtenção da espessura média dos revestimentos de ambas as ferramentas.

Na sequência são descritos os resultados das caracterizações químicas por meio de análises de difração de raio X e espectroscopia por energia dispersiva (EDS).

Posteriormente são descritos os resultados da caracterização de algumas propriedades mecânicas por meio de ensaios de dureza e módulo de elasticidade.

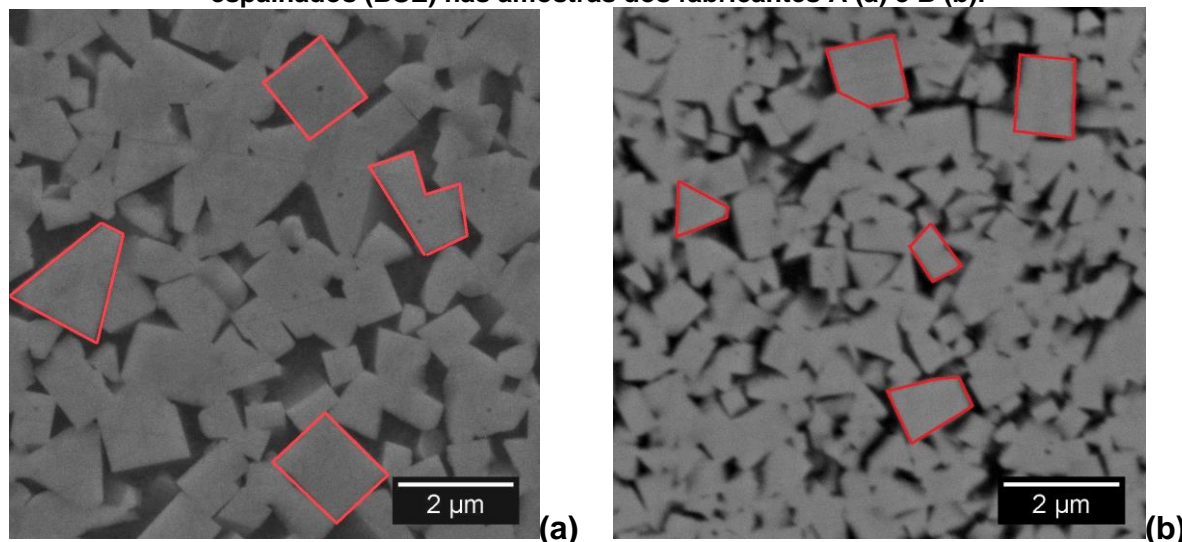
E por fim, é descrito o resultado da caracterização física por meio da difusividade térmica.

4.1 CARACTERIZAÇÃO MICROESTRUTURAL DO METAL DURO POR MEIO DA MICROSCOPIA ELETRÔNICA DE VARREDURA (MEV)

O método mais utilizado para identificação do tamanho de grão dos carbonetos de tungstênio (WC) é a análise com base em imagens de microscópios eletrônicos de varredura (MEV) tomadas em um plano de corte mostrando a microestrutura em 2D.

As figuras 26a e 26b representam a micrografia das amostras dos fabricantes A e B respectivamente, onde ambas são comparadas com o intuito de avaliar a particularidade de cada microestrutura.

Figura 26 - Microscopia Eletrônica de Varredura, obtidas por detecção de elétrons retro espalhados (BSE) nas amostras dos fabricantes A (a) e B (b).



Fonte: O Autor

Na micrografia do fabricante A, conforme figura 26a, observa-se grãos maiores se comparado ao Fabricante B. A imagem da microestrutura referente ao Fabricante B, figura 26b, apresenta uma microestrutura mais refinada e com grãos mais reduzidos.

4.2 OBTENÇÃO DA PORCENTAGEM DE WC E Co+POROS POR ÁREA DA IMAGEM

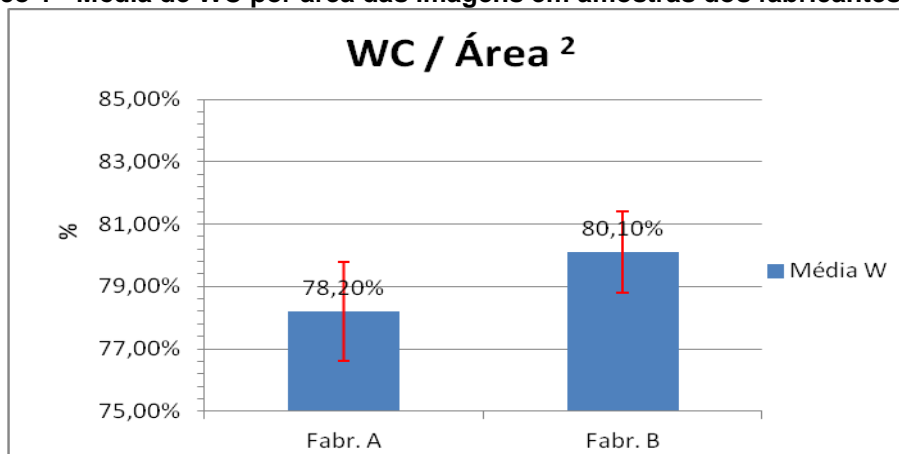
A partir das imagens obtidas com o MEV foram averiguadas a morfologia, a porcentagem média de WC e Co+Poros e espessura média dos revestimentos presentes nas imagens dos insertos dos fabricantes A e B, qualitativamente.

Com a ajuda do software Image J, foi possível efetuar uma análise de imagens obtidas pelo MEV, e obter um valor médio da porcentagem por área da partícula de WC e do ligante Co juntamente com poros presentes.

Para o software fornecer o valor de tal porcentagem, foi informado ao programa que a imagem teria apenas duas tonalidades de cores, sendo o WC a cor mais clara e o Co mais porosidade a cor mais escura, e assim, programa calculou a porcentagem das áreas mais escuras das imagens, o mesmo comparou o valor da área total da imagem e calculou qual a porcentagem da área escura havia na mesma.

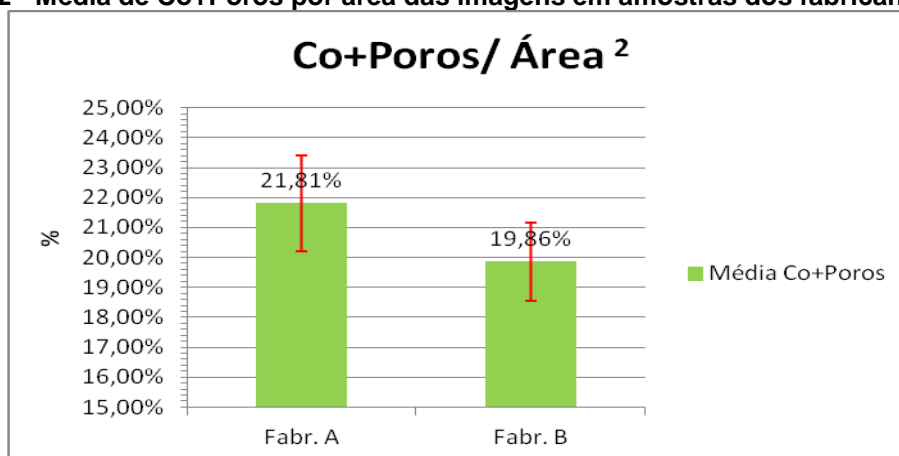
Os dados obtidos no programa Image J, com as devidas porcentagens médias de WC e Co+poros nas amostras dos fabricantes A e B, podem ser observados nos gráficos 1 e 2.

Gráfico 1 - Média de WC por área das imagens em amostras dos fabricantes A e B.



Fonte: O autor

Gráfico 2 - Média de Co+Poros por área das imagens em amostras dos fabricantes A e B.



Fonte: O autor

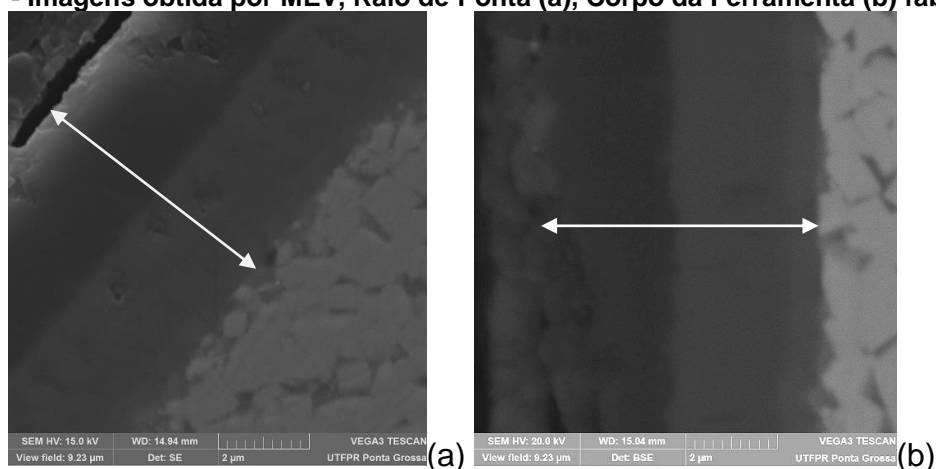
Ao comparar a média e o desvio padrão das porcentagens de WC presentes nas amostras dos dois fabricantes é possível observar que a ferramenta do fabricante A apresenta menor porcentagem de WC e maior porcentagem de Co+poros em sua microestrutura.

4.3 OBTENÇÃO DA ESPESSURA MÉDIA DOS REVESTIMENTOS DE AMBAS AS FERRAMENTAS

Utilizando as imagens obtidas com o MEV (Figuras 27 e 28), foi possível efetuar diversas medições de espessura em vários pontos do revestimento de ambas as ferramentas. Com tais valores foi encontrado o valor médio para a

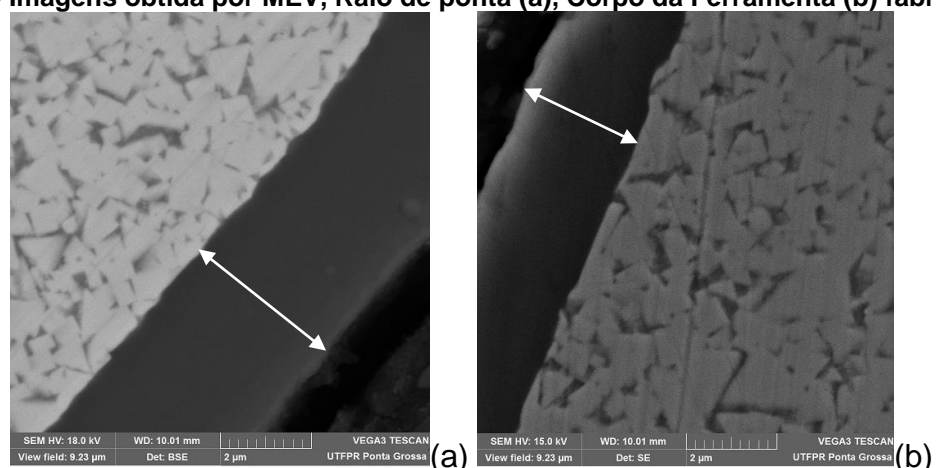
espessura dos revestimentos de cada uma das ferramentas, conforme pode ser verificado no quadro 10.

Figura 27 - Imagens obtida por MEV, Raio de Ponta (a), Corpo da Ferramenta (b) fabricante A



Fonte: O autor

Figura 28 - Imagens obtida por MEV, Raio de ponta (a), Corpo da Ferramenta (b) fabricante B



Fonte: O autor

Após realizar um total de vinte medidas, pôde-se observar, no quadro 10, que a espessura média do revestimento das ferramentas do fabricante A foi de 6,914 μm , enquanto que a espessura média do revestimento das ferramentas do fornecedor B foi de 3,238 μm . Neste caso constatou-se que a ferramenta B apresentou uma espessura de 53,2% menor que a espessura do fabricante A.

Quadro 10 - Medidas de espessura dos revestimentos das ferramentas dos fabricantes A e B.

Espessuras (μm)	Fabricante A	Fabricante B
Média	6,914	3,238
Desvio Padrão	0,544	0,514

Fonte: O autor

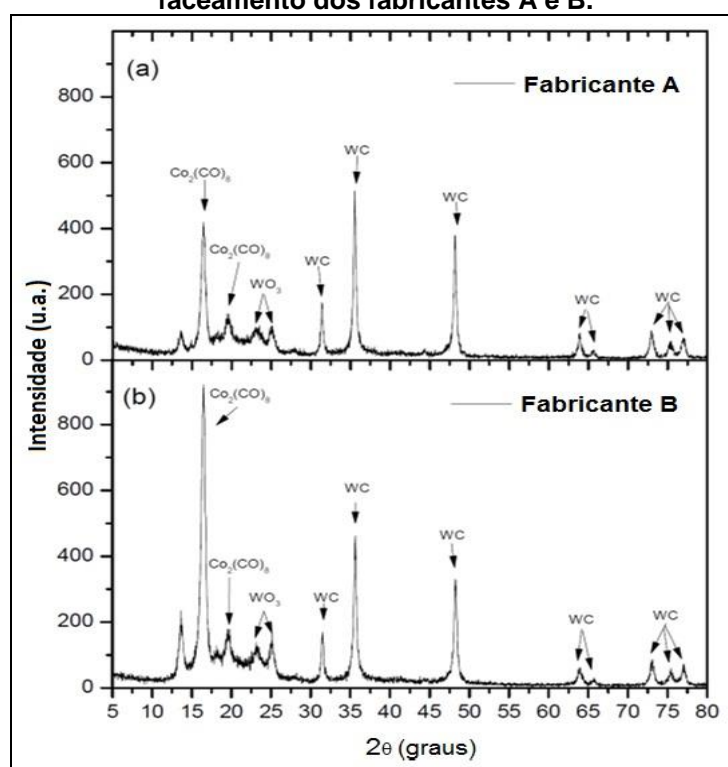
4.4 CARACTERIZAÇÃO QUÍMICA POR DIFRAÇÃO DE RAIOS X

Esta atividade foi realizada em conjunto com a aluna de graduação Juliana Soares de Souza (Souza, J. S. 2016), pois os estudos tratam das mesmas ferramentas de metal duro.

Na análise de raios X (DRX) as amostras pertinentes aos inserts dos fabricantes A e B foram examinadas de modo qualitativo, cujo intuito foi o de verificar as fases presentes.

Observando a figura 29, percebe-se que os difratogramas dos respectivos fabricantes A e B, se assemelham-se entre si com a presença de picos característicos de fases cristalinas de carboneto de tungstênio (WC) e cobalto (Co) presente na microestrutura da amostra.

Figura 29 - Comparação dos difratogramas - Substrato da ferramenta de fresamento de faceamento dos fabricantes A e B.



Fonte: Souza, J. S. 2016

Os dados obtidos pela difração de raio X foram consultados e são encontrados em bancos de dados do JCPDS (Joint Committee on Powder Diffraction Standards), e têm por base as estruturas cristalinas de minerais encontrados.

Conforme ficha ICSD 15406, o carboneto de tungstênio (WC) apresenta fase cristalina hexagonal (P-6m2).

Na literatura dos fabricantes, é possível verificar que os mesmos informam quais são os elementos que compõem os revestimentos presentes em suas ferramentas. Devido a isso, não foi realizado a caracterização por difração de raio X nos revestimentos das ferramentas.

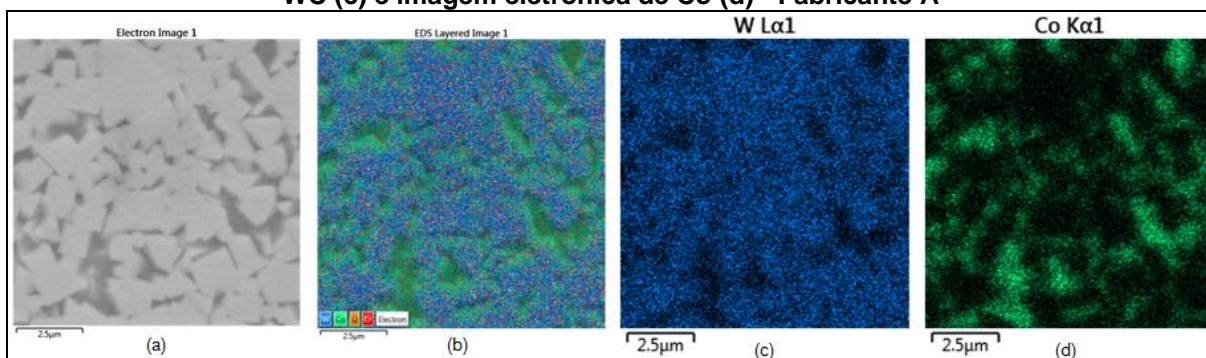
4.5 CARACTERIZAÇÃO QUÍMICA POR MEIO DE ESPECTROSCOPIA POR ENERGIA DISPERSIVA (EDS)

Além da caracterização por difração de raio X, e com o propósito de identificar os elementos químicos presentes nas ferramentas de fresamento, foi utilizado o EDS acoplado ao MEV. O EDS permitiu a obtenção de informações químicas em áreas da ordem de micrometros, as quais (qualitativas e quantitativas) são obtidas pela detecção dos raios X resultantes da interação entre o feixe de elétrons primário e a amostra.

A análise realizada por EDS resultou em algumas imagens, onde é possível ver a presença dos elementos químicos (W, C e Co) presentes nas áreas analisadas.

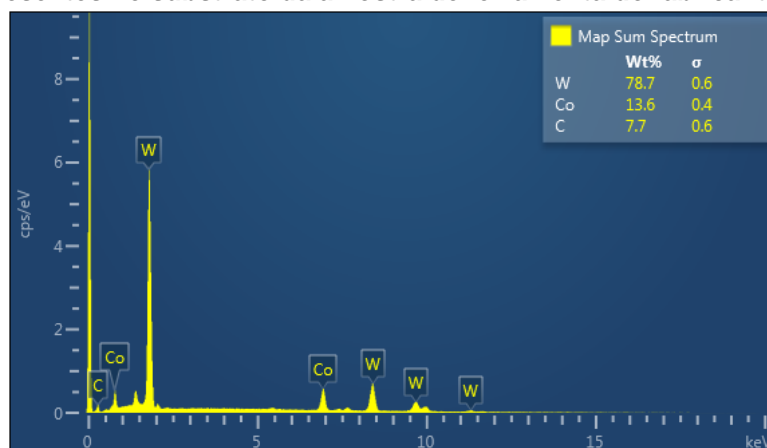
Nas figuras 30 e 31, é possível observar os elementos químicos presentes no substrato das amostras das ferramentas de fresamento do fabricante A por meio de imagens e do espectro de energia dispersiva.

Figura 30 - Imagem eletrônica de MEV (a), imagem eletrônica de EDS (b), imagem eletrônica de WC (c) e imagem eletrônica de Co (d) - Fabricante A



Fonte: O autor

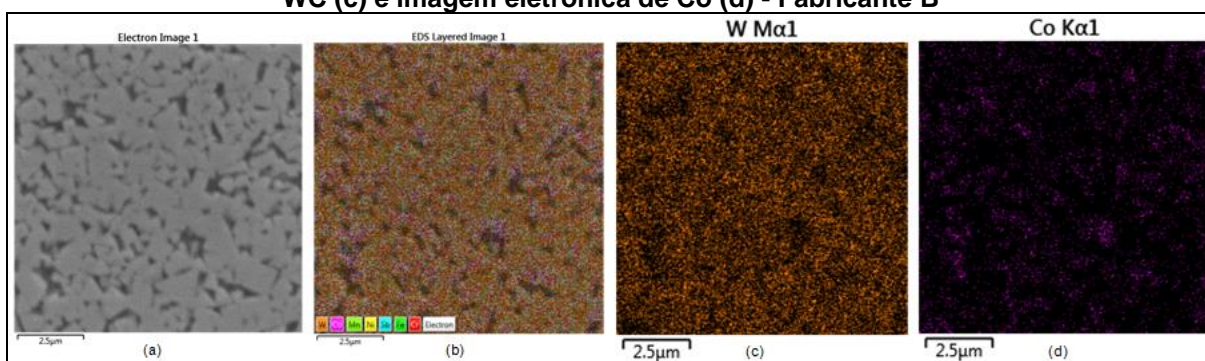
Figura 31 - Espectro de energia dispersiva gerado por EDS com os elementos químicos presentes no substrato da amostra de ferramenta do fabricante A



Fonte: O autor

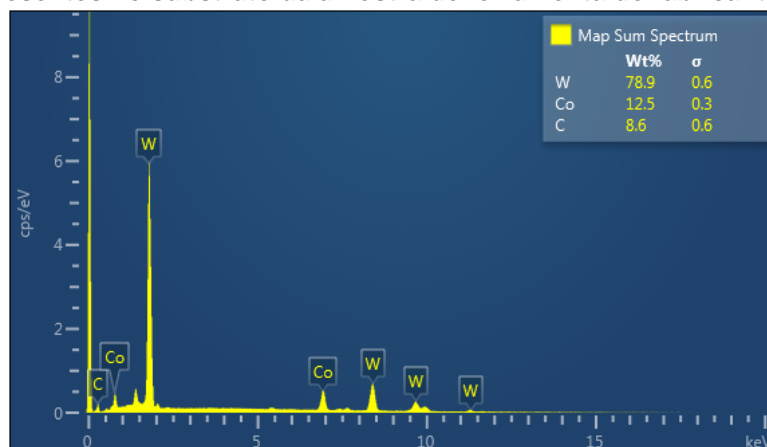
Nas figuras 32 e 33, é possível observar os elementos químicos presentes no substrato das amostras das ferramentas de fresamento do fabricante B por meio de imagens e do espectro de energia dispersiva.

Figura 32 - Imagem eletrônica de MEV (a), imagem eletrônica de EDS (b), imagem eletrônica de WC (c) e imagem eletrônica de Co (d) - Fabricante B



Fonte: O autor

Figura 33 - Espectro de energia dispersiva gerado por EDS com os elementos químicos presentes no substrato da amostra de ferramenta do fabricante B



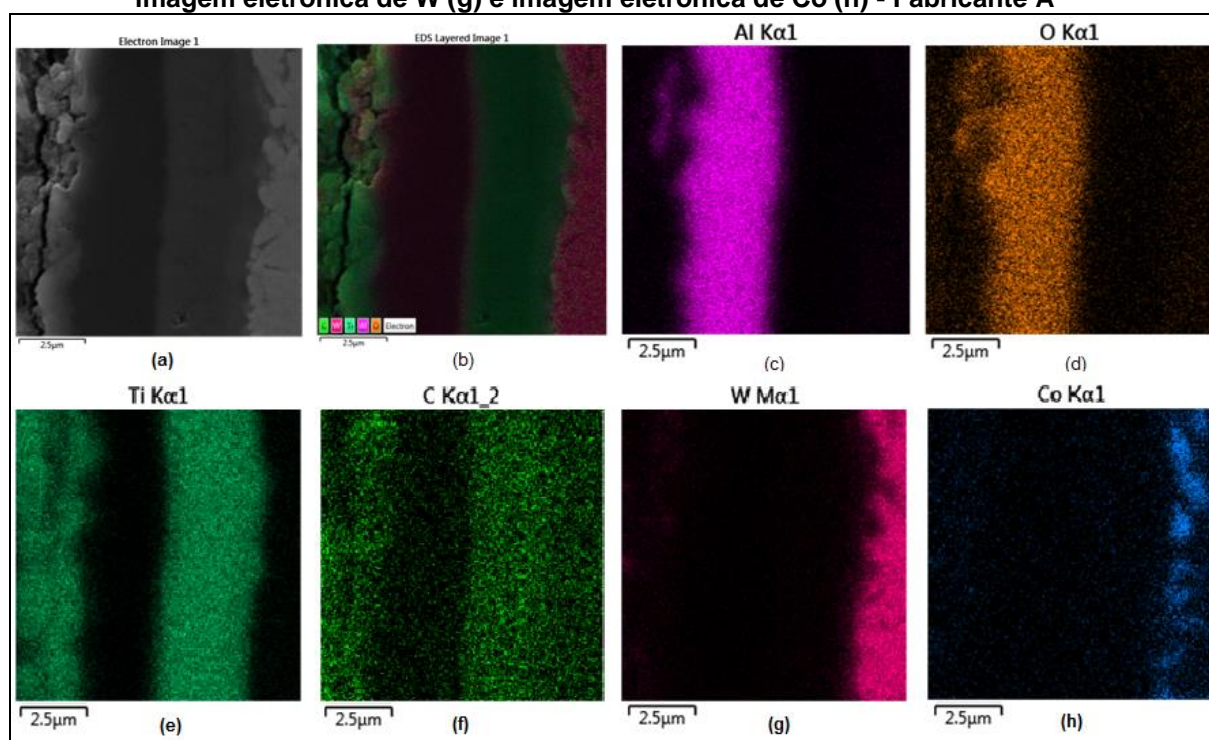
Fonte: O autor

Repara-se que as quantidades presentes dos elementos W e Co, entre as amostras de ambos os fabricantes é similar.

Para comprovar as informações presentes na literatura, e verificar a disposição dos elementos presentes no revestimento das ferramentas, optou-se também em fazer as análises por meio do EDS destes revestimentos.

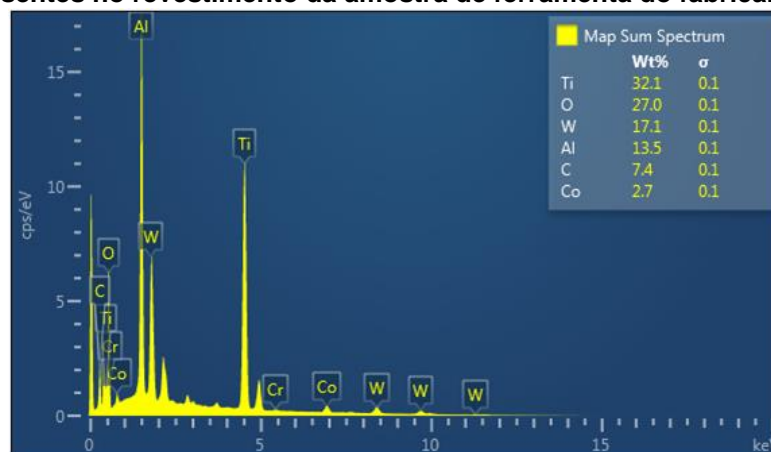
Nas figuras 34 e 35, é possível observar os elementos químicos presentes no revestimento das amostras das ferramentas de fresamento do fabricante A por meio de imagens e do espectro de energia dispersiva.

Figura 34 - Imagem eletrônica de MEV (a), imagem eletrônica de EDS (b), imagem eletrônica de Al (c) e imagem eletrônica de O (d), imagem eletrônica de Ti (e), imagem eletrônica de C (f), imagem eletrônica de W (g) e imagem eletrônica de Co (h) - Fabricante A



Fonte: O autor

Figura 35 - Espectro de energia dispersiva gerado por EDS com os elementos químicos presentes no revestimento da amostra de ferramenta do fabricante A



Fonte: O autor

É possível verificar que o revestimento desta amostra é constituído por oxigênio, alumínio, titânio e carbono.

Como é possível observar na figura 34, os elementos (c) alumínio e (d) oxigênio, apresentam-se em uma mesma posição da imagem, assim como os elementos titânio (a) e carbono (b). apresenta-se em outra posição, em contato com os elementos do substrato.

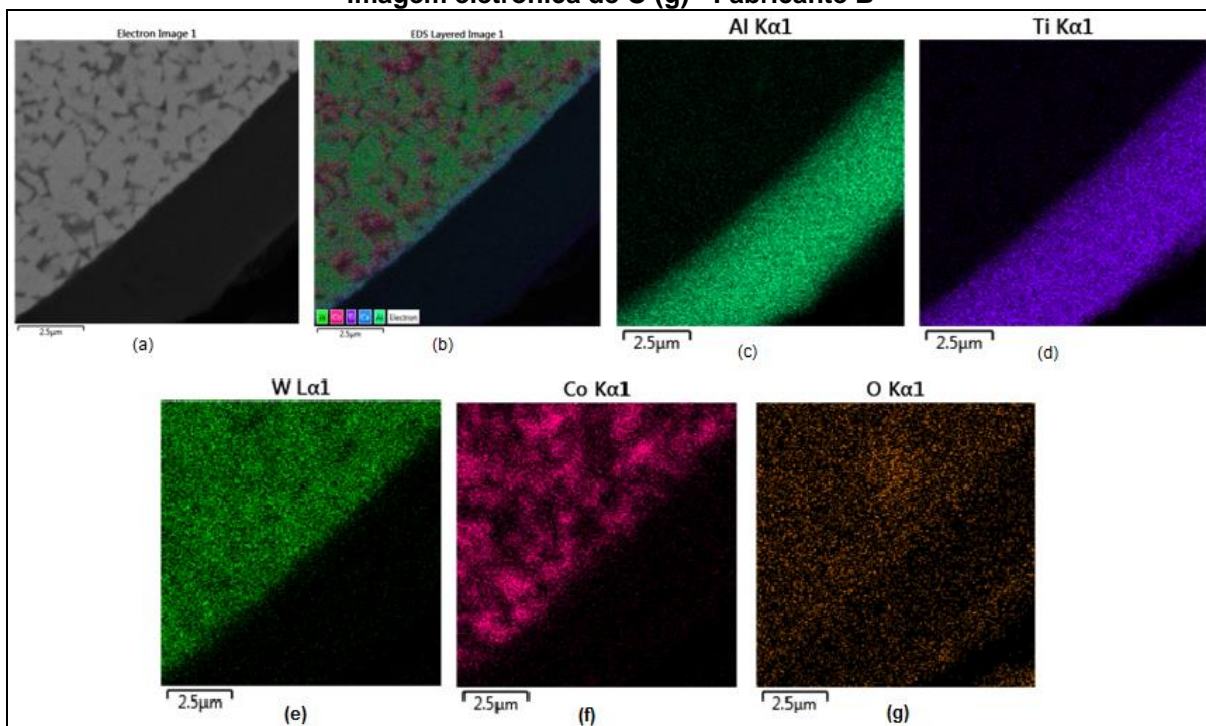
Subentende-se que esta sobreposição dos elementos alumínio e oxigênio formem combinação de elementos de uma camada do revestimento conhecida como Óxido de Alumínio (Al_2O_3). Elemento esse que é mencionado como um dos elementos presentes no revestimento pelo fabricante e também na literatura como uma das combinações presentes em revestimentos realizados por CVD.

Quanto ao titânio e o carbono presentes em outras posições, pode ser entendido como sendo mais duas outras combinações de elementos presentes em outras duas camadas de revestimento mencionadas na literatura como carboneto de titânio (TiC) e nitreto de titânio TiN. O TiC e TiN também são camadas presentes em revestimentos por CVD. O elemento nitrogênio (N), abordado na literatura, não foi mensurado devido as limitações da técnica EDS.

Com isso pode-se afirmar que este revestimento possui três camadas em sua espessura, formando o revestimento $\text{Ti}(\text{C},\text{N})+\text{Al}_2\text{O}_3+\text{TiN}$., conforme apontado no manual do fabricante.

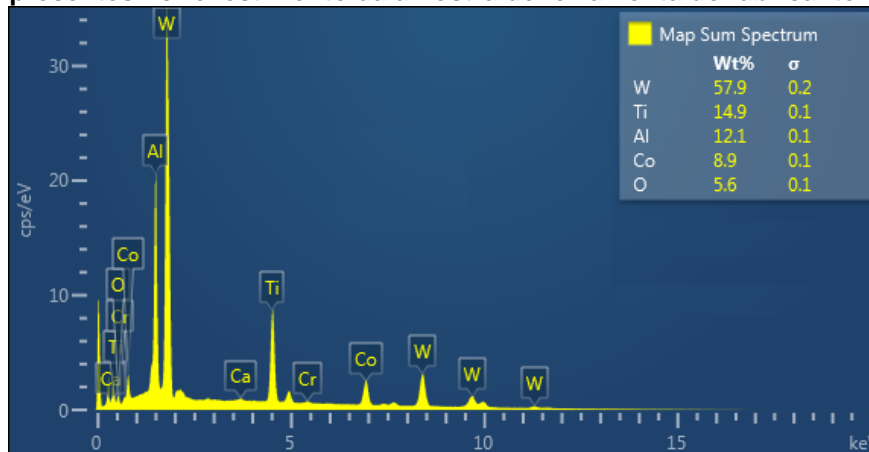
Nas figuras 36, e 37, é possível observar os elementos químicos presentes no revestimento das amostras das ferramentas de fresamento do fabricante B por meio de imagens e do espectro de energia dispersiva.

Figura 36 - Imagem eletrônica de MEV (a), imagem eletrônica de EDS (b), imagem eletrônica de Al (c), imagem eletrônica de Ti (d), imagem eletrônica de W (e), imagem eletrônica de Co (f) e imagem eletrônica de O (g) - Fabricante B



Fonte: O autor

Figura 37 - Espectro de energia dispersiva gerado por EDS com os elementos químicos presentes no revestimento da amostra de ferramenta do fabricante B



Fonte: O autor

Foi possível verificar que o revestimento da amostra de ferramenta do fabricante B era constituído por alumínio e titânio. O tungstênio e o cobalto fazem parte do substrato da amostra.

Como observa-se na figura 36, os elementos (c) alumínio e (d) titânio, apresentam-se em uma mesma posição da imagem, e em contato com os elementos do substrato.

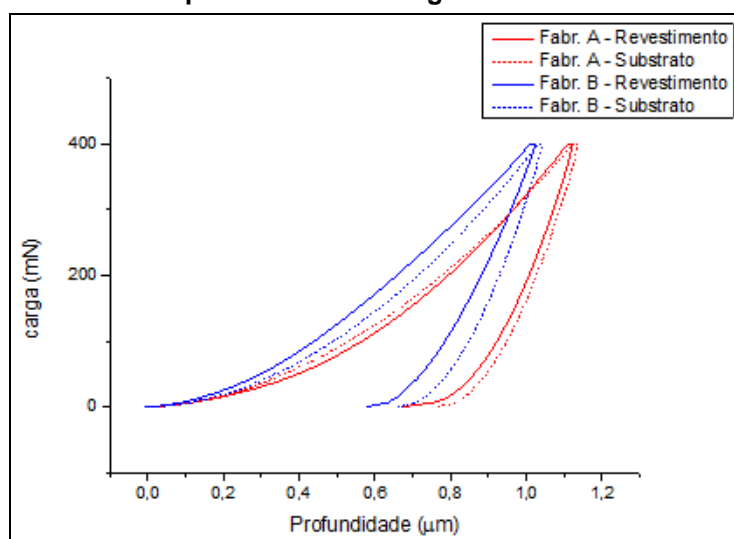
Subentende-se que esta sobreposição dos elementos alumínio e titânio formem uma camada do revestimento conhecida como Nitreto de Titânio Alumínio (TiAlN). Camada esta que é uma combinação de elementos presentes no revestimento mencionado pelo fabricante e também na literatura como uma das combinações presentes em revestimentos realizados por PVD. Com isso pode-se afirmar que este revestimento possui apenas uma camada em sua espessura, formando o revestimento.

4.6 CARACTERIZAÇÃO DAS PROPRIEDADES MECÂNICAS POR DUREZA E MÓDULO DE ELASTICIDADE DAS FERRAMENTAS

Conforme proposto no tópico 3.4.2, a intenção deste ensaio foi encontrar e verificar as diferenças da dureza e do módulo de elasticidade entre o substrato e o revestimento de ambas as ferramentas.

A partir deste ensaio foi construída uma curva de carga aplicada em função da profundidade de penetração da ponta sobre o material, conforme é possível verificar no gráfico 3.

Gráfico 3 - Variação da carga (P) em função da profundidade de penetração (h) carregamento elasto-plástico e descarregamento elástico.



Fonte: O autor

No quadro 11 é possível observar a penetração máxima do indentador em função da carga de 400mN.

Quadro 11 - Penetração Máxima (h) em função da carga (P)

Carga (P) 400mN	Substrato Fabricante A	Revestimento Fabricante A	Substrato Fabricante B	Revestimento Fabricante B
Amostra 01	1,136 μ m	1,135 μ m	1,043 μ m	0,973 μ m
Amostra 02	1,090 μ m	1,123 μ m	1,041 μ m	1,035 μ m

Fonte: O autor

No quadro 12, é possível observar os valores encontrados para a dureza (H) e o módulo de elasticidade (E) no substrato e revestimento de cada uma das amostras de ferramenta do fabricante A.

Quadro 12 - Dureza (H) e módulo de elasticidade (E) em amostras de substrato e revestimento da ferramenta de fresamento do fabricante A.

	Substrato			Revestimento		
	AM 01	AM 02	Média	AM 01	AM 02	Média
H(GPa)	15,60	16,90	16,25	14,53	14,17	14,35
Desvio	0,39	0,38	0,38	2,64	2,21	2,43
E(GPa)	477,74	516,53	497,13	424,94	427,56	426,25
Desvio	14,85	15,83	15,34	56,54	47,73	52,13

Fonte: O autor

No quadro 13, é possível observar os valores encontrados para a dureza (H) e o módulo de elasticidade (E) no substrato e revestimento de cada uma das amostras de ferramenta do fabricante B.

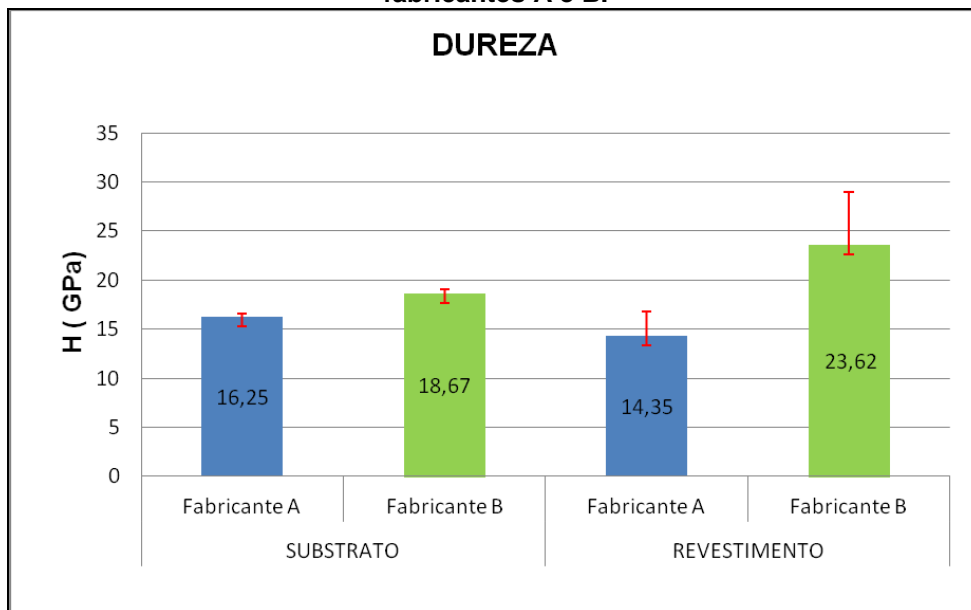
Quadro 13 - Dureza (H) e módulo de elasticidade (E) em amostras de substrato e revestimento da ferramenta de fresamento do fabricante B.

	Substrato			Revestimento		
	AM 01	AM 02	Média	AM 01	AM 02	Média
H(GPa)	18,68	18,66	18,67	24,58	22,67	23,62
Desvio	0,35	0,39	0,37	4,67	6,10	5,39
E(GPa)	521,67	526,03	523,85	476,43	528,38	502,40
Desvio	14,55	14,92	14,74	62,02	99,69	80,85

Fonte: O autor

Com o valor médio da dureza do substrato e do revestimento de ambas as ferramentas, foi possível montar o gráfico de comparação apresentado no gráfico 4.

Gráfico 4 - Gráfico com a dureza média dos substratos e revestimentos das ferramentas dos fabricantes A e B.



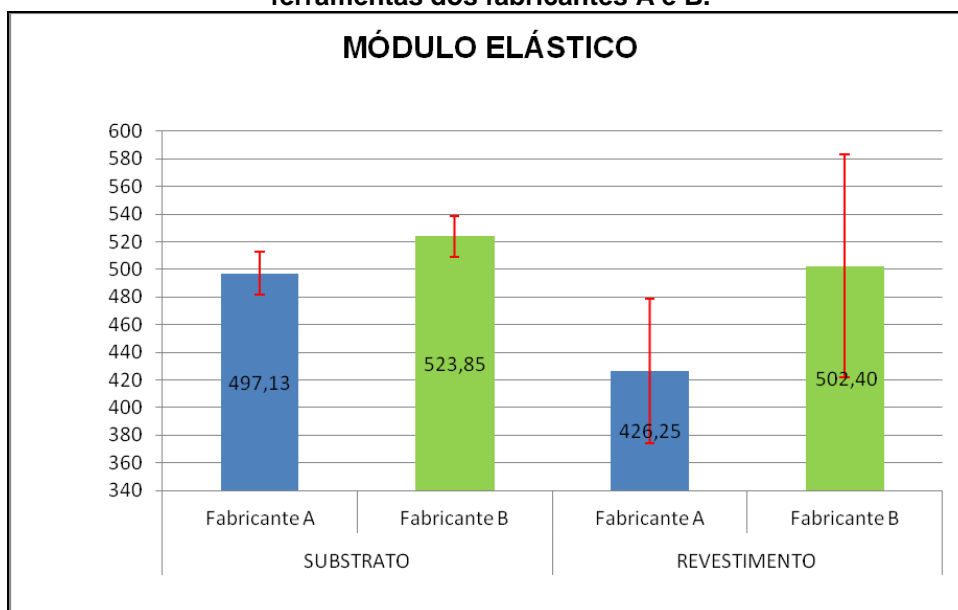
Fonte: O autor

É possível observar que tanto o substrato quanto o revestimento da ferramenta do fabricante B se apresentam com maior dureza quando comparados as ferramentas do fabricante A.

Segundo Chiaverini 2001, para ferramentas específicas da norma ISO P40, a dureza do substrato das mesmas deveria ser em torno de 13,73GPa, porém com os ensaios realizados, nota-se que a dureza encontrada em ambas as ferramentas se apresentam maior que o apresentado na literatura.

Com o valor médio do módulo de elasticidade do substrato e do revestimento de ambas as ferramentas, foi possível montar o gráfico de comparação apresentado no gráfico 5.

Gráfico 5 - Gráfico com o módulo de elasticidade médio dos substratos e revestimentos das ferramentas dos fabricantes A e B.



Fonte: O autor

Ao observar o gráfico 5, é possível ver que para o substrato e o revestimento, a ferramenta do fabricante B apresentou maior módulo de elasticidade em comparação a ferramenta do fabricante A.

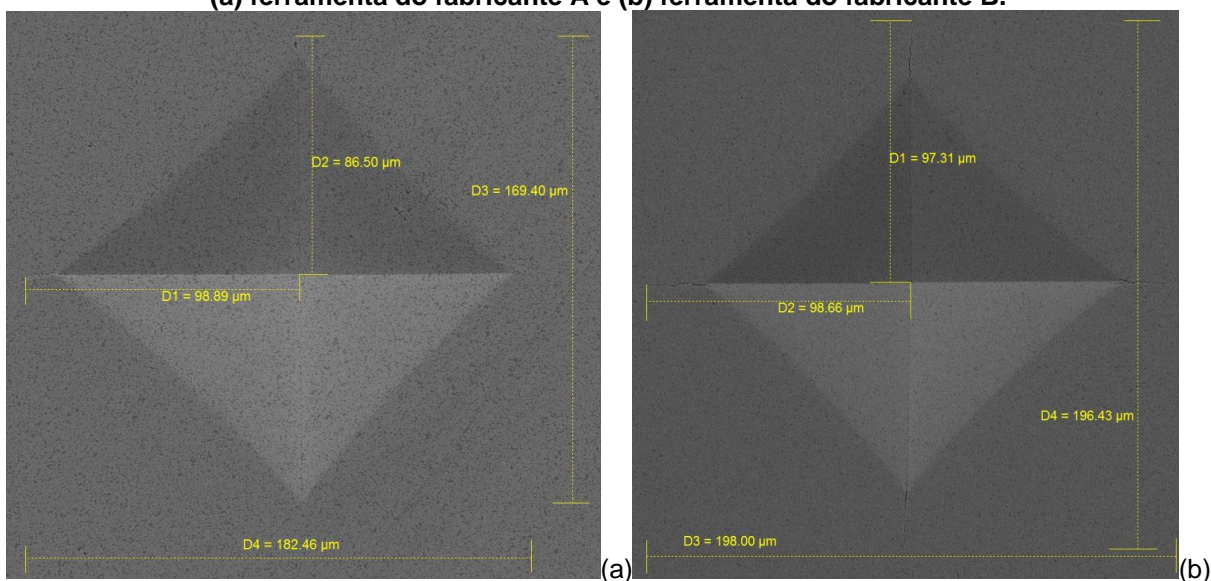
Segundo a literatura (Chiaverini 2001), para ferramentas específicas da norma ISO P40, o módulo de elasticidade deveria ser em torno de 549,17GPa, porém com os ensaios realizados, nota-se que a módulo encontrado em ambas as ferramentas se apresentam menor.

4.7 CARACTERIZAÇÃO DA TENACIDADE DAS FERRAMENTAS

Tenacidade é a capacidade de um material absorver energia e deformar plasticamente sem fraturar.

A medição da tenacidade à fratura por indentação consiste em medir os comprimentos de trincas que se formam nos cantos de uma indentação Vickers (figura 38). Em alguns casos, também é necessário o uso de valores de propriedades materiais, como módulo de elasticidade e razão de Poisson (SOLEIMANPOUR, 2012).

Figura 38 - Comprimentos de trincas que se formam nos cantos de uma indentação Vickers. (a) ferramenta do fabricante A e (b) ferramenta do fabricante B.



Fonte: O autor

Como o módulo de elasticidade e a dureza Vickers das ferramentas já são conhecidos por meio de ensaios já realizados, buscou-se encontrar a média dos comprimentos mais trincas das indentações, as quais são apresentadas no quadro 14.

Quadro 14 - Média dos comprimentos da semi-diagonal de impressão + trinca (C) das ferramentas dos fabricante A e B.

	Ferramenta Fabricante A	Ferramenta Fabricante B
Média (C)	91,43μm	99,37μm

Fonte: O autor

Com as medidas das trincas formadas, foi utilizado a equação 12, já apresentada, para encontrar os valores da tenacidade de cada ferramenta.

Por fim, foi possível encontrar o valor da tenacidade à fratura para cada um dos substratos das ferramentas, como é possível verificar no quadro 15.

Quadro 15 - Tenacidade à fratura das ferramentas dos fabricante A e B.

	Ferramenta Fabricante A	Ferramenta Fabricante B
Tenacidade à fratura (K_{IC})	19,23MPa m ^{1/2}	16,26 MPa m ^{1/2}

Fonte: O autor

É possível observar que a tenacidade da ferramenta A é maior quando comparada a ferramenta B, o que supõe que a ferramenta A pode absorver mais energia e deformar plasticamente sem fraturar.

4.8 CARACTERIZAÇÃO DA PROPRIEDADE FÍSICA POR DIFUSIVIDADE TÉRMICA

Esta atividade foi realizada em conjunto com a aluna de graduação Juliana Soares de Souza (Souza, J. S. 2016), pois os estudos tratam das mesmas ferramentas de metal duro.

A propriedade térmica de difusividade térmica dos insertos de metal duro foi obtida por meio da técnica de célula fotoacústica aberta (OPC). As medidas de varreduras de frequência ocorreram de forma padronizada de maneira a garantir uma similaridade nos ensaios e resultados da difusividade térmica. As amostras do substrato dos fabricantes A e B foram avaliadas incidindo-se a luz modulada perpendicular às mesmas, em varreduras realizadas para cada lado da amostra.

No quadro 16 estão dispostos os resultados da difusividade térmica, sendo que para cada amostra foi realizado sete medidas em cada lado. O quadro 16 também apresenta a média calculada dos resultados para cada amostra. Calculou-se o erro desta propriedade térmica por meio de propagação de erros.

Quadro 16 - Resultados da Difusividade Térmica das amostras dos fabricantes A e B

	Difusividade Média Lado 1 (cm ² /s)	Difusividade Média Lado 2 (cm ² /s)	Difusividade Média (cm ² /s)
Ferramenta A	0,188±0,007	0,200±0,007	0,194±0,007
Ferramenta B	0,258±0,009	0,265±0,009	0,263±0,009

Fonte: Adaptado de Souza, 2016

Os resultados do quadro 16 mostram que há uma diferença de 26% na difusividade térmica, onde o valor obtido para o fabricante A foi de $0,194 \pm 0,007$ cm²/s e para o fabricante B foi de $0,263 \pm 0,009$ cm²/s.

No quadro 17 são dispostos os valores da difusividade térmica, encontradas na literatura, de amostras sinterizadas de WC-Co, via técnica OPC e via método Flash-Laser (MACHADO, F. A., 2007, FARIA, T. *et al*, 2005, MIRANZO, O. *et al*, 2002, LI, Z., *et al*, 1996).

Quadro 17 - Valores de difusividade térmica encontrados na literatura para amostras sinterizadas

Amostra	Técnica	α (cm ² /s)	Referência
1 - Wc-10%pCo Convencional (1450°C/60min/10 ⁻² tor)	OPC	0,456±0,041	MACHADO, F. A., 2007
2 - Wc-10%pCo (5GPa/1200°C/1min)		0,340±0,005	
3 - Wc-10%pCo (5GPa/1200°C/2min)		0,380±0,023	
4 - Wc-10%pCo (5GPa/1300°C/1min)		0,270±0,046	
5 - Wc-10%pCo (5GPa/1300°C/2min)		0,250±0,013	
6 - Wc-10%pCo (5GPa/1400°C/1min)		0,370±0,030	
7 - Wc-10%pCo (5GPa/1400°C/2min)		0,400±0,006	
8 - Wc-15%pCo (5GPa/1350°C/2min)	OPC	0,35	FARIA, T. <i>et al</i> , 2005
9 - Wc-6%pCo	1000°C Flash-Laser	0,32	MIRANZO, O. <i>et al</i> , 2002
10 - Wc-8%p(Co75%pNi)	Flash-Laser	0,205	LI, Z., <i>et al</i> , 1996

Fonte: Souza, J. S. 2016

Comparando os valores da difusividade térmica obtidos nas amostras das ferramentas A e B com os valores da difusividade térmica das amostras descritas no quadro 17, percebe-se que o valor encontrado na amostra da ferramenta A fica próximo ao valor descrito na amostra 4 (Wc-10%pCo), valor esse, também obtido pela técnica OPC segundo a literatura. Já o valor encontrado na amostra da ferramenta B fica próximo ao valor descrito na amostra 10 (Wc-8%p(Co75%pNi), obtido pela técnica Flash-Laser segundo a literatura.

No quadro 18 é possível observar uma comparação entre as características das propriedades mecânicas, químicas e físicas encontradas nos estudos realizados nas ferramentas dos fabricantes A e B.

Quadro 18 - Comparação entre as características encontradas de cada ferramenta.

	Ferramenta A	Ferramenta B	Observação
Tamanho de Grão	Maior	Menor	
% de Carbonetos	78,20	80,10	
% de Co+Poros	21,80	19,86	
Espessura Média do Revestimento (μm)	6,914 \pm 0,544	3,238 \pm 0,514	
Composição do Substrato	WC+Co	WC+Co	
% de WC+Co no Substrato	Similar	Similar	
Composição do Revestimento	Ti(C,N)+Al ₂ O ₃ +TiN	TiAlN	TiAlN apresenta menor resistência ao desgaste, menor estabilidade química e menor coeficiente de atrito; Al₂O₃ responsável pela estabilidade química e diminuição da condutividade térmica.
Número de Camadas do Revestimento	3	1	
Processo de Deposição do Revestimento	CVD	PVD	
Dureza do Revestimento H(GPa)	14,35 \pm 2,43	23,62 \pm 5,39	
Módulo Elástico do Revestimento E(GPa)	426,25 \pm 52,13	502,40 \pm 80,85	
Dureza do Substrato H(GPa)	16,25 \pm 0,38	18,67 \pm 0,37	
Módulo Elástico do Substrato E(GPa)	497,13 \pm 15,34	523,85 \pm 14,74	
Tenacidade à Fratura (MPa m ^{1/2}) do Substrato	19,23	16,26	
Difusividade Térmica do Substrato (cm ² /s)	0,194 \pm 0,007	0,263 \pm 0,009	

Fonte: O Autor

4.9 CARACTERIZAÇÃO DA PROPRIEDADE MECÂNICA POR DUREZA DO AÇO SAE 1045

Conforme proposto no tópico 3.5.2, a intenção deste ensaio foi encontrar um valor médio para a dureza dos blocos de aço SAE 1045 comercial adquiridos para os testes propostos neste trabalho.

No quadro 18 é possível observar o valor médio de dureza encontrado nas amostras de cada bloco.

Quadro 19 - Média da dureza rockwell regular (HRBW) encontrada nas amostras de aço SAE 1045 comercial.

	BLOCO 01	BLOCO 02	BLOCO 03	BLOCO 04	BLOCO 05	Média
HRBW	82,82	83,75	81,73	80,76	82,06	82,22
Desvio	2,40	2,22	2,05	1,62	2,00	2,06

Fonte: O autor

Como é possível observar, a dureza HRBW apresentada em cada bloco segue uma similaridade.

Quando observa-se a média geral desta dureza, chega-se ao valor de $82,22 \pm 2,06$ HRBW, o que pode ser convertido segundo tabela de comparação de dureza em 156 HB (Dureza Brinell).

Segundo especificações do material pelo fabricante, tal material deve ter entre 163 e 187 HB, o que nos levaria a uma dureza estimada entre 85 e 90 HRBW. Tais valores de dureza chegaram a ser encontrado em pontos aleatórios nas amostras, porém, se tratando de uma média geral, este valor pode ter sofrido alterações.

4.10 CARACTERIZAÇÃO QUÍMICA DO AÇO SAE 1045 POR ESPECTROSCOPIA POR EMISSÃO ÓTICA

Conforme proposto no tópico 3.5.3, a intenção deste ensaio foi encontrar um valor médio dos elementos químicos presentes nas amostra e posteriormente encontrar a média destes elementos por fatia/bloco do aço SAE 1045 comercial.

Segundo Souza,2001, a composição do aço SAE 1045 pode ser observada no quadro 19.

Quadro 20 - Composição química do aço SAE 1045.

	C	Mn	Pmáx	Smáx	Si
%	0,43 - 0,50	0,60 - 0,90	0,040	0,050	0,10 - 0,60

Fonte: Adaptado de SOUZA, 2001.

Após a análise de Espectroscopia de Emissão Ótica realizada nas amostras do material adquirido, chegou-se na composição média apresentada no quadro 20, onde constatou-se que os blocos de aço adquiridos apresentavam a mesma composição química entre eles, porém com uma diferença na porcentagem de carbono pouco relevante em relação aos dados apresentados na literatura. Assim sendo, conclui-se que o material adquirido tratava-se de um aço SAE 1045.

Quadro 21 - Composição química encontrada do aço SAE 1045 comercial.

	C	Mn	P _{máx}	S _{máx}	Si
Média (%)	0,5435	0,6232	0,0062	0,0070	0,1823

Fonte: O autor

4.11 ACOMPANHAMENTO DO DESGASTE DAS FERRAMENTAS POR MICROSCOPIA ELETRONICA DE VARREDURA

Os ensaios foram realizados observando um tempo médio de corte efetivo de aproximadamente seis minutos. Com isso, a cada ensaio realizado, pôde-se efetuar um acompanhamento por MEV do desgaste do flanco de alisamento e da aresta de corte primária das ferramentas, onde foi possível realizar medições do desgaste e observar seu comportamento até chegar a uma medida de 200 μ m e/ou ocorrer o impedimento da continuação do ensaio devido a quebras ou avarias das ferramentas.

No quadro 21, observa-se que foi adotado o termo condição do experimento para fazer a diferenciação dos ensaios. Neste mesmo quadro é possível notar as diferenças do avanço por aresta de corte e do tempo médio de corte efetivo total por condição de ensaio.

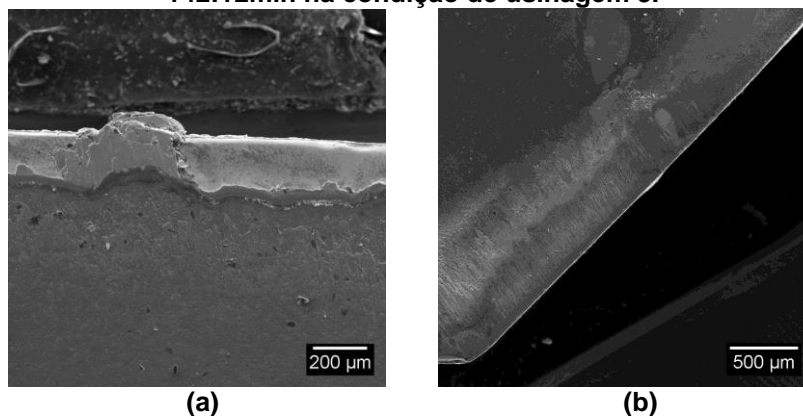
Quadro 22 - Parâmetros de Corte x Tempo de Vida.

Fabricante	Condição do Experimento	Número de Insertos	Velocidade de Corte (v_c) m/min	Avanço por Dente (f_z) mm/dente	Tempo de Corte Efetivo (min)	Tempo Médio de Corte Efetivo Total (min)	Desvio (min)	Tipo de Falha
A	1	1	217,1	0,272	6:19	142:12	13:25	Desgaste 200 μ m
A	2	1	217,1	0,376	6:05	103:32	8:37	Entalhe (aresta principal)
B	3	1	217,1	0,272	6:19	94:48	8:56	Desgaste 200 μ m e quebra
B	4	1	217,1	0,376	6:05	60:31	9:09	Entalhe (aresta principal)

Fonte: O Autor

Na condição de usinagem 1 (figura 39), a ferramenta manteve desgaste de flanco na aresta alisadora. Não apresentou nenhum tipo de trinca ao longo dos ensaios. O fim de vida foi estabelecido porque a ferramenta atingiu o valor de 200 μ m de desgaste previamente estipulado.

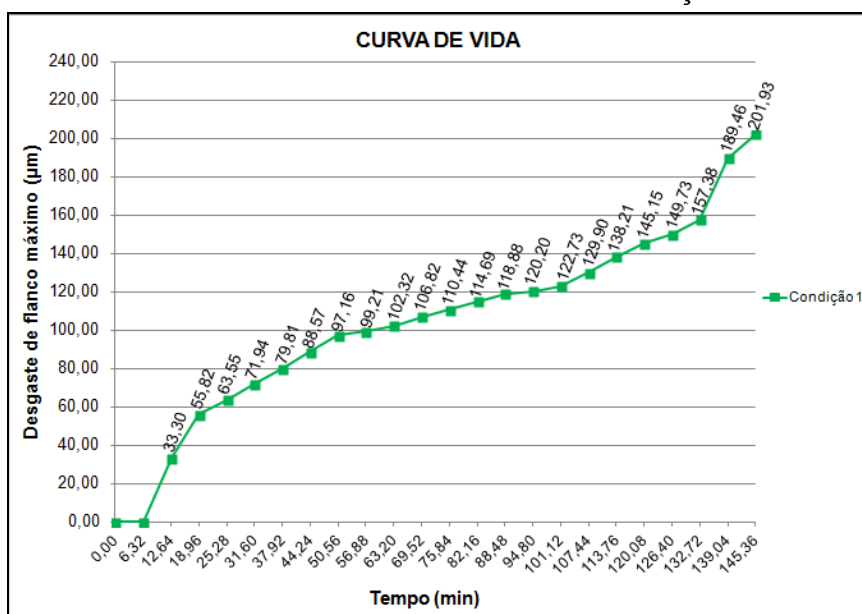
Figura 39 - Desgaste na aresta de alisamento (a) e na aresta de corte primária (b) com 142:12min na condição de usinagem 3.



Fonte: O Autor

O gráfico 6 apresenta a curva de vida da ferramenta do fabricante A (condição 1) quando submetida a uma velocidade de corte de 217,1m/min e um avanço de 0,272mm/aresta de corte. O substrato começou a ser revelado aos 12,64 minutos de usinagem, quando a espessura do revestimento foi consumida, tendo seu desgaste parcial. É possível observar que a progressão do desgaste ocorreu de forma gradativa até 132,72 minutos, então observa-se um aumento acentuado deste desgaste atingindo 201,93 μ m aos 145,36 minutos de usinagem.

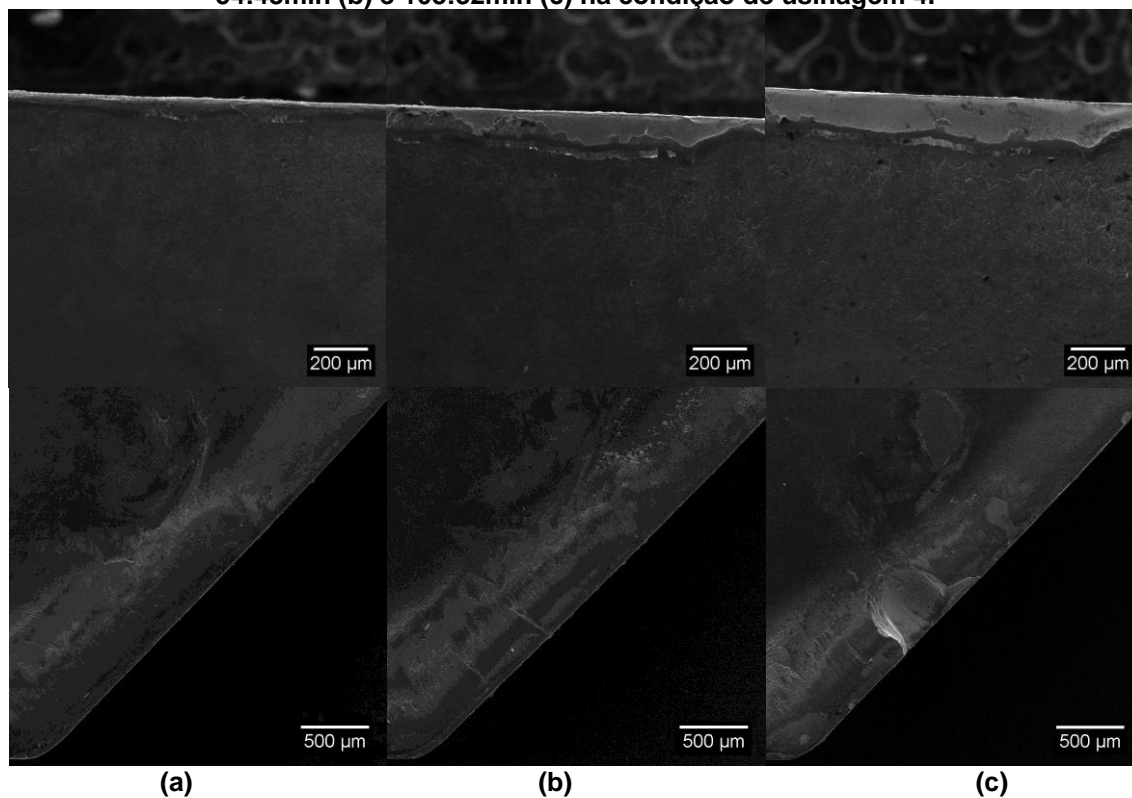
Gráfico 6 - Curva de vida da ferramenta de corte na condição 1 de usinagem.



Fonte: O Autor

Na condição de usinagem 2 (figura 40), observa-se a presença de duas trincas térmicas, na aresta de corte primária, e de um entalhe, na aresta alisadora. Durante o ensaio, observa-se a progressão destes desgastes e formação de entalhe em uma das trincas.

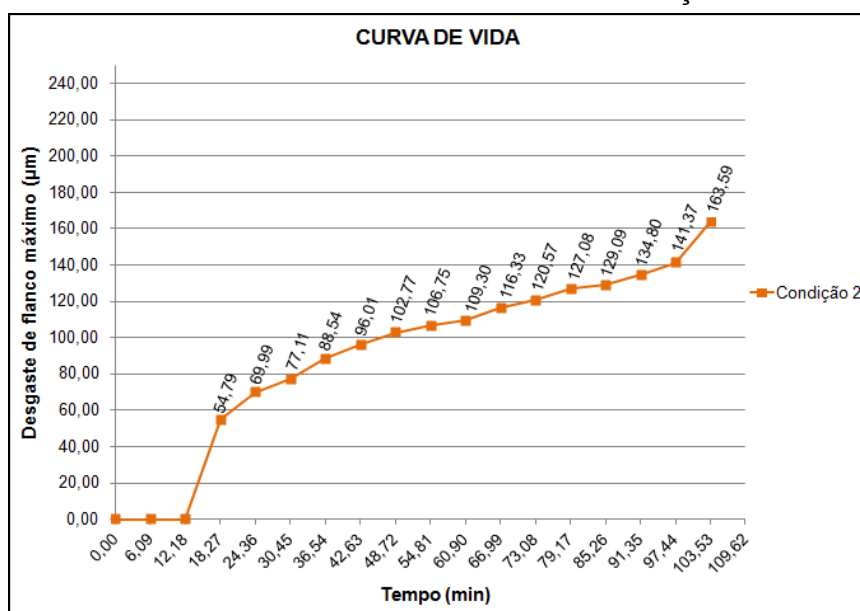
Figura 40 - Desgaste na aresta de alisamento e na aresta de corte primária com 6:05min (a), 54:43min (b) e 103:32min (c) na condição de usinagem 4.



Fonte: O Autor

O gráfico 7 apresenta a curva de vida da ferramenta do fabricante A (condição 2), quando submetida a uma velocidade de corte de 217,1m/min e um avanço de 0,376mm/aresta de corte. O substrato começou a ser revelado aos 18,27 minutos de usinagem, quando a espessura do revestimento foi consumida, tendo seu desgaste parcial. É possível observar que a progressão do desgaste ocorreu de forma gradativa até 97,44 minutos, onde observa-se um aumento acentuado deste desgaste e aos 103,53 minutos de usinagem, ocorre a formação de um entalhe na aresta de corte primária da ferramenta impedindo a continuação do ensaio.

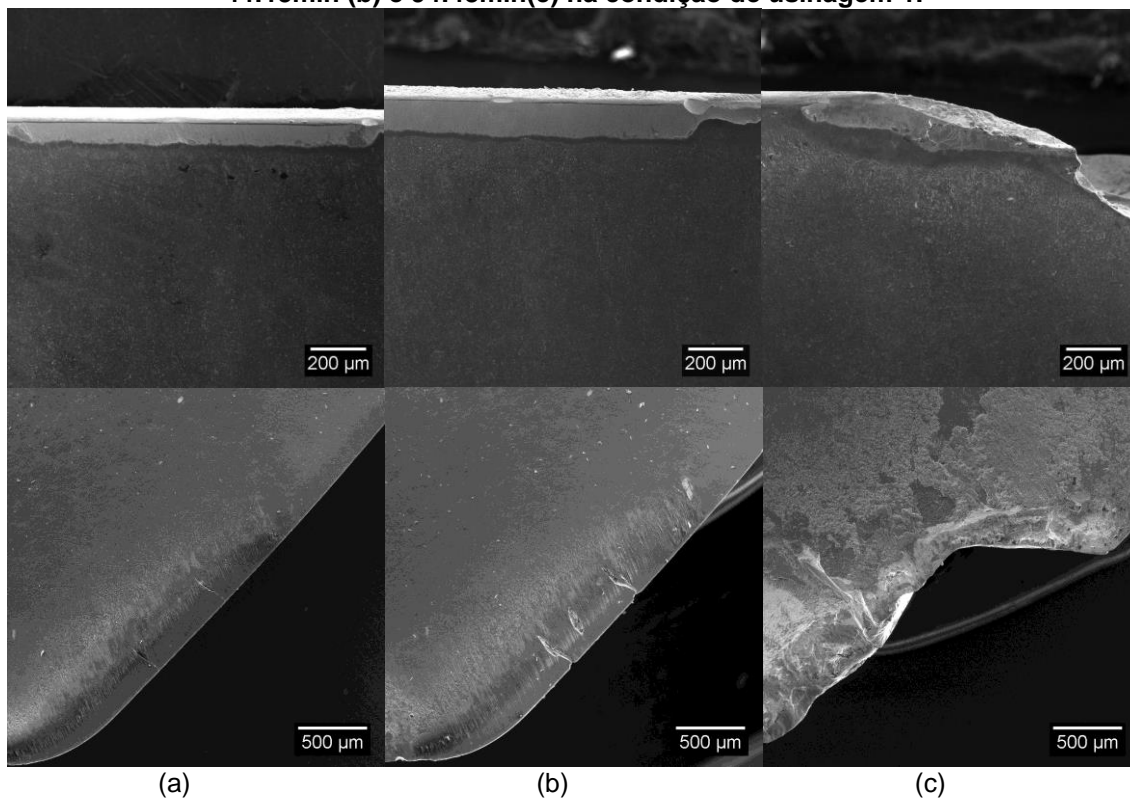
Gráfico 7 - Curva de vida da ferramenta de corte na condição 2 de usinagem.



Fonte: O Autor

Na condição de usinagem 3 (figura 41), observa-se a presença de duas trincas térmicas, na aresta de corte primária, e de um entalhe, na aresta alisadora, em 12:38 minutos de usinagem. Ao dar prosseguimento no ensaio, observou-se a progressão destes desgastes e formação de entalhe nas duas trincas, e o aumento da cavidade entalhada na aresta alisadora. Ao chegar no desgaste final estabelecido de 200µm, ocorre uma quebra total da aresta de corte primária da ferramenta.

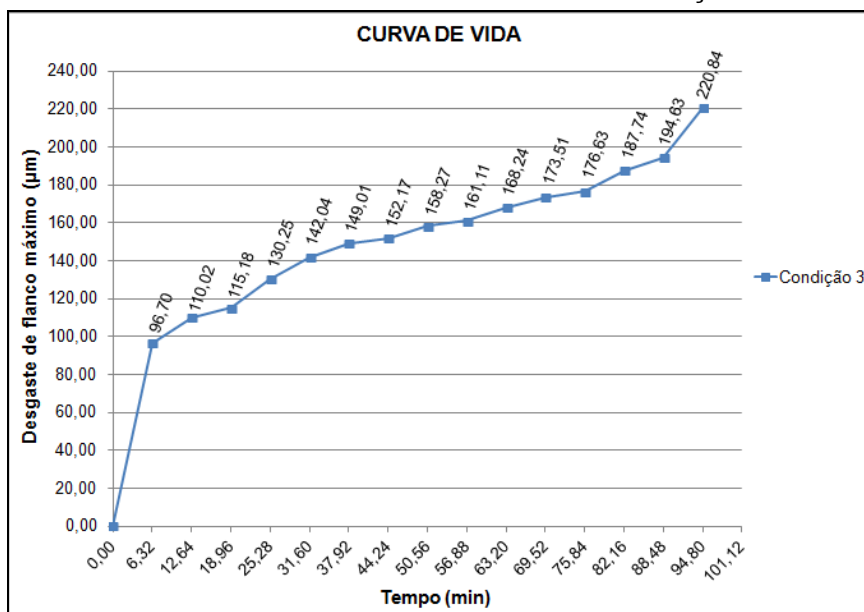
Figura 41 - Desgaste na aresta de alisamento e na aresta de corte primária com 12:38min (a), 44:13min (b) e 94:48min(c) na condição de usinagem 1.



Fonte: O Autor

O gráfico 8 apresenta a curva de vida da ferramenta do fabricante B (condição 3), quando submetida a uma velocidade de corte de 217,1m/min e um avanço de 0,272mm/aresta de corte. O substrato começou a ser revelado já nos primeiros 6,32 minutos de usinagem, quando a espessura do revestimento foi consumida, tendo seu desgaste parcial. É possível observar que a progressão do desgaste ocorreu de forma gradativa até 88,48 minutos, onde observa-se um aumento acentuado deste desgaste e aos 94,80 minutos de usinagem, ocorre a quebra da aresta principal de corte, e com isso, ocorre o aumento do desgaste na aresta alisadora de 194,63 μ m para 220,84 μ m.

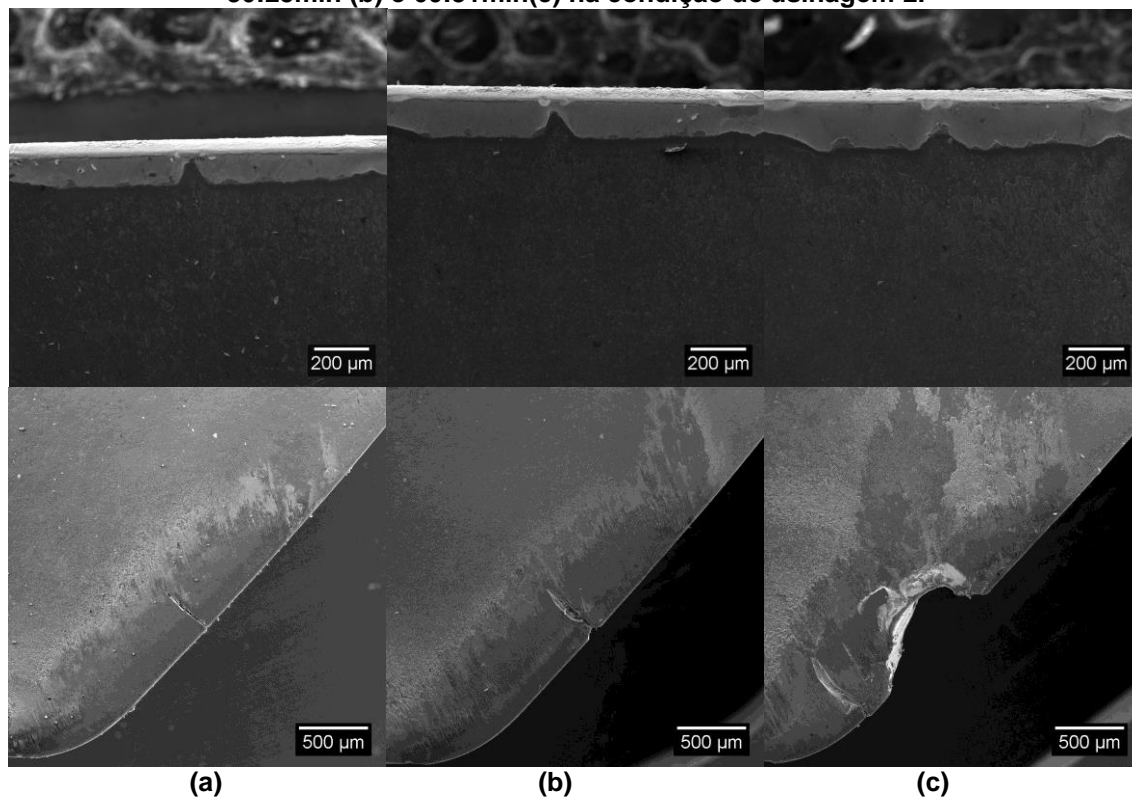
Gráfico 8 - Curva de vida da ferramenta de corte na a condição 3 de usinagem.



Fonte: O Autor

Na condição de usinagem 4 (figura 42) presenciou-se um mecanismo de desgaste parecido com a condição 1. Houve o aparecimento de trinca térmica na aresta de corte primária ao longo dos ensaios, onde a trinca abriu até formar um entalhe maior, chegando a gerar uma perda de material razoável na aresta de corte primária da ferramenta. Tal entalhe ocorreu quando a ferramenta atingiu o valor de 200µm de desgaste previamente estipulado.

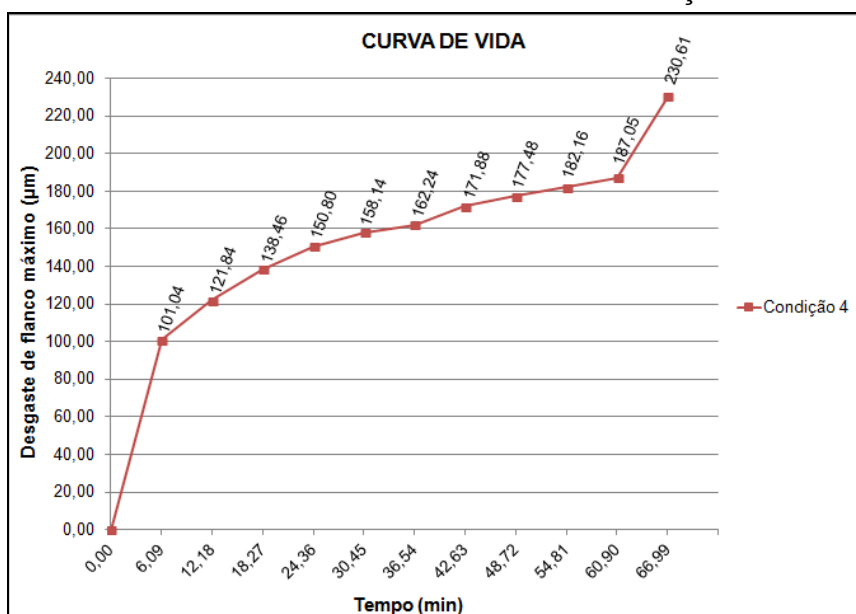
Figura 42 - Desgaste na aresta de alisamento e na aresta de corte primária com 12:10min (a), 30:25min (b) e 60:31min(c) na condição de usinagem 2.



Fonte: O Autor

O gráfico 9 apresenta a curva de vida da ferramenta do fabricante B (condição 4), quando submetida a uma velocidade de corte de 217,1m/min e um avanço de 0,376mm/aresta de corte. O substrato começou a ser revelado já nos primeiros 6,09 minutos de usinagem, quando a espessura do revestimento foi consumida, tendo seu desgaste parcial. É possível observar que a progressão do desgaste ocorreu de forma gradativa até 60,90 minutos, onde observa-se um aumento acentuado deste desgaste e aos 66,99 minutos de usinagem, ocorre um entalhe na aresta principal de corte da ferramenta impedindo a continuação do ensaio, e com isso, ocorre o aumento do desgaste na aresta alisadora de 187,05μm para 230,61 μm.

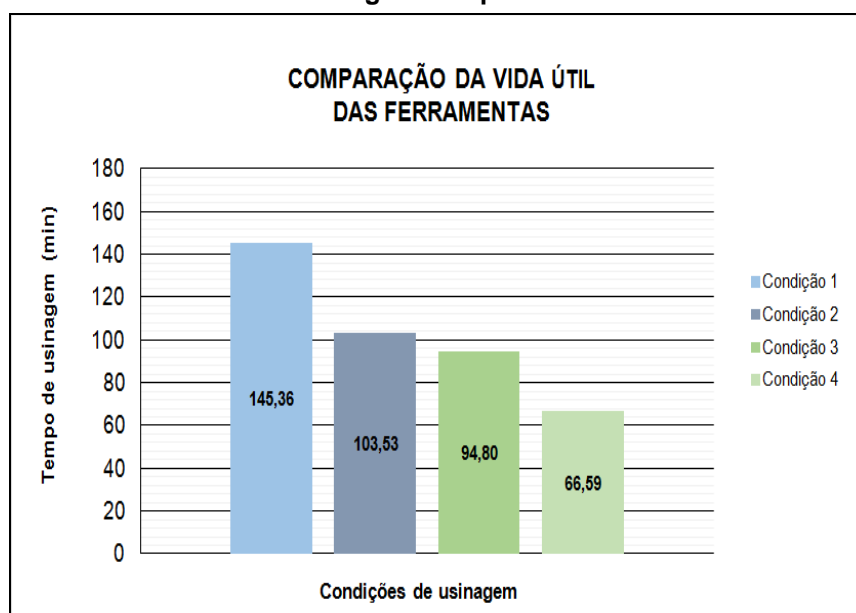
Gráfico 9 - Curva de vida da ferramenta de corte na condição 4 de usinagem.



Fonte: O Autor

O gráfico 10 apresenta uma comparação da vida útil das ferramentas de corte nas condições de usinagens estipuladas, onde foram utilizadas as ferramentas do fabricante A nas condições 1 e 2, e as ferramentas do fabricante B foram utilizadas nas condições 3 e 4.

Gráfico 10 - Gráfico de comparação da vida útil das ferramentas de corte nas condições de usinagens estipuladas.



Fonte: O Autor

Nota-se que ambas as ferramentas apresentaram um decréscimo em seu tempo de usinagem quando expostas ao aumento do avanço por dente (f_z),

comprovando a literatura quando diz que quanto maior o avanço, também maior é a quantidade de calor imputada ao processo, porém simultaneamente aumenta a área da ferramenta que recebe este calor (DINIZ *et al.*, 2013).

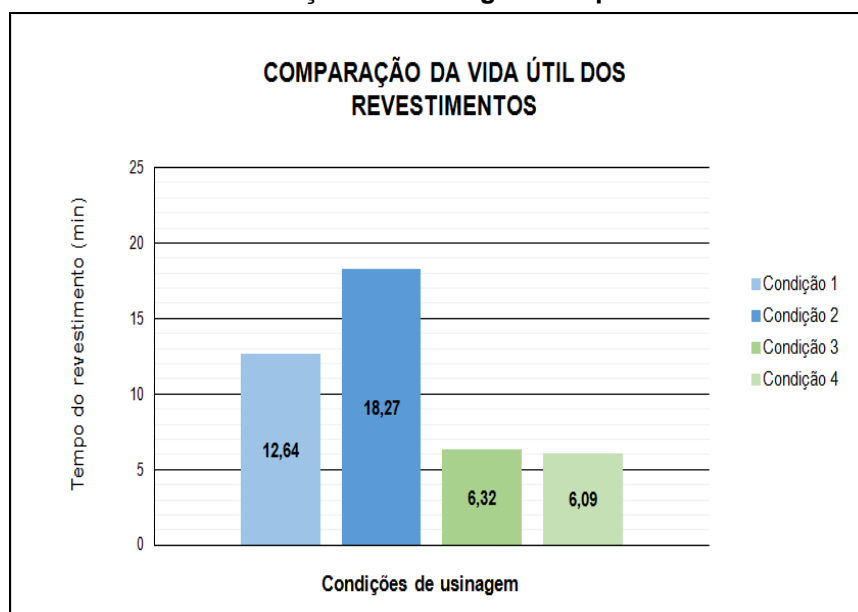
É possível perceber também que em condições iguais de usinagem (condição 1 = condição 3 e condição 2 = condição 4), a ferramenta do fabricante A apresentou tempos maiores de usinagem e conseqüentemente maior vida útil.

A diferença da vida útil das ferramentas pode ser entendida quando se observa a tenacidade à fratura (Tópico 4.7) e a difusividade térmica (Tópico 4.8) das ferramentas. A tenacidade obtida para a ferramenta A, foi de aproximadamente 16% maior que a tenacidade calculada para a ferramenta B. Com isto, supõe-se que a ferramenta A consegue absorver mais energia que a ferramenta B. Já para a difusividade térmica, há uma diferença de 26% na difusividade térmica, onde o valor para o fabricante A é $0,194 \pm 0,007 \text{ cm}^2/\text{s}$ e para o fabricante B é $0,263 \pm 0,009 \text{ cm}^2/\text{s}$.

Outro fator que influencia diretamente na vida útil das ferramentas, é o revestimento presente em cada uma delas.

O gráfico 11 apresenta uma comparação da vida útil dos revestimentos das ferramentas de corte nas condições de usinagens estipuladas, onde foram utilizadas as ferramentas do fabricante A nas condições 1 e 2, e as ferramentas do fabricante B foram utilizadas nas condições 3 e 4.

Gráfico 11 - Gráfico de comparação da vida útil dos revestimentos das ferramentas de corte nas condições de usinagens estipuladas.



Fonte: O Autor

Quando observa-se o tempo de corte efetivo estipulado para os ensaios, nota-se que para as ferramentas do fabricante B, após o primeiro tempo de corte efetivo, o revestimento já havia sido retirado, revelando assim o substrato da ferramenta.

Já para o revestimento das ferramentas do fabricante A, nota-se que o revestimento se manteve por maiores tempos, quando comparados ao revestimento da ferramenta do fabricante B.

Com base nas informações dos fabricantes e nos resultados da caracterização dos revestimentos, é possível entender tal diferença na vida dos mesmos. O revestimento da ferramenta do fabricante B (1 camada = TiAlN), apresenta menor resistência ao desgaste, menor estabilidade química e menor coeficiente de atrito, quando comparado ao revestimento da ferramenta do fabricante A (3 camadas = Ti(C,N)+Al₂O₃+TiN), segundo diagrama demonstrado na Figura 5 (TELES, 2007). A diferença nas espessuras e durezas (ferramenta do fabricante A = 6,914µm / H = 15,55GPa; ferramenta do fabricante B = 3,238µm / H = 21,12GPa), de ambos os revestimentos, também podem contribuir para explicar tal diferença na vida útil dos mesmos.

5 CONCLUSÕES

O objetivo do presente trabalho foi alcançado, sendo este correlacionar as características microestruturais, composição química e propriedades mecânicas e físicas de insertos de metal duro utilizados no fresamento de faceamento do aço ABNT 1045 com a vida útil dos mesmos. O enfoque da pesquisa foi no levantamento das diferenças e semelhanças presentes em duas ferramentas comerciais utilizadas para o mesmo processo de usinagem, mas que passam por processos de fabricação característicos de cada fabricante.

A microestrutura apresentou diferenças que influenciam nas propriedades mecânicas das ferramentas. A granulometria do carboneto de tungstênio influencia significativamente na dureza das ferramentas.

A caracterização química revelou a presença dos mesmos elementos químicos em ambos os substratos.

As espessuras e as composições dos revestimentos foram comparadas e foi observada a existência de variações decorrentes do processo de deposição e fabricação característicos de cada fabricante.

A ferramenta do fabricante A possui um revestimento mais espesso composto por três camadas, onde uma das camadas é definida por Al_2O_3 , componente este, responsável pela inércia química e diminuição da condutividade térmica que ajuda na proteção do substrato, uma vez que este apresentou uma condutividade térmica menor em relação a ferramenta do fabricante B.

A ferramenta do Fabricante A apresentou menor dureza , menor módulo de elasticidade, porém, maior tenacidade a fratura quando comparado a ferramenta do fabricante B.

Nos ensaios de vida das ferramentas, onde as condições de usinagem foram iguais para ambas as ferramentas, notou-se que as ferramenta do fabricante A apresentou um tempo de usinagem maior, quando comparado com a ferramenta do fabricante B, e através das caracterizações realizadas em ambas as ferramentas, foi possível entender alguns motivos que apontam para este ganho de vida útil da ferramenta A.

REFERÊNCIAS

- ALMOND, D. P.; PATEL, P. M. *Photothermal Science and Techniques*. London, Vol. 10, 1996, p. 130.
- ASM Handbook Committee. *Mechanical Testing and Evaluation*. ASM Metals HandBook Volume 8 - Mechanical Testing and Evaluation, 2000.
- BISCAIA, R. V. B. **Comparação de Propriedades Mecânicas e Microestruturais de Ferramentas de Metal Duro de Torneamento de Acabamento**. 2013. 58 P. Monografia (Engenharia Mecânica) – Programa de Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Ponta Grossa, 2013.
- CALLISTER, W. D. **Ciência e Engenharia dos Materiais: Uma Introdução**. 7ª ed. Rio de Janeiro, LTC, 2011, 703 p.
- CHIAVERINI, V. **Metalurgia do Pó**. 4ª ed. São Paulo: Ed. ABM, 2001.
- DIAS, D.T., **Caracterização óptica e térmica de materiais poliméricos via métodos Fototérmicos**, 2005, Tese (Doutorado em Física) – Departamento de Física, Universidade Estadual de Maringá, Maringá, 2005.
- DIAS, D. T. *et al.*, Diamond & Related Materials Photoacoustic spectroscopy and thermal diffusivity measurement on hydrogenated amorphous carbon thin films deposited by plasma-enhanced chemical vapor deposition, **Diamond & Related Materials Journal**, v.48, p.1-5, 2014.
- DINIZ, A. E; MARCONDES, F. C; COPPINI, N. L. **Tecnologia da Usinagem dos Materiais**. 8. ed. São Paulo: Art Liber, 2013. 272 p.
- FANG, Z. Z; EASON, J. W. Study of nanostructured WC–Co composites. **International Journal Refractory Metals & Hard Materials**. 13(5). p. 297–303. 1995.
- FARIA, T. *et al*, On the thermal characterization of a HPHT sintered WC-15% wt Co hardmetal alloy , *J. Refractory Metal e Hard Materials*, v.23, p. 115-118, 2005.
- FERRARESI, D. **Fundamentos da usinagem dos metais**. São Paulo: Edgard Blücher Ltda, 16ª reimpressão, p. 751, 2013.
- FISCHER-CRIPPS, A. C. *Introduction to Contact Mechanics*. New York: Springer-Verlag, 2000.
- GREEN, D. J. **An Introduction to the Mechanical Properties of Ceramics**. [s.l.] Cambridge University Press, 1998.

JIA, C. *et al.* Hot pressing of nanometer WC–Co powder. *International Journal of Refractory Metals & Hard Materials*, Beijing, China, p. 53-56, 2007.

KOELSCH, J. R. Ferramentas de carbetos: o estado da arte. **Máquinas e Metais**, São Paulo, v. 36, n. 415, p.186-201, 2000.

Li Z, Baoqi S. A new hardmetal for mining with Ni–Co binder. **Int J Ref Met Hard Mater**; v.14, p.245–248, 1996.

MACHADO, A. R; ABRÃO, A. M; COELHO, R. T; DA SILVA, M. B. **Teoria da usinagem dos materiais**. São Paulo: Editora Blucher, p.371, 2009

MACHADO, F.A, **Caracterização Térmica da Liga de Metal Duro WC-10%pCo utilizando Técnicas Fototérmicas**, Dissertação (Mestrado em Ciências Naturais) Universidade Estadual do Norte Fluminense, Campos dos Goytacazes, 2007.

MALISKA, A. M. **Microscopia Eletrônica de Varredura e Microanálise**. LABMAT - UFSC. 2003. 98 p.

MANNESON, K. **WC grain growth during sintering of cemented carbides: Experiments and simulations**. 2011. Thesis (Doctoral) - Department Of Materials Science And Engineering, School Of Industrial Engineering And Management, Kth (royal Institute Of Technology), Stockholm, 2011.

MELO, A. C. A. de *et al.* Some Observations on Wear and Damages in Cemented Carbide Tools. **Journal Of The Brazilian Society Of Mechanical Sciences And Engineering**, Joinville, v. 28, n. 3, p.269-277, 2006.

MIRANZO, P. *et al*, **Thermal Conductivity enhancement in cutting tools by chemical vapor deposition diamond coating**, *J. Diamond and Related Materials*, v.11, p. 703-707, 2002.

OLIVER, W. C.; PHARR, G. M. **Improved Technique for determining hardness and elastic modulus using load and displacement sensing indentation experiments**. *Journal of Materials Research*, 1992. 1564-1583.

PAIVA, R.; BARJA, P. Células **Fotoacústicas para Medidas em Sistemas Biológicos**. X Encontro Latino de I.C e VI Encontro Latino Americano de Pós-Graduação – Universidade de Vale da Paraíba.

ROSENCWAIG A.; GERSHO A, Theory of the Photoacoustic Effect with Solids, **J. Appl. Phys**, v.47, p.64, 1976.

COROMANT, Sandvik. Fluido de corte, estratégias de aplicação na usinagem. **O mundo da usinagem**. 2004. Publicação da Sandvik Coromant do Brasil. ISSN 1518-6091 RG. BN 217.147, 2004. Disponível em <www.sandvik.coromant.com/br> Acesso em: 18 mai. 2017

SABINO, S. R. F. **Obtenção de Blocos de Espumas Vitreas a Partir de Rejeitos de Vidro Laminado**. 2011. 91 f. Dissertação (Mestrado) - Universidade Estadual de Ponta Grossa, Ponta Grossa, 2011

SANTOS, J. N.; KLEIN, A. N.; CORREA, E. O. Desenvolvimento de metais duros WC-Ni-Si para aplicações de engenharia. *Tecnologia em Metalurgia, Materiais e Mineração*, São Paulo, v. 6, n. 3, p.162-166, 2010.

SECO TOOLS AB. *Tecnologia de Fresamento*. Sorocaba, 2016.

SHAW, M. C. **Metal Cutting Principles**. 2. ed. Oxford: Oxford University Press, 2005.

SILVA, M. D.; BANDEIRA, I. N.; MIRANDA, L. C. M., *J. Phys. E: Sci. Instrum.* v.20, p.1476. 1987.

SOARES, L. R. L. **Fresamento do aço SAE 4340 temperado e revenido utilizando ferramentas de metal duro recobertas**. 2017. 134 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2017.

SOLEIMANPOUR, A. M., *et al.* **Microstructure and mechanical properties of WC–10Co cemented carbide containing VC or (Ta, Nb)C and fracture toughness evaluation using different models**. *Int. Journal of Refractory Metals and Hard Materials*. v. 31, p. 141 - 146, 2012.

SOMER, A.; **Influência da Flexão Termoelástica na Medida da Difusividade Térmica de Amostra de Alumínio**. Dissertação (Mestrado em Física) – Departamento de Física, Universidade Estadual de Ponta Grossa, Ponta Grossa, 2012.

SOUZA, J. S.; **Caracterização Termo-óptica de Ferramentas de Metal Duro Via Técnicas Fotoacústicas**. Trabalho de Conclusão de Curso - Departamento Acadêmico de Mecânica, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, 2016.

SOUZA, S. A. **Composição Química dos Aços**. São Paulo, Blucher, 2001.

STEMMER, C. E. **Ferramentas de corte II**. 3ª Edição, Florianópolis: editora da UFSC, 2005, 314 p.

TELES, J. M. **Torneamento de Ferro Fundido Nodular Ferritizado com Nióbio Utilizando Ferramentas de Metal Duro**. 2007. 124 f. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Itajubá, Itajubá, 2007.

TRENT, E. M; WRIGHT, P. K. **“Metal Cutting”**, 2ª ed., Butterworth-Heinemann, Woburn, USA, 2000.

VANDER VOORT, G. F. (Ed.). **Metallography of Cemented Carbide**, In: ASM Metals Handbook -Metallography and Microstructures. **ASM International**, v. 9, p. 2580-2607, 2004.

ZIEGLER G., HASSELMAN. D. P. H., J. Mat. Sci. v. 16, p. 495, 1981.