

ANDERSON FIGUEIREDO DA COSTA

**Análise Comparativa de Ferramentas Revestidas por PVD e CVD no Torneamento do
Aço ABNT 8620**

Guaratinguetá - SP
2016

ANDERSON FIGUEIREDO DA COSTA

Análise Comparativa de Ferramentas Revestidas por PVD e CVD no Torneamento do Aço ABNT 8620

Dissertação apresentada à Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Mecânica na área de Materiais.

Orientador: Prof. Dr. Marcos Valério Ribeiro
Coorientador: Dr. João Paulo Barros Machado

Guaratinguetá - SP
2016

C837a Costa, Anderson Figueiredo da
Análise comparativa de ferramentas revestidas por PVD E CVD no torneamento do aço ABNT 8620 / Anderson Figueiredo da Costa – Guaratinguetá, 2016.
132 f : il.
Bibliografia: f. 126-132

Dissertação (Mestrado) – Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá, 2016.

Orientador: Prof. Dr. Marcos Valério Ribeiro
Coorientador: Prof. Dr. João Paulo Barros Machado

1. Usinagem. 2. ferramentas. 3. Tornos. I. Título

CDU 621.9(043)

unesp  **UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA**
“JÚLIO DE MESQUITA FILHO”
CAMPUS DE GUARATINGUETÁ

ANDERSON FIGUEIREDO DA COSTA

**ESTA DISSERTAÇÃO FOI JULGADA ADEQUADA PARA A OBTENÇÃO DO TÍTULO DE
“MESTRE EM ENGENHARIA MECÂNICA”**

**PROGRAMA: ENGENHARIA MECÂNICA
ÁREA: MATERIAIS**

APROVADA EM SUA FORMA FINAL PELO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO

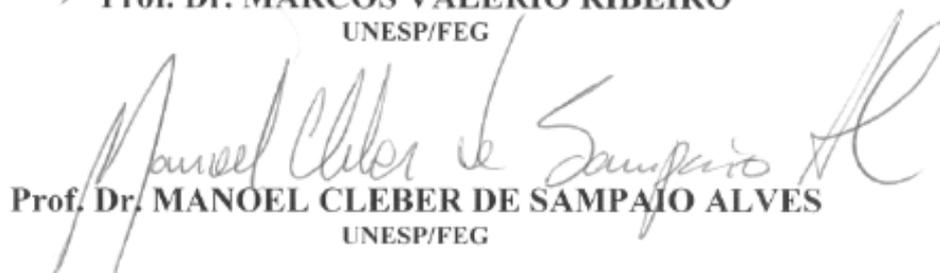


Prof. Dr. José Antonio Perrella Balestieri
Coordenador

BANCA EXAMINADORA:



Prof. Dr. MARCOS VALERIO RIBEIRO
UNESP/FEG



Prof. Dr. MANOEL CLEBER DE SAMPAIO ALVES
UNESP/FEG



Prof. Dr. JOÃO ROBERTO FERREIRA
IEGP/UNIFEI

Setembro 2016

DADOS CURRICULARES

ANDERSON FIGUEIREDO DA COSTA

NASCIMENTO	12.04.1986 – São Paulo / SP
FILIAÇÃO	Aquiles Teofilo da Costa Francisca Figueredo dos Santos
2007/2012	Curso de Graduação Engenharia Mecânica – Universidade São Judas Tadeu
2015/2016	Curso de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, nível de Mestrado - Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho” campus de Guaratinguetá.

Dedico este trabalho à minha esposa Rosemeire, pelo apoio e incentivo incondicional, e de modo especial, a minha filha Alice, que desde o período gestacional até agora com seus poucos meses de vida, foi uma grande motivadora para a conclusão deste Mestrado.

Dedico ainda aos meus Pais, Aquiles e Francisca, pelo incansável incentivo à educação de seus dois filhos.

AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar agradeço a Deus, fonte da vida e da graça. Agradeço pela minha vida, minha inteligência, minha família e meus amigos, e por esta oportunidade de concluir a primeira parte deste grande sonho.

ao meu orientador, Prof. Dr. Marcos Valério Ribeiro por ter me acolhido como orientando e pela orientação, dedicação e auxílio para conclusão deste trabalho;

ao meu coorientador, Dr. João Paulo Barros Machado que é o maior responsável pela continuidade deste trabalho, por sempre me incentivar e apoiar em todos os momentos e de ter se tornado este grande amigo;

aos meus pais Aquiles e Francisca, que apesar das dificuldades enfrentadas, sempre incentivaram meus estudos;

à minha esposa Rosemeire e minha filha Alice, que sempre me apoiaram e estiveram ao meu lado em todos os momentos tristes e felizes durante este período;

ao meu irmão Clayton, que sempre incentivou e apoiou durante todo este período;

aos meus amigos e familiares, que em sempre me apoiaram e foram fonte de energia durante este período;

ao meu amigo, Prof. Dr. José Vitor Candido Souza por ter me acolhido na UNESP e sempre buscado me incentivar, ensinar e ajudar em todos os momentos.

aos funcionários e técnicos da FEG pelo apoio nas atividades de usinagem realizadas no laboratório de usinagem do Campus de Guaratinguetá;

à UNESP – Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá por me acolher e dispor de toda sua infraestrutura;

“Duas coisas são infinitas: o universo e a estupidez humana. Mas, no que respeita ao universo, ainda não adquiri a certeza absoluta.”

Albert Einstein

COSTA, A.F. **Análise Comparativa de Ferramentas Revestidas por PVD e CVD no Torneamento do Aço ABNT 8620**. 2016. 132f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Faculdade de Engenharia do campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2016.

RESUMO

Com o atual avanço de propriedades dos materiais, novas alternativas estão sendo buscadas para manufaturas desses materiais. Entre os processos, a usinagem se caracteriza por ser um processo que emprega milhões de pessoas. Entretanto para alcançar tais objetivos melhorias nas propriedades das ferramentas se faz necessária. Neste seguimento, os revestimentos vêm apresentando avanços significativos, como pode-se destacar o revestimento por CVD (deposição química a vapor) que permite que a ferramenta seja empregada nas temperaturas em torno de 1200°C. Nesta mesma linha vale destacar o revestimento por PVD (deposição física a vapor) normalmente em uma única camada, o qual permite que a aresta de corte seja positiva, possa trabalhar com menor esforço de corte, e em temperatura aproximadamente em 700°C. Este trabalho tem como objetivo analisar comparativamente o desempenho de ferramentas de metal duro revestidas pelo processo CVD e PVD no torneamento do aço ABNT 8620 sem uso de fluido de corte. Foram utilizadas duas pastilhas de metal duro revestidas pelo processo de PVD e CVD, com mesma geometria para efeito comparativo. A pastilha revestida por PVD tem espessura do revestimento de 3µm, enquanto que a pastilha revestida por CVD tem espessura do revestimento de 16µm. As pastilhas revestidas foram caracterizadas quanto a composição química dos elementos de revestimentos utilizando um microscópio eletrônico de varredura pela técnica de *linescan* e *mapping*. Posteriormente as ferramentas foram aplicadas ao torneamento nas velocidades de corte (V_c) entre 350 a 500m/min, avanço (f) de 0,20mm/rot e profundidade de corte (ap) de 1,00mm, utilizando um torno da marca ROMI, modelo GL240M. As caracterizações foram realizadas com uso de um microscópio óptico, microscópio eletrônico de varredura e um rugosímetro. Os resultados demonstraram que a ferramenta revestida pelo processo CVD apresenta um melhor rendimento, quando comparado ao processo PVD, este fato ocorreu porque a ferramenta revestida pelo processo CVD apresenta um revestimento multicamadas, possuindo um aporte térmico mais elevado, suportando assim, temperaturas de corte mais elevadas durante a usinagem e promovendo um menor desgaste de flanco e de superfície de saída. Portanto, este trabalho demonstra que para uso em uma indústria que torneia o aço ABNT 8620, as ferramentas revestidas com CVD apresentam melhor desempenho, levando a um menor consumo de pastilhas e uma expressiva redução de custos.

PALAVRAS-CHAVE: Torneamento. Desgaste. Rugosidade. Revestimento CVD.

Revestimento PVD.

COSTA, A. F. Analysis Tools Comparative Coated PVD and CVD in Steel Turning

ABNT 8620. 2016. 132f. Dissertation (Master's degree in Mechanical Engineering) -

Faculdade de Engenharia do campus de Guaratinguetá, Univ. Estadual Paulista – UNESP, Guaratingueta, 2016.

ABSTRACT

With the current advancement of material properties, new alternatives are being sought for manufacturing these materials. Among the processes, machining is characterized as a process that employs millions of people. However to achieve such goals improvements in the tools properties is necessary. In this follow-up, the coatings have shown significant advances, as can highlight the coating by CVD (chemical vapor deposition) that allows the tool to be used at temperatures around 1200°C. In the same line it is worth highlighting the coating by PVD (physical vapor deposition) usually in a single layer, which allows the cutting edge is positive, can work with less shear stress, and temperature approximately 700°C. This study aims at comparing the performance of carbide tools coated by the CVD process and PVD in the steel turning ABNT 8620 without the use of cutting fluid. We used two carbide inserts coated by the PVD and CVD process, with the same geometry for comparison purposes. The tablet is coated by PVD coating thickness of 3µm, while the tablet is coated by CVD coating thickness of 16µm. The coated tablets were characterized as the chemical composition of coatings elements using a scanning electron microscope for linescan technique and mapping. Subsequently the tools were applied to turning the cutting speed (V_c) between 350 to 500 m/min, feed (f) 0.20 mm/rev and depth of cut (a_p) of 1.00mm using a lathe ROMI mark, GL240M model. The characterizations were carried out using an optical microscope, scanning electron microscope and roughness. The results demonstrated that the tool coated by the CVD process has a better performance when compared to PVD this occurred because the tool coated by the CVD process has a multilayer coating having a higher heat input, supporting thus cutting temperatures over high during machining and promote a smaller flank wear and output surface. Therefore, this work shows that for use in an industry that sidesteps steel ABNT 8620, tools coated with CVD have better performance, leading to lower consumption of pellets and a significant cost reduction.

KEYWORDS: Turning. Wear. Roughness. CVD Coating. PVD Coating.

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
AFNOR	Association Française de Normalisation
AISI	American Iron and Steel Institute
ASTM	American Society for Testing and Materials
CAD	Computer Aided Design (desenho assistido por computador)
CVD	Chemical Vapor Deposition (deposição química a vapor)
DIN	Deutsches Institut für Normung
GPa	Giga Pascal
HB	Hardness Brinell
HRA	Hardness Rockwell B (dureza Rockwell B)
HRC	Hardness Rockwell C (dureza Rockwell C)
HSS	High Speed Steel (aço rápido)
HTCVD	High Temperature of Chemical Vapor Deposition (alta temperatura de deposição química a vapor)
ISO	International Organization for Standardization
MEV	Microscopia eletrônica de varredura
MPa	Mega Pascal
MTCVD	Medium Temperature of Chemical Vapor Deposition (média temperatura de deposição química a vapor)
PCBN	Polycrystalline Cubic Boron Nitride (nitreto cúbico de boro policristalino)
PCD	Polycrystalline Diamond (diamante policristalino)
PVD	Physical Vapor Deposition (deposição química a vapor)
SAE	Society of Automotive Engineers

LISTA DE SÍMBOLOS

(Al, Ti)N	Nitreto de alumínio e titânio
(Al, Ti, Si)N	Nitreto de titânio alumínio e silício
Al ₂ O ₃	Oxido de Alumínio
ap	Profundidade de corte
APC	Aresta postiça de corte
BUE	Built Up Edge (aresta postiça de corte)
Co	Cobalto
Cr	Cromo
CrN	Nitreto de Cromo
D	Diâmetro
D.O.C	Depth of cut (profundidade de corte)
DRX	Difração Raio X
f	avanço em mm/rot
Fe	Ferro
KT	Profundidade da cratera
LC	Comprimento de Corte
n	Rotação
NbC	Carbeto de Nióbio
Ni	Níquel
Si	Silício
TaC	Carbeto de Tântalo
TC	Tempo de corte
TiC	Carbeto de Titânio
TiN	Nitreto de titânio
VBB	Desgaste de flanco médio
VBMÁX	Desgaste de flanco máximo
Vc	Velocidade de corte
WC	Carbeto de Tungstênio

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Efeitos do processo de torneamento durante a usinagem.....	24
Figura 2 - Efeitos da dureza	25
Figura 3 - Efeitos da adesividade.....	26
Figura 4 - Efeitos na resistência dos materiais	27
Figura 5 - Efeitos da maleabilidade	27
Figura 6 - Efeitos da condutividade térmica	28
Figura 7 - Efeitos do encruamento.....	29
Figura 8 - Partículas duras.....	29
Figura 9 - Tipos de Tornos.....	30
Figura 10 - Efeito do avanço na rugosidade superficial da peça usinada.	31
Figura 11 - Classificação do Aço.....	32
Figura 12 - As primeiras ferramentas de corte criadas pelo homem	34
Figura 13 - História do desenvolvimento da ferramenta.....	35
Figura 14 - Classificação das ferramentas de metal duro conforme Norma ISO 513 (2004)..	37
Figura 15 - Comparação do metal duro com a composição do concreto	38
Figura 16 - Processo de fabricação	39
Figura 17 - Deposição química a partir de fase vapor	46
Figura 18 - Processo CVD por gás	48
Figura 19 - Plasmas <i>Enhanced CVD System</i>	51
Figura 20 - Propriedades do metal duro.....	53
Figura 21 - Equação do Coeficiente Térmico.....	54
Figura 22 - Área da camada resistente.....	57
Figura 23 - Estrutura ampliada do revestimento CVD em metal duro	57
Figura 24 - Esquema de um <i>Sputtering</i> convencional	60
Figura 25 - Evaporação por arco	61
Figura 26 - Íons.....	62
Figura 27 - Revestimento PVD	65
Figura 28 - Diferenças entre CVD e PVD, Adesão	66
Figura 29 - Diferenças entre CVD e PVD, Óxidos.....	66
Figura 30 - Diferenças entre CVD e PVD, Substrato	67
Figura 31 - Diferenças entre CVD e PVD, Areta de Corte	68
Figura 32 - Principais regiões de desgaste na aresta de corte	71
Figura 33 – Parâmetros e regiões para medição do desgaste	72
Figura 34 – Gráfico em escala logarítmica da vida da ferramenta V-T.....	73
Figura 35 - Desgaste de flanco	74
Figura 36 - Desgaste de cratera	74
Figura 37 - Dano anormal, Fratura	75
Figura 38 - Dano de ruptura	75
Figura 39 - Dano de soldagem.....	76
Figura 40 - Dano de microlascamento	77
Figura 41 - Dano de entalhe	77
Figura 42 - Dano por trinca térmica.....	78
Figura 43 - Dano de deformação plástica.....	79
Figura 44 - Dano por deslocamento	79
Figura 45 - Rugosidade Ra.....	81
Figura 46 - Rugosidade Rz.....	82
Figura 47 - Torno CNC da marca ROMI modelo GL 240M	83

Figura 48 - Quebra-cavaco TM utilizado nos ensaios da pesquisa	84
Figura 49 - Família AH de revestimentos PVD	84
Figura 50 - Família T9100 de revestimentos CVD.....	85
Figura 51 - Equipamento de DRX marca Panalytical e modelo X'Pert Powder do LAS - INPE	86
Figura 52 - Perfilômetro Óptico marca Veeco e modelo WYKO NT1100	87
Figura 53 - Microscópio Eletrônico de Varredura marca JEOL e modelo JSM-5310	88
Figura 54 - Equipamento da marca SBT (<i>South Bay Technology</i>) e modelo Model 650.....	89
Figura 55 - Corte das pastilhas	89
Figura 56 – Equipamento da marca Politriz Lixadeira Metalografica e modelo PL02E - INPE	90
Figura 57 - <i>Sputtering</i> marca DENTON VACCUN, modelo DESKII - INPE	90
Figura 58 - Pastilhas revestidas com ouro.....	91
Figura 59 - Matéria prima para usinagem, SAE - 8620.....	91
Figura 60 - Eixo modificado para fixação no torno CNC	92
Figura 61 - Preparação e modificação dos eixos	92
Figura 62 - Eixos após modificação.....	92
Figura 63 - Capto C3 com a pastilha PVD.....	93
Figura 64 - Programa utilizado para usinagem.....	93
Figura 65 - Rugosímetro Mahr, modelo MarSurf300 M30 e o MarSurf RD18	95
Figura 66 - Microscópio Mahr modelo MarVision MM200	95
Figura 67 - Difração Raio-X do substrato do CVD	96
Figura 68 - Difração Raio-X do revestimento CVD.....	97
Figura 69 - Difração Raio-X do substrato do PVD	98
Figura 70 - Difração Raio-X do revestimento PVD	99
Figura 71 - Difração Raio-X, Substrato vs Revestimento.....	100
Figura 72 - Difração Raio-X, Substratos CVD vs PVD	101
Figura 73 - <i>Linescan</i> da pastilha com a classe de revestimento CVD T9115	102
Figura 74 - <i>Linescan</i> da pastilha com a classe de revestimento PVD	103
Figura 75 - <i>Mapping</i> da pastilha com a classe de revestimento CVD.....	104
Figura 76 - <i>Mapping</i> da pastilha com a classe de revestimento CVD apresentando o C	105
Figura 77 - <i>Mapping</i> da pastilha com a classe de revestimento PVD	106
Figura 78 - Imagem da rugosidade da face do CVD	107
Figura 79 - Vida da ferramenta para as velocidades de corte variando de 350 a 500 m/min	111
Figura 80 - Vida da ferramenta para as velocidades de corte variando de 350 a 500 m/min	112
Figura 81 – Desgastes das pastilhas usadas na usinagem do aço SAE 8620 com parâmetro de velocidade de corte de 350 m/min com revestimento CVD (a) e revestimento PVD (b).....	113
Figura 82 - Desgastes das pastilhas usadas na usinagem do aço SAE 8620 com parâmetro de velocidade de corte de 400 m/min com revestimento CVD (c) e revestimento PVD (d).....	114
Figura 83 - Desgastes das pastilhas usadas na usinagem do aço SAE 8620 com parâmetro de velocidade de corte de 450 m/min com revestimento CVD (e) e revestimento PVD (f)	116
Figura 84 - Desgastes das pastilhas usadas na usinagem do aço SAE 8620 com parâmetro de velocidade de corte de 500 m/min com revestimento CVD (g) e revestimento PVD (h).....	118
Figura 85 - Rugosidade média Ra dos revestimentos durante a usinagem	119
Figura 86 - Rugosidade média Ra dos revestimentos durante a usinagem	120
Figura 87 - Gráfico do comprimento usinado com o desgaste dos revestimentos CVD e PVD	121
Figura 88 - Microscopia da face de saída do revestimento CVD	122
Figura 89 - Microscopia da face de saída do revestimento PVD	123

LISTA DE QUADROS

Quadro 1	Critério de usinabilidade	24
Quadro 2	Quadro de características e composição química do SAE8620	33
Quadro 3	Propriedade do metal duro	52
Quadro 4	Propriedades dos materiais.....	63
Quadro 5	Fatores que afetam a rugosidade	80
Quadro 6	Cavacos gerando durante o torneamento do aço SAE 8620	109

LISTA DE TABELAS

Tabela 1	Característica dos revestimentos PVD e CVD da empresa Tungaloy	85
Tabela 2	Rugosidade superficial das pastilhas utilizadas na pesquisa	108
Tabela 3	Vida das pastilhas e V_c (velocidade de corte) de cada revestimento	111
Tabela 4	Tempo de contato e desgaste dos revestimentos à V_c de 350 m/min.....	114
Tabela 5	Tempo de contato e desgaste dos revestimentos à V_c de 400 m/min.....	115
Tabela 6	Tempo de contato e desgaste dos revestimentos à V_c de 450 m/min.....	117
Tabela 7	Tempo de contato e desgaste dos revestimentos à V_c de 500 m/min.....	119

SUMÁRIO

1.INTRODUÇÃO.....	20
2. OBJETIVOS	22
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	23
3.1 USINAGEM.....	23
3.1.1 Usinabilidade	23
3.1.2 Efeitos que afetam a usinabilidade.....	25
3.1.2.1 Dureza	25
3.1.2.2. Adesividade	26
3.1.2.4 Maleabilidade	27
3.1.2.5 Condutividade Térmica.....	28
3.1.2.6 Encruamento.....	28
3.1.2.7 Partículas Duras	29
3.1.3 Torneamento	30
3.1.4 Aço.....	32
3.2 MATERIAIS PARA FERRAMENTAS DE CORTE.....	34
3.2.1 Metal Duro	36
3.2.1.1 Processo de Fabricação do Metal Duro.....	38
3.3 REVESTIMENTOS.....	44
3.3.1 Processo CVD	46
3.3.1.1 Os processos HTCVD e MTCVD	48
3.3.1.2 Diferenças entre HTCVD e MTCVD	49
3.3.1.3 O processo PACVD	50
3.3.1.4 Características do processo de revestimento CVD.....	52

3.3.1.5	Características dos Materiais do Revestimento CVD.....	55
3.3.1.6	Substrato utilizado em revestimentos CVD no metal duro.....	56
3.3.2	Processo PVD.....	58
3.3.2.1	O processo <i>Sputtering</i>	59
3.3.2.2	O processo de Evaporização.....	60
3.3.2.3	O processo de Íons.....	61
3.3.2.4	Características dos Materiais do Revestimento PVD.....	63
3.3.2.5	Características dos Materiais do Revestimento PVD.....	64
3.3.3	Vantagens e Desvantagens do CVD e PVD.....	65
3.3.3.1	Adesão.....	65
3.3.3.2	Revestimento com Óxidos.....	66
3.3.3.3	Substrato.....	67
3.3.3.4	Aresta de Corte.....	67
3.3.3.5	Adesividade dos Revestimentos.....	68
3.3.4	Danos à ferramenta de corte.....	71
3.3.4.1	Desgaste de Flanco.....	73
3.3.4.2	Desgaste de Cratera.....	74
3.3.4.3	Dano de Fratura.....	75
3.3.4.4	Dano de Quebra.....	75
3.3.4.5	Dano de Soldagem.....	76
3.3.4.6	Dano de Microlascamento.....	76
3.3.4.7	Dano por Entalhe.....	77
3.3.4.8	Dano de Trincas Térmicas.....	78
3.3.4.9	Dano por Deformação Plástica.....	78
3.3.4.10	Dano de Desplacamento (Lasca).....	79

3.4 RUGOSIDADE.....	80
4. MATERIAIS E MÉTODOS.....	83
4.1 MATERIAIS	83
4.2 MÉTODOS	85
4.2.1 Difração de Raio-X (DRX)	86
4.2.2 Perfilômetro Óptico	87
4.2.3 Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV).....	88
4.2.4 Usinagem.....	91
4.2.4 Medições de desgaste e rugosidade	94
5. RESULTADOS E DISCUSSÃO	96
5.1 ESTRUTURA QUÍMICA DAS PASTILHAS	96
5.2 MICROSCOPIA DAS PASTILHAS	101
5.4 FORMAÇÃO DO CAVACO.....	108
5.5 VIDA DA FERRAMENTA	110
5.6 RUGOSIDADE DA PEÇA USINADA.....	119
5.7 REVESTIMENTO CVD E PVD COM VIDAS APROXIMADAS	120
6. CONCLUSÃO	124
7. REFERÊNCIAS	126

1. INTRODUÇÃO

Devido ao avanço tecnológico, diversos fabricantes de ferramentas de corte vêm investindo em pesquisa e desenvolvimento. Com isso, novas tecnologias vêm surgindo e com eles novos desafios para os especialistas em usinagem. Graças a estes avanços, as ferramentas de corte passaram a ser revestidas por volta de 1969 e desde então os avanços não param de crescer, além de novas descobertas e lançamentos.

Depois de décadas do descobrimento do metal duro e de tê-lo revestido, ainda precisava reduzir mais o consumo de ferramentas de corte e aumentar a produtividade. Sendo assim, os centros de pesquisas passaram a buscar novas técnicas de revestimento e novos elementos químicos que ampliassem a vida da ferramenta de corte. Dentre os principais campos de aplicação do revestimento em ferramentas de corte é o de melhorar a resistência ao desgaste. Alguns dos benefícios obtidos com a aplicação de revestimentos nas ferramentas de corte que são: redução de potência e aumentos na velocidade de corte.

Inicialmente os processos de revestimentos eram feitos pelo processo CVD (*Chemical Vapour Deposition*), mas devido à necessidade de arestas mais positivas, os processos começaram a ser feitos também no processo PVD (*Physical Vapour Deposition*).

Estas técnicas de revestimento são empregadas em diversos processos de usinagem como por exemplo torneamento e fresamento, porém, o mais comum em alguns processos de usinagem como o de torneamento era o de empregar revestimentos CVD.

Ao passar dos anos e devido a grandes estudos científicos o processo PVD passou também a ser empregado em pastilhas de torneamento e tendo suas indicações similares as do processo de revestimento CVD. Porém para as aplicações em aços e aços ligas, o revestimento a ser empregue ainda é vago já que os próprios fabricantes não especificam qual dos dois revestimentos tem o melhor desempenho.

Buscando contribuir para a usinagem do ABNT 8620 que é um aço para cementação e posterior beneficiamento ligado ao níquel, cromo, e molibdênio o que lhe confere melhor temperabilidade. A cementação neste tipo de aço é utilizada para aumentar a resistência ao desgaste em um núcleo de boa resistência mecânica e à fratura. Após cementação a dureza superficial pode atingir 62 HRC. Por ser um material muito utilizado na indústria metal mecânica e em alta escala no segmento automotiva, este aço foi utilizado nesta pesquisa. Além disso, este é um aço com alta resistência ao desgaste e tem uma ótima usinabilidade.

Na atualidade, o processo de torneamento é o que tem mais opções de revestimentos nas pastilhas empregadas e em quase todas as geometrias as opções são apresentadas em CVD e PVD.

Em busca de acrescentar mais informações a comunidade científica, esta pesquisa busca também apresentar a indústria qual o melhor revestimento para este tipo de aço. Para isso, são utilizados parâmetros reais da indústria metal mecânica e que são superiores aos recomendados pelos fabricantes inicialmente, no intuito de deixar esta pesquisa bem próxima aos processos de usinagem usuais na indústria e com isso obter resultados concretos e reais que possam direcionar qual a melhor técnica de revestimento selecionar e qual a diferença entre as duas.

2. OBJETIVOS

Esta dissertação tem por objetivo apresentar qual das técnicas de revestimento tem o melhor desempenho ao serem submetidas a velocidades de corte acima de 350m/min no processo de torneamento do aço ABNT 8620.

Os principais objetivos desta dissertação são:

- Caracterizar o substrato das pastilhas de metal duro e os revestimentos.
- Realizar torneamento do aço ABNT 8620 através do processo de torneamento utilizando pastilhas de metal duro revestidas com as técnicas CVD e PVD.
- Analisar o desempenho de cada revestimento empregado nas pastilhas durante o aumento da velocidade de corte.
- Analisar o acabamento superficial da peça ao longo do desgaste da pastilha.
- Avaliar o desgaste das pastilhas de metal duro após o torneamento.

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Esse capítulo da dissertação tem como objetivo, apresentar os tópicos que tem relação direta com este trabalho, com isso, apresentar melhor o assunto abordado que está diretamente relacionado a usinagem de aços utilizando pastilhas de metal duro revestidas.

3.1 USINAGEM

A usinagem é um dos processos de fabricação de material mais comum e que utiliza uma grande variedade de ferramentas. Os métodos para usinagem incluem por exemplo processos como os de torneamento, fresamento e furação.

Segundo o portal CIMM (2015), a usinagem é o processo de fabricação que promove a retirada de material da peça por cisalhamento. A porção de material retirada por esse processo é chamado de cavaco. A usinagem atende aos seguintes objetivos:

- Acabamento de superfícies de peças fundidas ou conformadas mecanicamente;
- Obtenção de peculiaridades (saliências, reentrâncias, furos passantes, furos rosqueados, etc.);
- Fabricação seriada de peças a um custo mais baixo;
- Fabricação de peças, de qualquer forma, a partir de um bloco de material metálico.

As operações de usinagem podem ser classificadas em: torneamento, fresamento, aplainamento, furação, mandrilamento, serramento, brochamento e roscamento, entre outros.

Dentro da usinagem alguns fatores devem ser analisados com extremo cuidado, para que assim venha a ocorrer um processo estável. Esses fatores são: geração de cavacos, esforços de corte e rugosidade.

3.1.1 Usinabilidade

Existem distintas definições para o termo “USINABILIDADE” onde se encontram diversos fatores e efeitos. Normalmente expressa por um valor numérico, a usinabilidade é uma grandeza tecnológica, onde o valor indicado expressa a capacidade que um dado material

tem de ser usinado em diversos parâmetros de corte, com mais ou menos facilidade (DATSKO, 1967 e FERRARESI, 1997).

Segundo Arfeld e Hanum (1977), se pode definir a usinabilidade de um material que é expressa por um valor numérico comparativo através de um conjunto de propriedades de um dado material durante a usinagem, tomando como referência um outro material. Essas propriedades podem ser: a vida da ferramenta, temperatura de corte, cavaco, resistência ao corte, acabamento superficial e tempo de corte.

No Quadro 1 abaixo pode-se observar os efeitos da usinabilidade e suas propriedades.

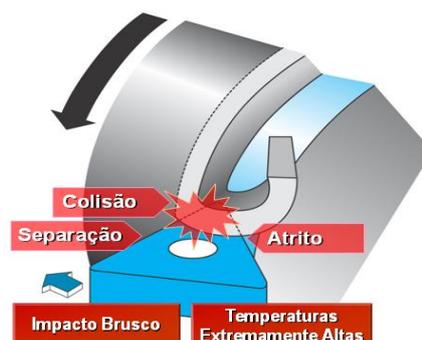
Quadro 1 Critério de usinabilidade

	Boa Usinabilidade	Péssima Usinabilidade
Vida de Ferramenta	Longa, Estável	Curta, Instável
Temperatura de Corte	Não é tão alta	Alta
Cavaco	Facilmente Controlado	Contínuo, Vibrações Sucessivas
Resistência ao Corte	Baixa	Alta
Acabamento Superficial	Bom	Desenvolve Rebarbas Facilmente
Tempo de Corte	Curto	Longo

Fonte: Adaptado de (Mitsubishi, 2006)

A usinabilidade geralmente depende do material a ser usinado e de suas propriedades. Sendo assim, a partir da compreensão das propriedades mecânicas básicas dos materiais pode-se definir ou avaliar como será a usinabilidade dos mesmos. Com isso, pode-se concluir que a usinabilidade está diretamente ligada a propriedade mecânica dos materiais. Logo, seria a capacidade que os materiais têm para se deixarem ser trabalhados por ferramentas de corte (STOETERAU, 2004).

Figura 1 – Efeitos do processo de torneamento durante a usinagem



Fonte: Adaptado Mitsubishi (2007)

Existem assim diversos efeitos causados pelo material da peça usinada e da ferramenta que influenciam diretamente na usinagem.

3.1.2 Efeitos que afetam a usinabilidade

Segundo a Ferraresi et al (1977), existem efeitos que afetam muito a usinabilidade dos materiais, como os mostrados abaixo:

3.1.2.1 Dureza

Com o aumento da dureza de uma peça o mesmo acontece com o desgaste de flanco. Quando a aresta de corte entra em contato com a peça usinada, acontece o impacto e a resistência de corte aumenta. Se a peça usinada é tenaz, problemas tais como: a aresta postiça e de controle do cavaco podem ocorrer.

Quando existe aresta postiça, o acabamento da superfície fica prejudicado. Outro problema que pode ocorrer é quando a seção soldada vem longe da aresta de corte, o que pode fazer com que a camada de revestimento seja puxado para fora e, eventualmente, resultar na fratura e lascas.

Quando a peça usinada é tenaz, o cavaco gerado é difícil de cisalhar. Isso resultará em cavaco alongado. Quando isso acontece, os cavacos podem emaranhar-se em torno da ferramenta e/ou da peça usinada. Neste caso, o acabamento da superfície usinada será arranhado e o acabamento da superfície irá deteriorar-se.

Figura 2 - Efeitos da dureza



3.1.2.2. Adesividade

Adesão refere-se à viscosidade de um material, em outras palavras o quão fácil é para cortar um cavaco da peça. Na usinagem de materiais que são adesivos, é difícil cortar/quebrar os cavacos e, como resultado grandes forças de corte são geradas na aresta de corte. Isto irá levar a um aumento nas temperaturas na aresta de corte.

Figura 3 - Efeitos da adesividade

	Dureza	Tenacidade
Baixa usinabilidade		
Vida útil da ferramenta	Baixa	
Temperatura de corte	Alta	
Expulsão de cavacos	Ruim	Alta
Resistência ao corte	Alta	Alta
Acabamento superficial	Ruim	
Desgaste frontal	Alta	Alta
Soldagem	Alta	Baixa

Fonte: Adaptado de (Mitsubishi, 2006)

3.1.2.3 Resistência do Material

Quando se refere a força, se refere ao quão fácil ou difícil é para deformar ou alterar a forma de um material. Quando se fala na usinagem de materiais que têm elevada resistência e que são difíceis de se deformar e, como tal, forças elevadas são necessários na aresta de corte ou no plano de cisalhamento para gerar os cavacos. À medida que aumentam as forças na aresta de corte elevam-se as temperaturas, o que pode conduzir à deformação plástica e o desgaste por oxidação da aresta de corte.

Figura 4 - Efeitos na resistência dos materiais

Baixa usinabilidade		Dureza	Tenacidade	Resistência
Vida útil da ferramenta	Baixa			Alta
Temperatura de corte	Alta			
Expulsão de cavacos	Ruim		Alta	
Resistência ao corte	Alta		Alta	Alta
Acabamento superficial	Ruim			
Desgaste frontal	Alta	Alta		
Soldagem	Alta	Baixa		

Fonte: Adaptado de (Mitsubishi, 2006)

3.1.2.4 Maleabilidade

Refere-se a como é fácil para deformar ou enrolar um material da peça em particular.

Os materiais que têm elevada maleabilidade são geralmente materiais que são tenazes. Portanto, quando a peça usinada é tenaz, os cavacos gerados são difíceis de romper/quebrar. Isso resultará no alongamento dos cavacos. Quando isso acontece, os cavacos podem emaranhar-se em torno da ferramenta e/ou da peça usinada. Com isso, o acabamento da superfície usinada será arranhado e o acabamento da superfície irá deteriorar-se.

Outro ponto a ser lembrado é que os materiais maleáveis também são propensos a problemas de soldagem ou tecnicamente dizendo aresta postiça de corte, este também pode conduzir à deterioração do revestimento de superfície.

Figura 5 - Efeitos da maleabilidade

Baixa usinabilidade		Maleabilidade
Vida útil da ferramenta	Baixa	
Temperatura de corte	Alta	
Expulsão de cavacos	Ruim	Alta
Resistência ao corte	Alta	
Acabamento superficial	Ruim	Alta
Desgaste frontal	Alta	
Soldagem	Alta	

Fonte: Adaptado de (Mitsubishi, 2006)

3.1.2.5 Condutividade Térmica

A condutividade térmica se refere ao quão fácil ou quão difícil é para dissipar / irradiar calor. Portanto, se condutividade térmica é baixa, então o calor não é dissipado facilmente, ele não pode escapar, mas fica localizado em um lugar.

Quando da usinagem de peças que têm baixa condutividade térmica, o calor gerado na aresta de corte não é dissipado na peça usinada ou nos cavacos gerados, mas fica localizado e mantém-se em torno da aresta de corte.

Isto resulta em temperaturas extremamente elevadas na aresta de corte. Quando isso ocorre, a dureza do material da ferramenta é reduzida e aumenta o desgaste, podendo também sofrer deformações plásticas.

Figura 6 - Efeitos da condutividade térmica

	Maleabilidade	Condutividade térmica
Baixa usinabilidade		
Vida útil da ferramenta	Baixa	Baixa
Temperatura de corte	Alta	Baixa
Expulsão de cavacos	Ruim	Alta
Resistência ao corte	Alta	
Acabamento superficial	Ruim	Alta
Desgaste frontal	Alta	
Soldagem	Alta	

Fonte: Adaptado de (Mitsubishi, 2006)

3.1.2.6 Encruamento

Segundo Mitsubishi (2006), existe um ótimo exemplo sobre o que é encruamento: Uma régua de plástico incolor, ao se dobrar um número de vezes, o ponto na curva torna-se branca e dura, se continuar, em seguida, certamente vai quebrar. Este é um exemplo de encruamento.

Quando a usinagem de peças que tem a facilidade de endurecer durante a usinagem, a seção no ponto de usinagem e a área ao redor fica mais difícil de usinar. Esta camada dura vai esfregar e desgastar a aresta de corte. Além disso, se a taxa de avanço é muito baixa, também irá gerar uma camada endurecida que voltará a causar atrito e, eventualmente, desgastar a aresta de corte. Mesmo com grandes profundidades de corte, pode-se descobrir que na aresta

de corte o desgaste tipo entalhe se desenvolve, isso também pode levar a uma redução na vida da ferramenta.

Figura 7 - Efeitos do encruamento

		Maleabilidade	Condutividade térmica	Encruamento
Baixa usinabilidade				
Vida útil da ferramenta	Baixa		Baixa	Alto
Temperatura de corte	Alta		Baixa	
Expulsão de cavacos	Ruim	Alta		
Resistência ao corte	Alta			
Acabamento superficial	Ruim	Alta		
Desgaste frontal	Alta			
Soldagem	Alta			

Fonte: Adaptado de (Mitsubishi, 2006)

3.1.2.7 Partículas Duras

As partículas duras podem existir dentro da composição de um material da peça usinada, por exemplo as partículas de Si (silício) no alumínio. Se partículas sólidas estão presentes no material, em seguida, quando se usa as mesmas podem arranhar a superfície da aresta de corte. O tipo de padrão de desgaste seria parecido com o de um pente. Além disso, um aumento de desgaste de flanco, também pode ser visto como um resultado de partículas duras no interior da composição da peça usinada.

A partir desta se tem de analisar na usinagem as propriedades informadas na tabela como vida da ferramenta, temperatura de corte, cavaco, resistência, acabamento superficial e tempo de corte.

Figura 8 - Partículas duras

		Partículas duras
Baixa usinabilidade		
Vida útil da ferramenta	Baixa	% elevado
Temperatura de corte	Alta	
Expulsão de cavacos	Ruim	
Resistência ao corte	Alta	
Acabamento superficial	Ruim	
Desgaste frontal	Alta	
Soldagem	Alta	

Fonte: Adaptado de (Mitsubishi, 2006)

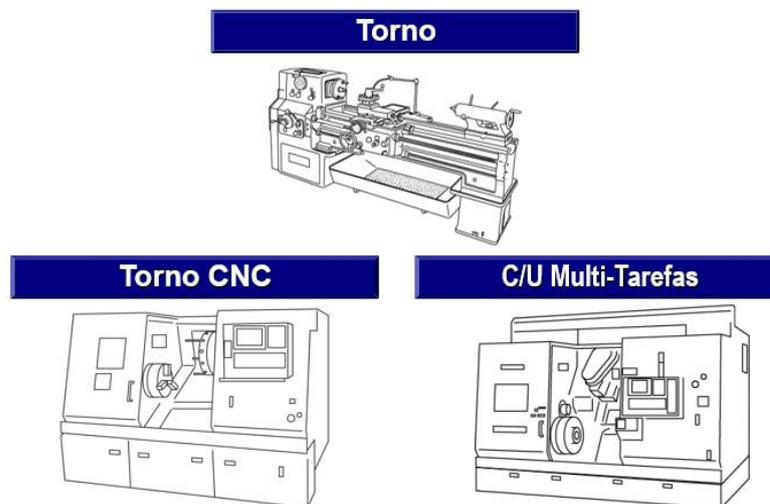
3.1.3 Torneamento

O torneamento é uma das operações mais antigas e tem como característica a rotação da peça e o deslocamento do ferramental. Para a fixação da peça no torno se utiliza placa com castanhas e para a fixação da ferramenta um castelo ou torre. A ferramenta de corte se movimenta com uma velocidade constante sobre a peça e com isso se obtém cilindros ou geometrias complexas (EDWARDS, 1993; apud MIRANDA, 2010).

Existem dois grupos de operações, o torneamento externo e o interno. Nestes dois grupos se tem as seguintes operações: torneamento externo/interno, faceamento, cópia, rosqueamento, corte e canal.

Devido a evolução e a tecnologia as máquinas vem sofrendo grandes mudanças e com isso o torno teve uma grande evolução mecânica e de tecnologia da informação, onde com isso se tem os tornos convencionais, tornos CNC's e centros de torneamento. Na Figura 9 se observa alguns tipos de tornos existentes.

Figura 9 - Tipos de Tornos



Fonte: Adaptado Mitsubishi (2006)

Os principais parâmetros no torneamento são: velocidade de corte, avanço e profundidade de corte (DAVIM, 2001).

A velocidade de corte é a velocidade com a qual o material das peças é removido pela aresta cortante da ferramenta. Este deslocamento da aresta cortante da ferramenta em direção à peça se expressa em m/min (metros por minuto). A velocidade de corte pode ser expressa pela Equação 1.

$$V_c = \frac{\pi \times D \times n}{1000} \quad (1)$$

Onde:

V_c = velocidade de corte (m/min)

π = constante cilíndrica

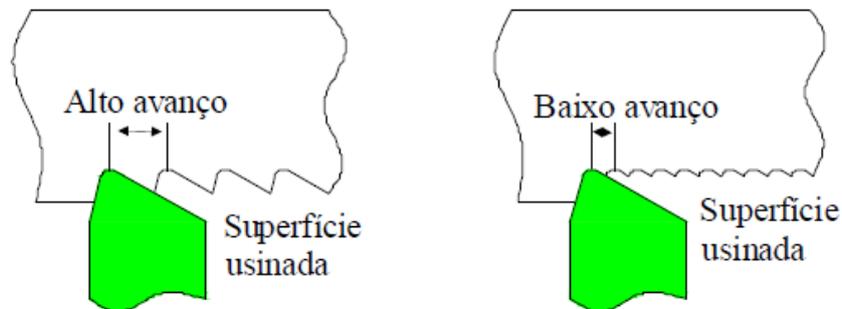
D = diâmetro da peça (mm)

n = rotação por minuto (rpm)

1000 = constante para transformar milímetros (mm) em metros (m).

O avanço é o deslocamento da ferramenta a cada rotação da peça. Este avanço por rotação se expressa em mm/rot (milímetros por rotação). O avanço deixa marcas na superfície da peça usinada e por este motivo o avanço é o primeiro parâmetro a ser selecionado influencia diretamente o acabamento da peça (THIELE e MELKOTE, 1999). Na Figura 10 a influência do avanço na peça usinada.

Figura 10 - Efeito do avanço na rugosidade superficial da peça usinada.



Fonte: Miranda (2010)

Quanto menor o avanço, melhor o acabamento superficial da peça, ou seja, menor a distância entre os picos. Logo, quando se aumenta o avanço, maior a distância entre os picos e pior o acabamento. A rigidez da máquina e da ferramenta são fatores limitadores principais que influenciam o avanço (EDWARDS, 1993).

O outro fator que influencia diretamente o torneamento é a profundidade de corte, que é o quanto a ferramenta de corte irá penetrar na peça. A profundidade de corte é expressa em milímetros (mm). Quanto menor a profundidade de corte, menor o esforço de corte e potência consumida na máquina, por este motivo, em operações de acabamento se retira pouco material para que haja um processo estável e um bom acabamento superficial. Contrapartida, quanto

maior a profundidade de corte, maior o esforço de corte e potência consumida na máquina, por sua vez, grandes profundidades de corte são utilizadas no desbaste, pois o mesmo não necessita de uma boa qualidade superficial na peça usinada.

3.1.4 Aço

Os aços são basicamente uma mistura de ferro e carbono, ou seja, uma liga. Em algumas ligas se utiliza elementos como silício, fósforo ou outros elementos dependendo da finalidade do aço a ser construído. De modo geral aço é uma liga de ferro e carbono, onde o carbono tem uma variação de 0,05% a 2% na composição (UNTERWEISER, 1982).

Ligas que venham conter teores de carbono superior a 2% são chamadas de ferro fundido. Com isso, para ser chamado de aço, a composição química deve conter uma quantidade inferior a 2% de carbono.

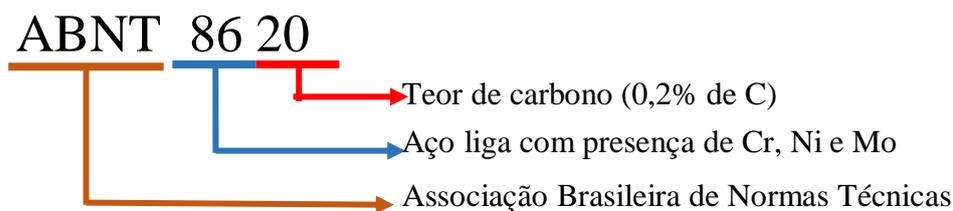
Existem diversas formas de classificar os aços que são por grupo, estrutura ou aplicação.

Para a padronização do material existem diversas normas técnicas para esta classificação que são: ABNT, ISO, ASM, ASTM, SAE, DIN, AISI, BS e AFNOR.

Segundo Ogata (2003), a norma mais utilizada no país é o sistema padronizado pela SAE e AISI, no qual se baseia a ABNT para classificação técnica. No sistema SAE/AISI os aços são informados por números, onde de modo geral os dois primeiros números informam o teor aproximado do elemento liga e os dois últimos informam o teor de carbono. Logo, para identificar o teor de carbono, se divide por 100 os dois últimos números para que se possa saber o teor.

A Figura 11 apresenta um exemplo utilizando um aço liga.

Figura 11 - Classificação do Aço



Fonte: Produção do Próprio Autor

O ABNT 8620 é uma liga utilizada em aplicações de cementação e carbonitratação. Por sua vez, o níquel existente na liga melhora algumas propriedades do material como tenacidade e ductilidade, já o cromo combinado com o molibdênio auxilia na resistência ao desgaste e no

aumento da camada endurecida por cementação. Esta liga sendo bem balanceada, tende a obter uma dureza elevada na camada da cementação e também uma ótima resistência ao desgaste, tendo em seu núcleo uma resistência aproximada de 860 MPa após o tratamento térmico. Esta composição tem ainda uma ótima usinabilidade (UNTERWEISER, 1982 e OGATA, 2003).

A liga ABNT 8620 tem diversas aplicações com elementos de máquina e peças da indústria automotiva como por exemplo na fabricação de engrenagens, pinos, buchas e peças onde há exigência de dureza superficial obtida pelo processo de cementação ou carbonitreção.

Segundo Unterweiser (1982), sua composição química média é apresentada abaixo, juntamente com suas características.

Quadro 2 – Quadro de características e composição química do SAE8620

SAE	Características						Composição Química %							
	Usinabilidade	Resistência Mecânica	Soldabilidade	Forjabilidade	Temperabilidade	Tenacidade	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Mo
										máx	máx.			
8620	BOM	MÉDIA	BOM	ÓTIMA	MÉDIA	BOM	0,18 0,23	0,15 0,35	0,70 0,90	0,04	0,04	0,40 0,70	0,40 0,60	0,15 0,25

Fonte: adaptado de (Gerdau, 2009)

Listado abaixo as propriedades médias do aço SAE8620 em seu estado recozido (UNTERWEISER, 1982).

Dureza Brinell – 149HB

Resistência a Tração – 540 MPa

Limite de Escoamento – 385 MPa

Alongamento Total – 30%

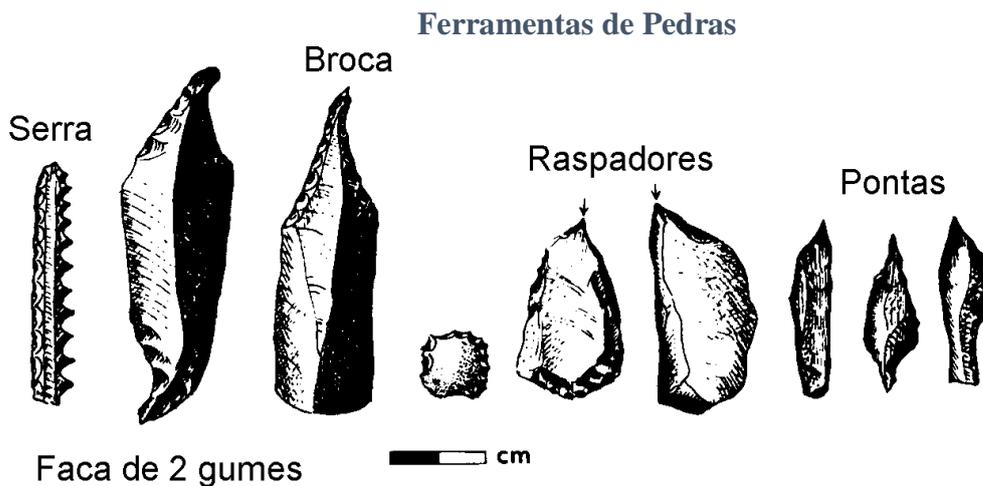
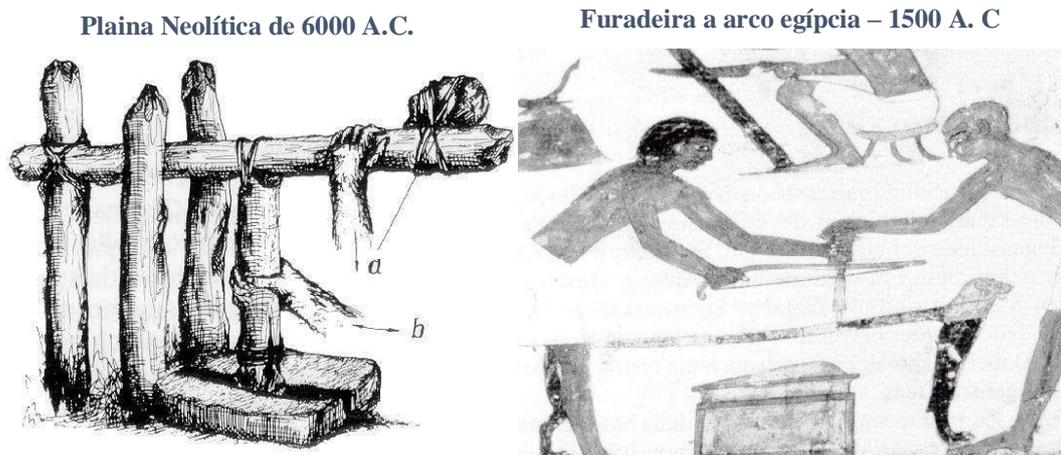
Condições de Fornecimento – Fornecimento com dureza máxima de 260HB.

Aplicações – É utilizado em componentes mecânicos de uso como; pinos guia, anéis de engrenagem, colunas, cruzetas, catracas, capas, eixos, coroas, virabrequins, eixos comando, pinos, guia, pinhões, engrenagens em geral.

3.2 MATERIAIS PARA FERRAMENTAS DE CORTE

As primeiras ferramentas utilizadas eram simples pedras e pedaços de madeira. Com o passar do tempo, percebeu-se que, se essas pedras e pedaços de madeira fossem quebrados ou modelados se tornariam ferramentas mais eficientes. Como o material a ser cortado era mais duro, foi necessário encontrar uma ferramenta de corte que também fosse mais dura. Isto levou à substituição da pedra como ferramenta de corte para a utilização de bronze e ferro. A história do material a ser usinado e da ferramenta de corte é essa repetição: um material usinado mais duro era encontrado e o material da ferramenta de corte também precisava ser mais duro (SPUR, 1997).

Figura 12 - As primeiras ferramentas de corte criadas pelo homem



Fonte: adaptado de (Spur, 1997)

Segundo Mitsubishi (2007), os primeiros metais a serem utilizados como ferramentas de corte foram o cobre e o ouro. No entanto, foi somente após a invenção de uma técnica de obtenção de metal a partir do minério utilizando o aquecimento e uma técnica para refinar o cobre derretido que se começou a realmente utilizar os metais para ferramentas de corte. Entretanto, enquanto o cobre era derretido em baixas temperaturas e fácil de modelar, tinha o problema de ser muito mole. Para compensar esta desvantagem, foi introduzida uma liga de estanho e cobre, então o bronze foi desenvolvido. O bronze, com a vantagem de ser mais duro do que o cobre, tornou-se amplamente utilizado em ferramentas de corte. Após algum tempo, o processo de refinamento do ferro foi desenvolvido, então, houve uma rápida mudança da utilização do bronze para a utilização do ferro como ferramenta de corte.

Desde 1898 quando as ferramentas de HSS (High Speed Steel) ou de Aço Rápido (em português) foram colocadas no mercado, diversas empresas passaram a estudar novos materiais para ferramentas de usinagem. Na década de 1920 um cientista alemão, Dr. Schroter, desenvolveu o “metal duro” (WC e Co) que por ventura era um novo material para ferramentas de corte muito mais duro que o aço rápido.

Segundo Esteves (2011), a partir da descoberta, em 1926 uma empresa alemã chamada Friedlich Krupp iniciou a comercialização deste material com o nome de Widia “Wie diamant” (tão duro quanto o diamante). Enquanto isso, em 1928 uma empresa americana chamada General Electric (GE) iniciou a comercialização deste material com o nome de “Carboly”. Nesta mesma década, empresas japonesas estudavam e buscavam desenvolver um produto similar ou melhor.

As pesquisas para novas ferramentas não pararam e com isso ao longo dos anos vieram os revestimentos, o Cermet, o PCD, o CBN e o diamante sinterizado (MACHADO; SILVA, 2004)

Figura 13 - História do desenvolvimento da ferramenta

	1898	1923	1926	1928	1947	1960	1969	1970	1972	1975	1980
Ferro	Aço rápido (HSS)	Metal duro	Friedrich Krupp, na Alemanha, lançou com sucesso produtos de metal duro	General Electric (GE) nos E.U.A., lançou com sucesso produtos de metal duro	Cerâmica (com base Al_2O_3)	Cermet (com base TiC)	Cerâmica (com base Al_2O_3 -TiC) Metal duro com cobertura (TiC- Al_2O_3 , multi-camadas)	Aço rápido sinterizado (HSS) Cermet (com base TiC-TiN)	CBN Sinterizado	Diamante sinterizado	Cerâmica (com base Si_3N_4) (com base Al_2O_3 -TiC)

Fonte: Adaptado de (Mitsubishi, 2007)

Mesmo sendo da década de 20, o metal duro é a ferramenta mais utilizada no mundo juntamente com o aço rápido que data de um século anterior.

3.2.1 Metal Duro

O metal duro surgiu na década de 1920, na Alemanha, quando Schroter produziu em laboratório, pela primeira vez, o WC em pó. A mistura desse pó, principalmente com o Co também em pó, trouxe para o mercado o grupo de materiais de ferramentas de corte denominadas de metais duro. Quando os alemães perceberam as excelentes propriedades de dureza e resistência ao desgaste, logo o batizaram como Widia de (*Wie diamant*, como diamante). Esse foi o segundo marco na evolução dos materiais para ferramentas de corte, após o aço rápido (SANTOS; SALES, 2007)

O metal duro possui uma combinação de resistência ao desgaste, resistência mecânica e tenacidade em altos níveis (SANTOS; SALES, 2007), fabricados pela metalurgia do pó, utilizam partículas duras de carbeto de metais refratários finamente divididos, sinterizados com um ou mais elemento do grupo do ferro (ferro, níquel ou cobalto), formando um corpo de alta dureza e resistência à compressão. O aglomerante é, na maioria das vezes, o cobalto. Uma característica importante é o tamanho de grão das partículas duras. Partículas grandes produzem maior tenacidade, enquanto as pequenas auxiliam na obtenção de um metal duro, mais duro e resistente.

A primeira ferramenta de metal duro, desenvolvida na Alemanha, era composta apenas por WC+Co e mostrou-se prodigiosa na usinagem de ferros fundidos cinzentos, mas demonstrou baixa resistência à craterização para aços (MACHADO; DA SILVA, 1999). Para que este problema fosse evitado, foi adicionado TiC, TaC e/ou NbC aos WC+Co, com isso reduzindo então a craterização na usinagem dos aços como consequência. Segundo Santos e Sales (2007) as razões para isso foram:

- O carbeto adicionado (titânio, tântalo e/ou nióbio) tem durezas maiores que o WC, apresentando maiores resistências ao desgaste;
- A solubilidade dos carbeto adicionados no ferro é muito menor que o WC, inibindo a difusão, um mecanismo de desgaste comum a altas temperaturas;
- A estabilidade dos carbeto adicionados é maior que os WC. Isto implica em grandes dificuldades de dissolução e difusão desses elementos.

No início dos anos 2000, surgiram comercialmente os pós micrométricos, proporcionando a fabricação do metal duro com micro grão. Essa ferramenta ganhou dureza, sem comprometimento da tenacidade, com ligeira queda na condutividade térmica. Com isso, a resistência foi melhorada e, sem dúvida, os parâmetros de corte utilizados no processo puderam ser aumentados (SANTOS; SALES, 2007)

A ISO classificou as ferramentas de metal duro em classes P, M, K, N, H e S, isso de acordo com o material da peça a ser usinada:

Classe P: aços; **Classe M:** aços inoxidáveis; **Classe K:** ferro fundido; **Classe N:** alumínio; **Classe H:** aços endurecidos; **Classe S:** superligas.

Figura 14 - Classificação das ferramentas de metal duro conforme Norma ISO 513 (2004)

Principais classes			Classes de aplicação			
Letra de identificação	Cor de identificação	Materiais a serem usinados	Metais duros			
P	Azul	Aços: Todos os tipos de aços e aços fundidos, exceto aços inoxidáveis com estrutura austenítica	P01	P05	↑ a	↓ b
			P10	P15		
			P20	P25		
			P30	P35		
			P40	P45		
			P50			
M	Amarelo	Aço Inoxidável: aço inoxidável austenítico e aço duplex (austenítico/ferrítico) e aço fundido	M01	M05	↑ a	↓ b
			M10	M15		
			M20	M25		
			M30	M35		
			M40			
K	Vermelho	Ferro fundido: Ferro fundido cinzento, ferro fundido com grafita esferoidal, ferro fundido maleável	K01	K05	↑ a	↓ b
			K10	K15		
			K20	K25		
			K30	K35		
			K40			
N	Verde	Metais não ferrosos: Alumínio e outros metais não ferrosos, materiais não metálicos	N01	N05	↑ a	↓ b
			N10	N15		
			N20	N25		
			N30			
S	Marrom	Superligas e titânio: Ligas especiais resistentes ao calor à base de ferro, níquel e cobalto, titânio e ligas de titânio	S01	S05	↑ a	↓ b
			S10	S15		
			S20	S25		
			S30			
H	Cinza	Materiais duros: Aços endurecidos, ferros fundidos endurecidos, ferros fundidos resfriados	H01	H05	↑ a	↓ b
			H10	H15		
			H20	H25		
			H30			

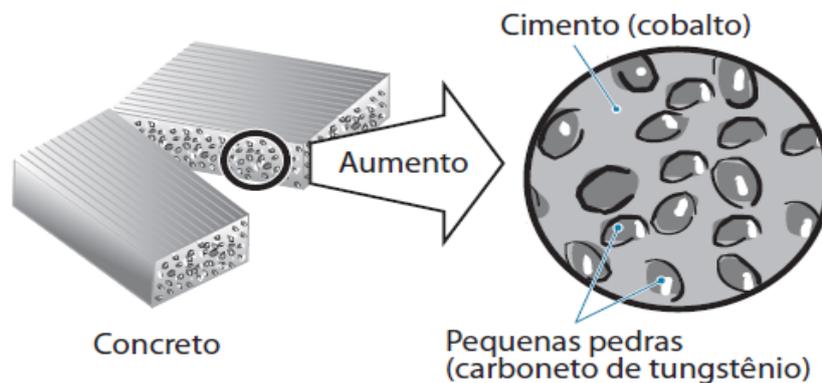
a – Aumento da velocidade de corte, aumento da resistência ao desgaste do material da ferramenta.
b – Aumento do avanço, aumento da tenacidade do material da ferramenta.

Fonte: adaptado de (Souza, 2011)

3.2.1.1 Processo de Fabricação do Metal Duro

O metal duro é um material que possui todas as propriedades necessárias para ferramentas de corte, incluindo dureza e resistência. O metal duro é feito com carbeto de tungstênio em pó (WC), mistura de cobalto (Co) em pó como um elemento de liga e sinterizando a mistura. Pode ser comparado ao concreto. Pequenas pedras (carbeto de tungstênio) são envolvidas por cimento (cobalto). O metal duro, quando sinterizado, terá, aproximadamente, duas vezes mais peso específico e metade do volume, como antes do processo de sinterização. O metal duro sinterizado é afiado por uma ferramenta de afiação de diamante e pode, então, ser utilizado como uma ferramenta de corte (ESTEVEVES, 2011).

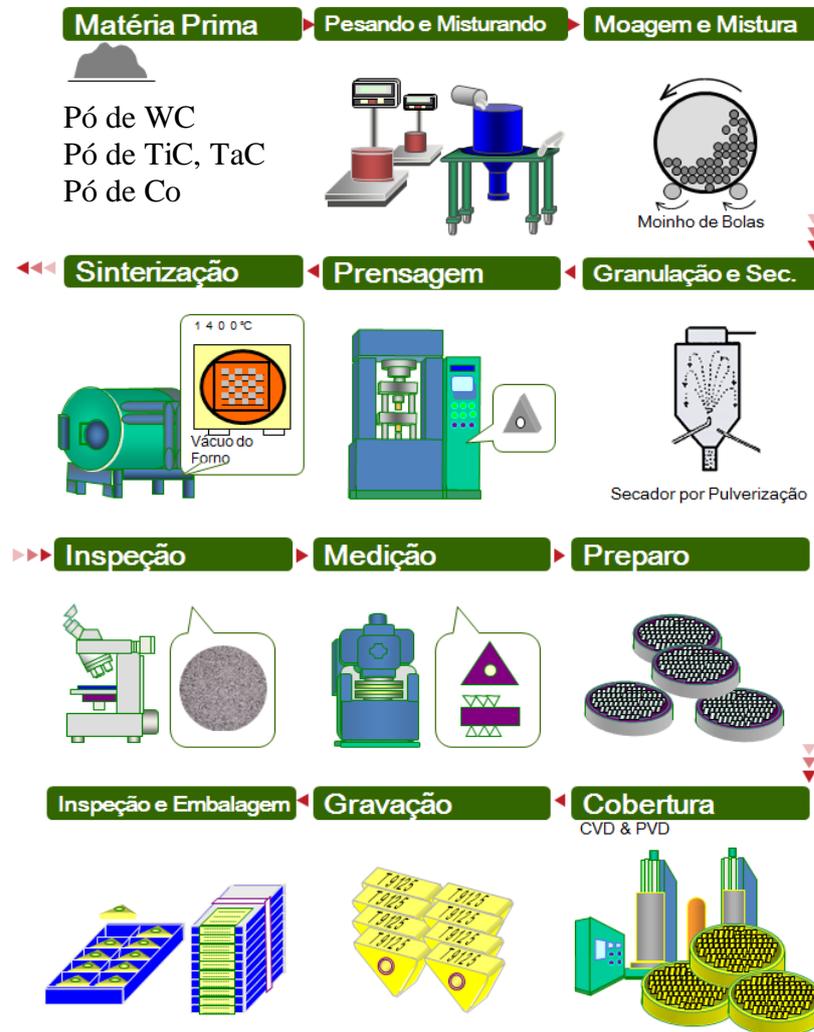
Figura 15 - Comparação do metal duro com a composição do concreto



Fonte: Adaptado de (Mitsubishi, 2006)

Na Figura 16 é demonstrado o processo de fabricação do metal duro.

Figura 16 - Processo de fabricação



Fonte: adaptado de (Tungaloy, 2013)

Segundo a Sandvik (2006), o processo passo a passo fica da seguinte forma:

Fabricação do Pó:

a) Os principais passos na preparação do pó de metal duro pronto para prensagem são:

- Pesagem dos diferentes tipos de matéria-prima
- Mistura e moagem em proporções e tamanhos de grãos adequados Secagem por *spray* para o pó acabado
- Identificação e estoque antes da prensagem

b) Os diferentes tipos de matéria-prima são entregues à fábrica. Dependendo da classe, são usadas diferentes misturas e compostos. As principais matérias-primas normalmente são:

- Carbeto de Tungstênio (WC)
- Carbeto de Titânio e carbeto de Tungstênio (Ti, W) C
- Cobalto
- Carbeto de Tântalo e carbeto de Nióbio (Ta, Nb) C
- Polietilenoglicol (fase aglomerante, cera)

c) O pó, nas proporções adequadas para a classe final, é transportado para a moagem. O pó é misturado com etanol e moído por horas até que o tamanho de grão específico seja obtido. A mistura é movida em um recipiente de coleta especial. A mistura do lote é então transportada para a secagem por *spray*.

d) Após a moagem, o líquido de moagem (etanol) deve ser separado do pó. Isso é feito bombeando-se a polpa para um funil para secagem por *spray*. O álcool é evaporado e se formam pequenos aglomerados que caem para o fundo. O pó misturado é passado através de um resfriador e coletado em *containers*.

e) O pó de metal duro acabado e pronto para prensagem é colocado em baldes, identificado e estocado. Aproximadamente 30 diferentes misturas de pó de metal duro são estocadas, dependendo das proporções da classe com relação à resistência ao desgaste e tenacidade.

Prensagem:

a) O método para fabricar as ferramentas de prensagem é um complicado processo integrado aos sistemas CAD, onde as pastilhas são desenhadas para ferramentas de prensagem. Essas ferramentas consistem de uma matriz para prensagem, um punção superior um outro inferior e um pino central para pastilhas com furo central.

b) A matriz é preenchida com pó de meta duro já misturado. O pó é prensado junto entre os punções superior e inferior. Com várias toneladas de pressão, as pastilhas são

compactadas para respectiva geometria. Antes da sinterização, as pastilhas prensadas são muito sensíveis e macias com giz.

c) Antes da sinterização, as pastilhas prensadas possuem o dobro do tamanho de seu respectivo tamanho final. As pastilhas contraem 50% em volume e 20% em peso no processo de sinterização. As pastilhas prensadas são medidas em peso e altura. As trincas superficiais também são verificadas.

Sinterização:

a) Os passos principais no processo de sinterização:

- As pastilhas prensadas são colocadas em pratos de grafite
- O processo de sinterização leva por volta de 12 horas com uma temperatura de aproximadamente 1500°C
- Processamento de dados, controle ocular e medição

b) As pastilhas são colocadas em pratos de grafite. Dependendo da classe e do tamanho das pastilhas, os pratos são preparados para o seu respectivo processo de sinterização. A sinterização é um processo de tratamento térmico no qual os poros são fechados, ocorrendo a cementação entre o aglomerante e os carbetos (partículas duras), aumentando também a resistência.

c) Dependendo da classe, diferentes processos são desenvolvidos. Se a temperatura estiver desviando, diferentes tipos de passos de sinterização são usados, bem como fornecimento de diferentes gases e pressões, além de métodos de refrigeração. As pastilhas agora alcançaram grande tenacidade e resistência ao desgaste. As pastilhas contraíram-se para o seu respectivo tamanho final, ou seja, aproximadamente 50% em volume.

d) O processo é estritamente controlado por um moderno sistema computadorizado. O menor desvio no processo dará um alarme aos operadores. É feito um controle ocular das pastilhas após o processo de sinterização. É feita também a medição de certos parâmetros antes das pastilhas deixarem o departamento de sinterização.

Retificação:

a) Muitas pastilhas são retificadas ou lapidadas (desbastadas) em qualquer formato.

As principais operações de retifica são:

- Lapidação na superfície superior e/ou inferior
- Retificação na periferia
- Retificação de chanfros e fases negativas
- Retificação de perfis (pastilhas para rosqueamento)
- Retificação de perfis/formatos especiais

b) Retificação completa das laterais, raios e chanfros são feitos em modernas máquinas de cinco eixos. Cada pastilha é fixada automaticamente e passa pela retifica o número de vezes igual ao número de chanfros a ser retificado. As dimensões são controladas por instrumentos especiais.

c) Modernos robôs manuseiam o fornecimento e carregamento de máquinas com pastilhas sem retificação acabadas para a fábrica. Após as operações de retificação, as pastilhas são transportadas para a próxima fase de produção: tratamento de aresta.

Tratamento da Aresta:

a) O tratamento de aresta é realizado em quase todas as pastilhas. Através dessa operação, a aresta de corte é arredondada e reforçada. A vida da ferramenta depende fortemente do formato da aresta. Diferentes métodos vêm sendo usados. O tamanho da parte arredondada da aresta é de aproximadamente 0,02 – 0,08 mm (0,007 – 0,003 polegadas).

b) Um método comum para o tratamento da aresta é o escovamento. Outros métodos são o jateamento seco e úmido da mesma. Dependendo do tipo, geometria, classe, raio de canto e tamanho da pastilha, o arredondamento da aresta é ajustado de acordo. As pastilhas para acabamento possuem um tratamento de aresta menor, comparado as pastilhas para desbaste.

Cobertura:

a) As pastilhas de metal duro com cobertura são fabricadas colocando-se camadas sobre as mesmas, principalmente através do método de Deposição Química de Vapores (CVD

Chemical Vapour Deposition). Basicamente, a cobertura pelo processo CVD é feita através de reações químicas de diferentes gases. Outro método é a Deposição Física de Vapores (PVD Physical Vapour Deposition) que é feita com uma temperatura de aproximadamente metade (500° C) daquela usada no CVD (1000°C).

b) Tanto a cobertura única quanto a multicamada, são feitas através de processo químico com uma temperatura de aproximadamente 1000°C. Para ambos os tipos de cobertura várias substâncias, que reagem quimicamente umas com as outras para formar outros componentes, são injetadas dentro de um forno. As pastilhas a receberem a cobertura são colocadas dentro desse forno. Durante todo o ciclo de cobertura há uma subpressão no forno.

c) O processo leva aproximadamente de oito a dezesseis horas dependendo da classe. A espessura das coberturas em pastilhas intercambiáveis varia entre 2 a 12 micrometros (um fio de cabelo tem em média o diâmetro de 58 micrometros). O carbonitreto de titânio é normalmente usado como primeira camada [Ti(CN)]. A cobertura de óxido de alumínio, Al_2O_3 , também é geralmente usada. Uma camada fina de nitreto de titânio, (TiN), na superfície da pastilha proporciona a cor dourada.

d) O processo de cobertura é rigorosamente controlado por um moderno sistema computadorizado. Durante o processo de cobertura, a quantidade de gás, a temperatura e a pressão, para controle da qualidade é de extrema importância. A combinação do substrato otimizado e o processo CVD/PVD desenvolvido resulta na atual geração de pastilhas de metal duro com cobertura para torneamento, fresamento e furação.

Gravação, Etiquetagem e Embalagem:

a) Atualmente, o controle ocular, gravação, etiquetagem e embalagem das pastilhas são feitos em máquinas completamente automatizadas. Robôs manuseiam as pastilhas, do carregamento nas máquinas até as prateleiras. O controle ocular do tamanho da pastilha, geometria e raio de canto também é feito por um sistema computadorizado, códigos de barra são usados desde o início da fabricação das pastilhas até o estoque.

b) A classe é marcada a *laser* ao invés de marcação a tinta. As embalagens de pastilhas são etiquetadas e lacradas por robôs. A etiqueta com dados de corte é adicionada por último, na superfície das embalagens.

3.3 REVESTIMENTOS

Os primeiros dados de revestimentos em ferramentas de corte para usinagem datam a partir da segunda metade da década de 1960, tendo como o primeiro fabricante a Sandvik.

A princípio estes revestimentos eram feitos em ferramentas de aço rápido (HSS) e posteriormente aplicadas em metal duro. Desde então os revestimentos em ferramentas de corte para usinagem veem evoluindo muito com novas técnicas e materiais.

Antes de se decidir pelo revestimento a ser utilizado na ferramenta, é necessária uma análise prévia dos processos disponíveis para a aplicação destes. A deposição de revestimentos tem como objetivo alterar as propriedades de uma superfície. Entre as características modificadas por meio de revestimentos pode-se destacar as propriedades ópticas, magnéticas, eletrônicas, químicas, resistência mecânica e resistência ao desgaste (HOGMARK et al., 2000).

Segundo Tatsch (2007), os revestimentos de filmes finos são formados pela condensação (solidificação) de átomos ou moléculas de um vapor sobre o substrato. O processo de condensação se inicia pela formação de pequenos aglomerados de material, denominados núcleos, espalhados aleatoriamente sobre a superfície do substrato. Forças de atração eletrostáticas são as responsáveis pela fixação dos átomos à superfície. O mecanismo de fixação é denominado adsorção química quando ocorre a transferência de elétrons entre o material do substrato e a partícula depositada e adsorção física se isto não ocorrer. A energia de ligação associada à adsorção química varia de 8eV a 10eV e a associada à adsorção física é de aproximadamente 0,25eV. Átomos migram sobre a superfície do substrato interagindo com outros átomos para formar os núcleos. O processo é denominado nucleação. À medida que mais átomos interagem os núcleos crescem. Quando os núcleos entram em contato uns com os outros ocorre a coalescência que resulta em estruturas maiores. Os filmes são formados por grãos monocristalinos dispostos em várias direções cristalográficas. O tamanho dos grãos depende das condições da deposição e dos tratamentos térmicos posteriores. Grãos maiores geralmente estão associados às temperaturas maiores de processamento. A rugosidade de um filme está relacionada com o tamanho dos grãos. Deposições em alta temperatura tendem a produzir filmes menos rugosos. A densidade de um filme pode dar informações sobre sua estrutura física; densidades menores que a da substância bruta indicam porosidade.

Atualmente dentre os processos de aplicação de revestimentos para ferramentas encontram-se a deposição química de vapor, conhecido como CVD (Chemical Vapour

Deposition), que ocorre por meio de reações químicas em temperaturas, em geral, entre 850 – 1050°C, e o processo de deposição física de vapor PVD (Physical Vapour Deposition) que ocorre por meio de vapores gerados no interior de fornos a baixa pressão com temperaturas, em geral, na faixa de 400 – 600°C (TRENT; WRIGHT, 2000).

Dentre as propriedades dos revestimentos, as principais são: estabilidade química, dureza a quente e boa adesividade com o substrato.

Dureza: o revestimento de dureza elevada, e que a mantêm a altas temperaturas, contribuem para o aumento da resistência ao desgaste, reduzindo a tendência de surgimento do desgaste abrasivo. A propensão de formação do desgaste de cratera, apesar de ocorrer em razão da reação triboquímica (difusão), também se torna menor quando se utiliza revestimentos de elevada dureza (SANTOS; SALES, 2007)

Microestrutura e morfologia: o tipo e os parâmetros do processo de deposição são determinantes para a formação da microestrutura (o tamanho, estrutura e contorno do grão). O revestimento TiN de granulometria fina, depositado por PVD, tem desempenho comparado ao TiN depositado pelo CVD, que possui maior dureza. Os revestimentos PVD têm maior densidade de discordância em sua estrutura cristalina, fato que, associado às tensões residuais de compressão, contribuem para a elevação da dureza (SANTOS; SALES, 2007)

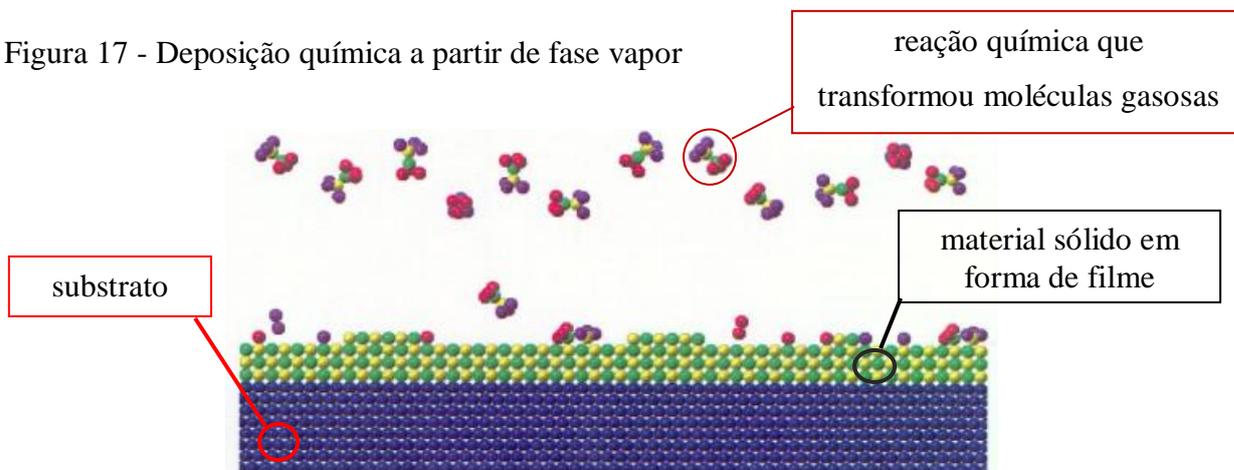
Adesividade: no processo CVD, a nucleação do revestimento se dá por interdifusão. O bombardeio de elétrons da deposição assistida por plasma gera defeitos na estrutura cristalina do substrato, o que favorece a difusão do material. Para a aplicação de revestimentos de diamante, a remoção do cobalto da superfície é fundamental para a boa adesividade. Para isso, faz-se um ataque e tratamento térmico da superfície antes da deposição (SANTOS; SALES, 2007)

Condutividade Térmica: a baixa condutividade térmica determinante para o bom comportamento dos revestimentos e as propriedades termoisolantes são delimitantes para o sucesso da usinagem a seco e a altas velocidades (SANTOS; SALES, 2007)

3.3.1 Processo CVD

CVD é uma sigla de *Chemical Vapor Deposition* ou deposição química a vapor, é um processo que há a formação de um revestimento através de uma reação química do elemento a ser depositado com o substrato. O material do revestimento pode vir de um gás, de uma mistura de gases ou pelo contato com sólidos como no processo de *pack-cementation*. Normalmente são três etapas de processamento e que estão envolvidas em qualquer reação CVD: a produção de um composto transportador volátil, o transporte do gás para o local de deposição sem a deposição do mesmo e a reação química necessária para produzir o revestimento sobre o substrato. As reações químicas usadas em CVD incluem decomposição térmica, redução, hidrólise, oxidação, carbonização e nitretação. Essas reações ocorrem isoladamente ou em conjunto, são controlados pela termodinâmica, cinética, transporte de massa, a química da reação e os parâmetros de processamento de temperatura, pressão e atividade química.

Figura 17 - Deposição química a partir de fase vapor



Fonte: adaptado de (Doi, 2009)

Tipicamente um processo CVD obedece às seguintes etapas (CAMPBELL, 1996):

- a) O transporte dos reagentes e diluentes, em fase gasosa, para a câmara de processos onde se encontra o substrato;
- b) A reação dos gases para a formação de moléculas e espécies ativas que farão parte do filme depositado;
- c) O transporte do reagente para a superfície da amostra;
- d) Ocorrência das reações químicas próximas ou na própria superfície do substrato;

- e) Dessorção dos subprodutos da reação química da superfície da amostra;
- f) Transporte dos subprodutos para longe da superfície da amostra;
- g) Remoção dos subprodutos da câmara de processo;

As reações químicas descritas acima não ocorrem de forma espontânea, sendo assim, para que ocorram é necessário fornecer algum tipo de energia ao sistema. Essa energia pode vir de diferentes meios como: energia térmica, fótons, elétrons, descargas elétricas, etc. Normalmente a energia utilizada é a energia térmica (ROCHA, 2007).

Existem dois tipos de reações químicas conhecidas em um processo CVD.

1) **Reações Homogêneas:** são reações que ocorrem ainda em fase gasosa, ou seja, as espécies ativas que irão compor o filme adquirem sua estrutura química final antes de chegar à superfície do substrato (reações que ocorrem geralmente próximas à superfície do substrato), segundo ROCHA (2007);

2) **Reações Heterogêneas:** são reações onde as espécies ativas concluem a reação química a partir do momento em que alcançam um sítio ativo na superfície do substrato (ROCHA, 2007).

Para revestimentos em metal duro o CVD apresenta três variantes mais comuns: o CVD a altas temperaturas (HTCVD), o CVD a médias temperaturas (MTCVD) e a deposição CVD assistida por plasma (PACVD).

O processo HTCVD é normalmente feito acima de 1000°C e é geralmente utilizado para deposição de revestimentos em Al_2O_3 .

O processo MTCVD é feito a partir da acetonitrila (CH_3CN) entre 750 e 900°C.

No PACVD ou PECVD (Plasma *Enhanced* CVD) ocorre entre 600 e 900°C e utiliza uma descarga pulsada para catalisar a reação.

As elevadas faixas de temperatura no processo CVD são responsáveis pela formação da camada “*eta*”, ou seja, Co_3W_3C na interface substrato/revestimento com espessura aproximadamente igual à camada de revestimento. Neste caso a falha da ferramenta ocorre devido à fragilidade dessa camada (HUNT; SANTHANAM, 1990). Sendo assim, por este motivo o processo não é recomendado para aços rápidos.

Usando o CVD de plasma a baixa temperatura, a reação do revestimento permite produzir substratos com baixos pontos de fusão ou que poderiam sofrer transformações em

estado sólido em toda a gama de temperaturas de deposição. Além disso, a baixa temperatura de deposição de revestimentos CVD de plasma limita as tensões devido à expansão térmica, que pode levar a fissuras e descamação do revestimento.

Os revestimentos CVD são formados por combinações de TiC, TiCN, TiN, Al_2O_3 , e ocasionalmente por HfN, com espessura total próxima a $10\mu\text{m}$ (SANTOS; SALES, 2007), em alguns casos chegam a ser maiores.

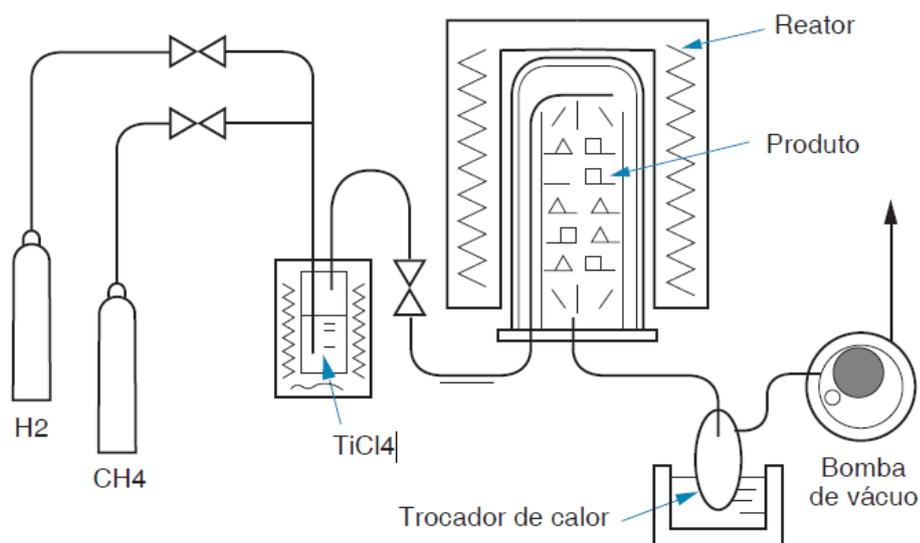
3.3.1.1 Os processos HTCVD e MTCVD

Estes são processos em que o gás sofre uma reação dentro de uma câmara em alta temperatura. Esta reação química resulta na adição de uma pequena camada de partículas endurecidas à superfície do substrato de metal duro.

Estes processos têm como características:

- 1) Temperatura do reator por volta de 900°C - 1100°C . (1650°F - 2010°F);
- 2) Revestimento com alta tenacidade;
- 3) Possibilidade de revestir um grande lote ao mesmo tempo;
- 4) Revestimento de TiN e Al_2O_3 são possíveis. O que é preciso fazer é mudar o gás da reação.

Figura 18 - Processo CVD por gás



Fonte: Mitsubishi (2007)

A reação acontece segundo a seguinte sequência de eventos:

- 1) Evaporação e transporte dos precursores na região do gás de arraste do reator;
- 2) Os reagentes (precursor) em fase gasosa entram no reator com um fluxo forçado de um gás;
- 3) Difusão dos gases através da zona de reação, produzindo intermediários reativos e coprodutos gasosos;
- 4) Gases entram em contato com a superfície do substrato;
- 5) Acontecem as reações de deposição na superfície do substrato com crescimento de sítios ou ilhas de átomos após a nucleação, levando a formação de um filme;
- 6) Os coprodutos gasosos da reação são desorvidos e saem da zona de reação da superfície, através da camada limite.

A taxa de deposição depende das reações de superfície que são a etapa mais lenta do processo. A estrutura e características do filme formado é resultado dessa taxa de crescimento do filme.

O processo químico aplicado acima segue a Equação (1)



Os processos HTCVD e MTCVD são muito parecidos, mas o que os diferencia é a temperatura de operação. Esta temperatura por sua vez implica em algumas diferenças entre eles.

É muito comum no ramo de ferramentas de corte, os fabricantes utilizarem o MTCVD, pois existe uma busca implacável para se reduzir trincas térmicas que são geradas pela deposição, quando se utilizar o MTCVD estas trincas por sua vez aparecem em menor quantidade.

3.3.1.2 Diferenças entre HTCVD e MTCVD

Segundo Stoeterau (2004), as diferenças entre HTCVD e MTCVD são:

HTCVD (Alta temperatura – acima de 1000 °C)

→ Revestimento da maioria das ferramentas de metal duro

- Alta força de aderência ao substrato
- Confere a ferramenta alta resistência ao desgaste
- Diminui a tenacidade do substrato
- Risco de formação de fases frágeis na interface

MTCVD (Media temperatura 750°C 900°C)

- Aplicação de Ti(C,N) de várias formas
- Vantagens em relação ao HTCVD:

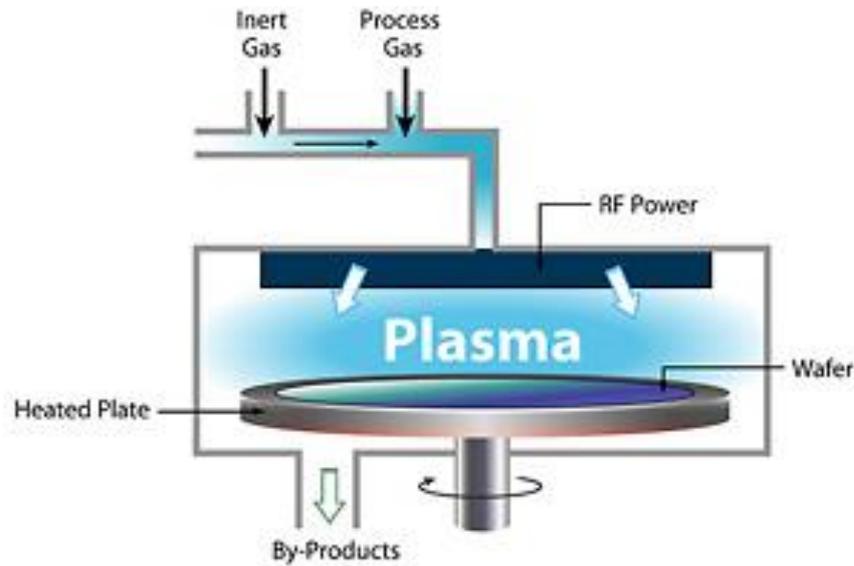
- a) Menor solitação térmica para os mesmos modos de agregação;
- b) Diminui o risco de descarbonetação formação de fases frágeis do substrato;
- c) Ocorrem menos trincas nas ferramentas e a velocidade de formação de crateras é menor.

3.3.1.3 O processo PACVD

No processo PACVD utiliza-se um gás de argônio ionizado em conjunto, por exemplo, com $\text{TiCl}_4/\text{CH}_4/\text{N}_2/\text{H}_2$ com descarga pulsada e com objetivo de catalisar a reação. O processo PACVD trabalha com baixas temperaturas de deposição, boa uniformidade na espessura do revestimento sem a necessidade de rotacionar a ferramenta durante o processo de deposição do material e alta taxa de deposição de material. Neste processo consegue-se até mesmo temperaturas na faixa de 400°C – 500°C, adequando para revestimento em ferramentas de aço rápido (SJOSTRAND; THELIN, 1986).

O PACVD pode operar com temperaturas mais baixas devido à energia fornecida às moléculas pelo plasma do reator. Entretanto, a qualidade do filme é inferior à dos processos conduzidos a temperaturas mais altas (ROCHA, 2007).

Figura 19 - Plasmas *Enhanced* CVD System



Fonte: *Dow Corning* (2014)

A reação acontece segundo a seguinte sequência de eventos:

- 1) Entrada dos gases inertes e de processo;
- 2) Encontro com a RF Power (Força de Rádio Frequência);
- 3) Geração de um plasma.
- 4) O substrato encontra-se em uma placa aquecida, com água e giratória (neste exemplo);
- 5) Saída dos subprodutos.

O PACVD usa energia elétrica para gerar uma descarga luminescente (plasma), em que a energia é transferida para uma mistura de gases. Assim, transforma-se a mistura de gases para os radicais reativos, íons, átomos neutros e moléculas, e outras espécies altamente excitadas. Estes átomos e fragmentos de moléculas interagem com o substrato e dependendo da natureza desses processos de interação, erosão ou deposição ocorrem no substrato. Uma vez que a formação das espécies reativas e energéticas na fase gasosa ocorre por colisão, o substrato pode ser mantido a uma temperatura baixa, e assim, a formação do filme pode ocorrer em substratos a uma temperatura mais baixa do que é possível no processo CVD convencional, o que é uma grande vantagem do PACVD (ROCHA, 2007).

Algumas das propriedades desejáveis de películas PACVD são:

- a) Uma boa aderência;
- b) Baixa densidade;
- c) Uma boa cobertura;
- d) Uniformidade.

3.3.1.4 Características do processo de revestimento CVD

A Classe da ferramenta e as propriedades estão intimamente relacionadas, no entanto, o desempenho global na usinagem se baseia numa combinação de várias propriedades.

E, como tal, só porque o próprio revestimento oferece alta dureza, resistência ao desgaste elevado e altas propriedades de calor, isso não significa que ele terá um bom desempenho na usinagem.

O revestimento, bem como o material utilizado para o substrato são combinados e juntos irão resultar em uma classe de ferramenta.

No Quadro 3 e na Figura 20 são mostradas as propriedades dos materiais de partículas duras que formam as camadas de revestimento.

Quadro 3 - Propriedade do metal duro

	Dureza	Energia de Formação Livre	Condutividade Térmica ^{*3}	Coefficiente de Choque Térmico ^{*1}	Propriedade de Oxidação ^{*2}	Solubilidade no Fe
	Resistência ao Desgaste do Flanco	Resistência ao Desgaste de Craterização	Deformação Plástica e Resistência à Fadiga Térmica	Resistência ao Choque Térmico	Resistência ao Entalhe	Resistência à Soldagem
	(HV)	(J / g ³ Pa)	(W / mK)	-	(°C)	(%)
WC	1780	-0,4	121	268	500	7
TiC	3200	-1,2	24	19	1100	< 0,5
TiN	2050	-2,0	19	-	1200	0
Al ₂ O ₃	2100	-4,0	29	-	Estável	0

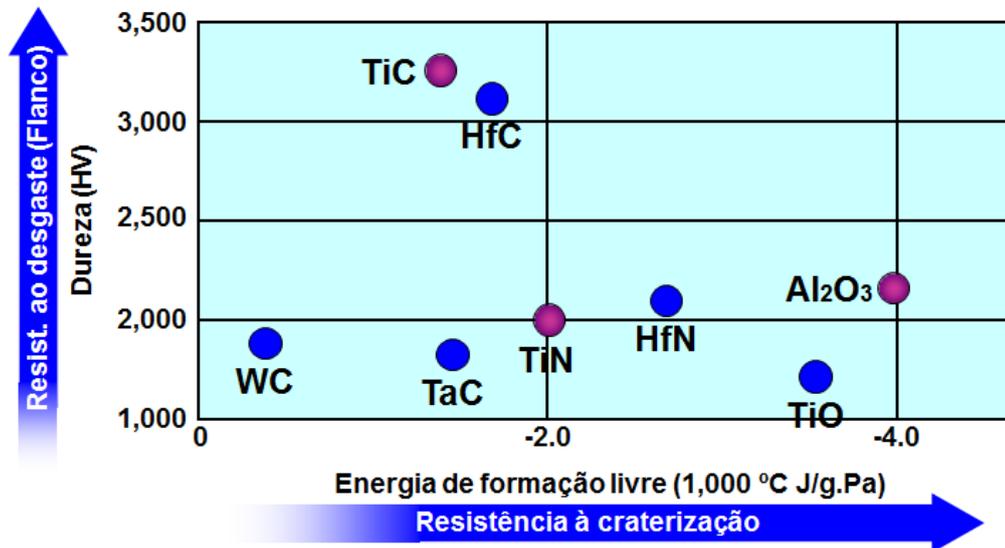
Fonte: Adaptado de (Mitsubishi, 2006)

*1 = Impacto térmico => (condutividade térmica X resistência à tração) / (coeficiente de expansão x módulo de Young);

*2 = A temperatura máxima apresentada para a resistência à oxidação;

*3 = Temperatura ambiente.

Figura 20 - Propriedades do metal duro



Fonte: Adaptado de (Mitsubishi, 2006)

Segundo Mitsubishi (2006) as propriedades do metal duro revestido com CVD são definidas das seguintes formas:

Dureza – Resistência ao Desgaste do Flanco

O desgaste do flanco é causado mecanicamente por fricção e é principalmente influenciado pela dureza do material da ferramenta. No revestimento, a camada de TiC é mais dura e oferece uma elevada resistência ao desgaste no flanco. Além disso, através da aplicação de uma camada de revestimento mais espessa, é possível retardar o desenvolvimento do desgaste e por sua vez aumentar a vida da ferramenta. No entanto, existe uma casca preta como camada de revestimento que se torna mais espessa a estruturação do grão, torna-se áspera e isto pode resultar na formação de micro lascas, levando a desgaste por quebra (este fenômeno é a camada chamada “*eta*”). Para superar este problema, a utilização de carbonitreto de titânio (TiCN) como um material de revestimento resistente, tornou-se amplamente utilizada.

Energia de Formação Livre – Resistência ao Desgaste de Craterização

Durante a usinagem, o desenvolvimento de lascas devido ao esfregamento e/ou deslizamento ao longo da superfície de corte, está submetida a uma elevada pressão e condições de temperatura. Sob estas condições, uma reação química pode ocorrer entre a peça e o revestimento, o que se torna necessário para a camada de revestimento, ter uma estabilidade térmica, mesmo sob condições de alta temperatura. O termo que define a estabilidade térmica é a Formação de Energia Livre. À medida que o valor negativo se torna maior oferece uma maior estabilidade. Óxido de Alumínio (Al_2O_3) é a mais estável.

Condutividade Térmica – Deformação Plástica e Resistência à Fadiga Térmica

Materiais que têm um baixo coeficiente térmico não podem emitir energia de forma eficaz e faz com que o calor passe a ficar reunido em torno da aresta de corte. Quando isso ocorre, pode resultar na aresta de corte uma formação pastosa, conduzindo assim a deformação plástica da aresta. O Coeficiente de Impacto Térmico pode ser encontrado utilizando a fórmula a seguir.

Figura 21 - Equação do Coeficiente Térmico

$$\text{Coeficiente de Impacto Térmico} = \frac{\text{Condutividade Térmica} \times \text{Resistência à Tração}}{\text{Coeficiente de Expansão} \times \text{Módulo de Young}}$$

Fonte: Adaptado de (Mitsubishi, 2006)

Como mostrado no Quadro 3, que o TiC tem um coeficiente de impacto térmico muito mais baixa do que o WC.

Propriedade de Oxidação – Resistência ao Desgaste Tipo Entalhe

Desgaste tipo entalhe é uma forma de desgaste que aparece no limite da aresta de corte, o desgaste tipo entalhe também ocorre no mesmo ponto na usinagem de uma superfície escalonada ou em materiais de trabalho que facilmente tendem a endurecer. Além disso, se a ferramenta é revestida em seguida existe uma possibilidade de que a camada de revestimento venha a sofrer um lascamento e estilhaçamento. Quando isto ocorre, a camada TiC será exposta. A camada de TiC tem pouca resistência a oxidação e desgaste tipo entalhe, com isso

irá progredir rapidamente. Como o desgaste tipo entalhe, a superfície da peça (material de trabalho) irá deteriorar-se.

Solubilidade no Fe – Resistência à Soldagem

Tanto quanto os 7% de WC se dissolve em Ferro (Fe) com 1250°C, enquanto, que menos de 0,5% de TiC dissolve em Ferro, à mesma temperatura. Isto mostra que TiC provavelmente reagirá menos com a peça (materiais de trabalho) em alta temperatura na aresta de corte.

3.3.1.5 Características dos Materiais do Revestimento CVD

As principais características das camadas de revestimentos são:

Nitreto de titânio (TiN): é quimicamente mais estável que o TiC, isto é, possui menor tendência de difusão em aços. Porém é mais susceptível ao desgaste abrasivo. Sua dureza é de 2.300 HV 0,05. É um dos revestimentos mais utilizados. Sua utilização é recomendada para materiais mais dúcteis, tais como aços de baixo carbono e alumínio, observando, baixas forças de corte (KANZLER, 2009).

Carbeto de titânio (TiC): a característica mais marcante do TiC em relação ao TiN é a dureza mais elevada, o que lhe confere uma maior resistência à abrasão. Possui um baixo coeficiente de dilatação térmica, característica importante em processos como o fresamento (KANZLER, 2009).

Carbonitreto de titânio (TiCN): é derivado do TiN, onde parte dos átomos de N é substituídos por C durante a deposição. Possui uma elevada dureza (3.000 HV 0,05). Aplicável em situações de forças de corte médias a baixas, em materiais como ferros fundidos, aços de médio C, ligas Al-Si (BALZERS, 2007).

Óxido de Alumínio (Al₂O₃): É caracterizado por uma alta dureza a quente, resistência à oxidação e ações químicas, com excelente resistência ao desgaste de cratera. Tem como desvantagem a baixa resistência a oscilações de temperaturas e alta fragilidade (DINIZ, 2006).

Nitreto de Titânio-Alumínio (TiAlN): este revestimento também é derivado do TiN. Durante o processo de deposição, parte dos átomos de Ti é substituída por átomos de Al. Os átomos de alumínio são retidos no material (revestimento) na forma de solução sólida, causando endurecimento. O aumento de dureza (3.500 HV 0,05) proporciona maior resistência ao desgaste. A substituição dos átomos pode significar, também, melhora de resistência à oxidação e estabilidade química, dependendo da aplicação. Uma proporção de átomos típica é de Ti_{0,6} Al_{0,4} N. Os revestimentos a base de TiAlN têm se sobressaído principalmente em usinagem a seco, mas também é aplicável com fluidos de corte (KANZLER, 2009).

Nitreto de Titânio-alumínio (TiAlN) Revestido por WC/C: Este tipo de revestimento tem como característica minimizar a utilização de fluidos de corte, através da aplicação de uma camada de WC/C sobre o revestimento de TiAlN, reduzindo o coeficiente de atrito de 0,4 para 0,2 e garantindo sua aplicação em processos de furação e rosqueamento. (BALZERS, 2007).

Nitreto de Cromo-alumínio (AlCrN): é um revestimento de alto rendimento, isento de titânio, é excelente para níveis de resistência à oxidação e dureza a quente. Estas propriedades conferem a este produto uma incomparável resistência ao desgaste, tanto em condições normais como sob esforços mecânicos elevados. As capacidades das ferramentas de máquinas modernas podem assim ser melhor exploradas através do aumento de dureza (3.200 HV 0,05) (KANZLER, 2009).

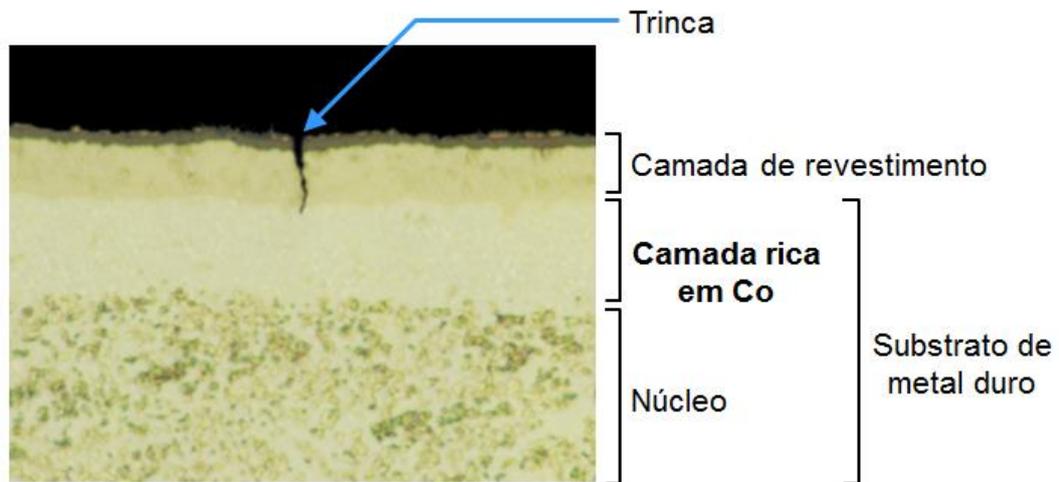
3.3.1.6 Substrato utilizado em revestimentos CVD no metal duro

Na usinagem de aços são geradas grandes forças, com isso o cavaco tem durante muito tempo contato com a aresta de corte, o que gera calor facilmente (uma elevada temperatura).

Para minimizar este problema, são recomendados utilizar carbeto misto, que têm TiC no substrato, como por exemplo um metal duro misto (WC – TiC – Co).

O próprio revestimento é duro e quebradiço, e quando a carga é aplicada fissuras podem facilmente desenvolver, conforme Figura 22. Visando evitar que estas fissuras possam atingir o substrato uma camada de superfície dura é empregada. Esta camada é uma camada enriquecida de Co que impede a propagação de fissuras.

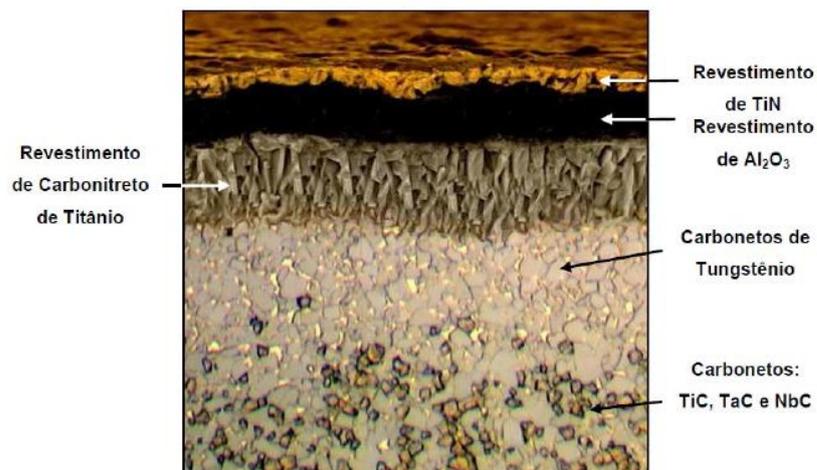
Figura 22 - Área da camada resistente



Fonte: Adaptado de (Mitsubishi, 2006)

A Figura 23 apresenta a estrutura de revestimentos e seus devidos elementos químicos em camadas.

Figura 23 - Estrutura ampliada do revestimento CVD em metal duro



Fonte: Souza (2011)

3.3.2 Processo PVD

PVD é a sigla para *Physical Vapor Deposition* ou deposição física a vapor, este processo forma uma camada no substrato por deposição física de átomos, íons ou moléculas do elemento a ser depositado, criando assim um revestimento. Dentre as técnicas existentes temos três principais, sendo elas: Evaporação, *Sputtering* e Íons.

O processo de deposição física PVD surgiu na década de 1970, com a deposição de TiN sobre ferramentas de aço-rápido. Dez anos mais tarde foi adaptado para revestir ferramentas de metal duro. A principal característica é a temperatura em torno de 500°C, que traz benefícios como (SANTOS; SALES, 2007):

- 1) A possibilidade de revestir substratos de aço-rápido;
- 2) A prevenção da formação da fase “*eta*”;
- 3) A obtenção de revestimentos com granulometria mais fina;
- 4) A possibilidade de revestir cantos vivos.

No PVD, a deposição ocorre através de vapores gerados no interior de fornos a baixa pressão. Essa pressão permite que, por meio de aquecimento, os materiais sólidos que participarão da formação dos revestimentos passem diretamente para o estado gasoso. Os vapores, que constituem o material do revestimento, são obtidos a partir de gases reativos ou de sólidos sublimados no interior do forno por descarga eléctrica (SANTOS; SALES, 2007)

Neste processo, o material de revestimento sólido de alta pureza (metais como titânio, cromo e alumínio) pode ser evaporado pelo calor ou então bombardeado com íons (pulverização catódica). Ao mesmo tempo, é introduzido um gás reativo (por exemplo, nitrogênio ou um gás que contenha carbono); formando um composto com o vapor metálico que se deposita nas ferramentas ou nos componentes na forma de um revestimento fino e altamente aderente (OERLIKON, 2010).

Para atingir uma espessura de revestimento uniforme, as peças devem girar várias vezes a uma velocidade constante (OERLIKON, 2010).

As propriedades do revestimento como dureza, estrutura, resistência química e resistência à temperatura, aderência, podem ser desta forma controladas com rigor (OERLIKON, 2010).

Originalmente o PVD era utilizado somente para deposição de elementos metálicos pelo transporte de vapor em vácuo, sem envolver qualquer reação química.

A estrutura do revestimento e os processos de deposição PVD produzem características desejáveis, como (GREENE, 1994):

- Revestimento com granulometria mais fina, tamanho do grão muito fino;
- Filmes “macios” que geram menor atrito durante a usinagem;
- Revestimento livre de trincas, benéfico na aresta de corte da ferramenta;
- Tensões residuais de compressão, caso da deposição pelo método de íon reativo, que são benéficas no aumento da resistência à propagação de trincas;
- Uniformidade de composição e o alívio de tensões do material base também é alcançado devido ao resfriamento lento a partir da temperatura do revestimento;
- O processo PVD preserva a resistência à ruptura transversal do substrato de metal duro, ao passo que o processo CVD geralmente reduz a resistência à ruptura transversal em pelo menos 30%.

3.3.2.1 O processo *Sputtering*

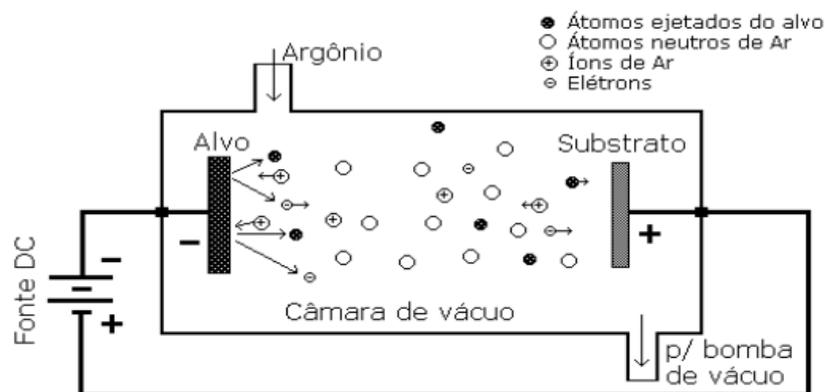
O fenômeno de *sputtering* foi primeiramente observado por GROVE (1852) e utilizado como processo de deposição de filmes por WRIGHT (1877) no século XIX.

A ocorrência de *sputtering* está diretamente ligada à energia do íon incidente e à natureza química do alvo (ROHDE; MUNZ, 1991). Podem ainda ocorrer os seguintes fenômenos:

- Reflexão de íons pelo alvo (podem ser neutralizados no processo);
- Ejeção de elétrons do alvo (elétrons secundários responsáveis pela manutenção da descarga);
- Penetração de íons no alvo (fenômeno da implantação iônica);
- Devido ao impacto do íon pode também ocorrer um rearranjo na estrutura do material, podendo provocar mudança de posição dos átomos, criação de vacâncias e defeitos cristalinos.

O *sputtering* convencional (Figura 24) ou diodo de corrente contínua, é composto por uma câmara de vácuo onde temos dois eletrodos ligados a uma fonte de alta tensão DC, o cátodo é o alvo e o ânodo é o substrato que desejamos recobrir. Um gás inerte, geralmente argônio, é introduzido na câmara a uma pressão apropriada (em torno de 100 mTorr). Ao se aplicar uma diferença de potencial entre os eletrodos, ocorre ionização no gás. Os íons positivos produzidos na descarga são acelerados em direção ao alvo e podem arrancar átomos do material devido à transferência de momento durante a colisão. Os átomos são ejetados em todas as direções e, parte destes, chega continuamente ao substrato onde, ao condensarem, formam um filme do mesmo material do alvo (FONTANA, 1997).

Figura 24 - Esquema de um *Sputtering* convencional



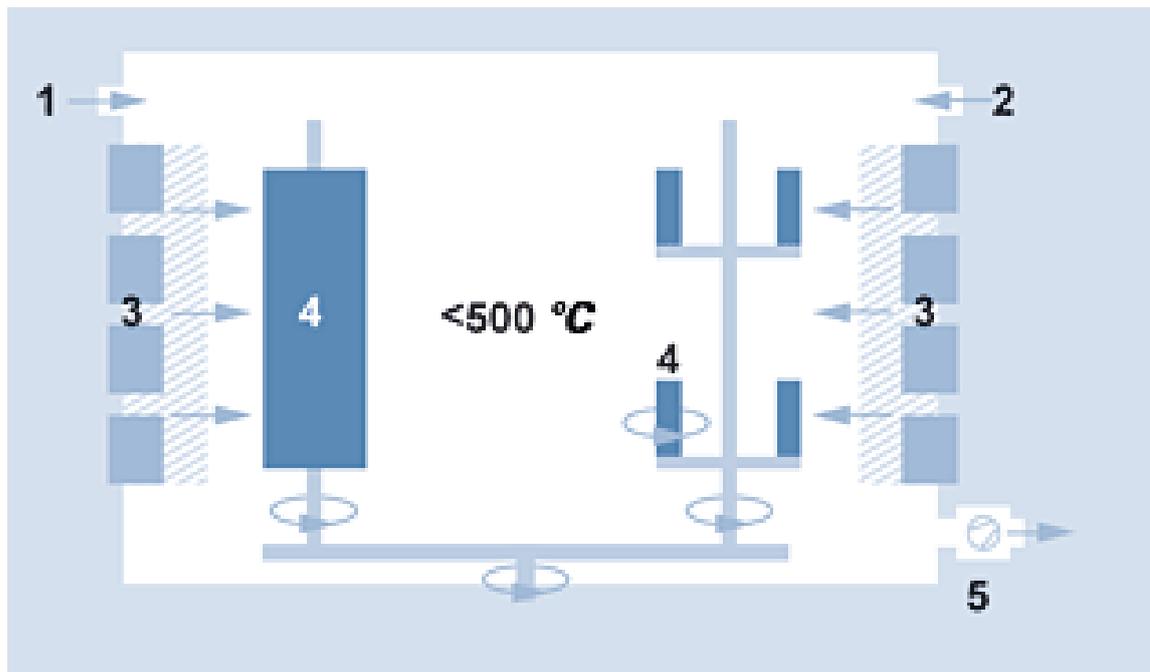
Fonte: Fontana (1997)

3.3.2.2 O processo de Evaporização

Neste processo, um arco com um diâmetro de apenas alguns micrometros atua sobre o material de revestimento metálico e sólido, levando à sua evaporação. Devido às altas correntes e densidades de potência então utilizadas, o material evaporado é praticamente todo ionizado, formando um plasma de alto poder energético (ERLIKON, 2010).

Os íons metálicos combinam com o gás reativo que é introduzido na câmara e atacam as ferramentas ou componentes que vão ser revestidos com alta potência. São depositados na forma de um revestimento fino e altamente aderente (ERLIKON, 2010).

Figura 25 - Evaporação por arco



Fonte: Oerlikon (2010)

Na Figura 25 os itens numerados representam:

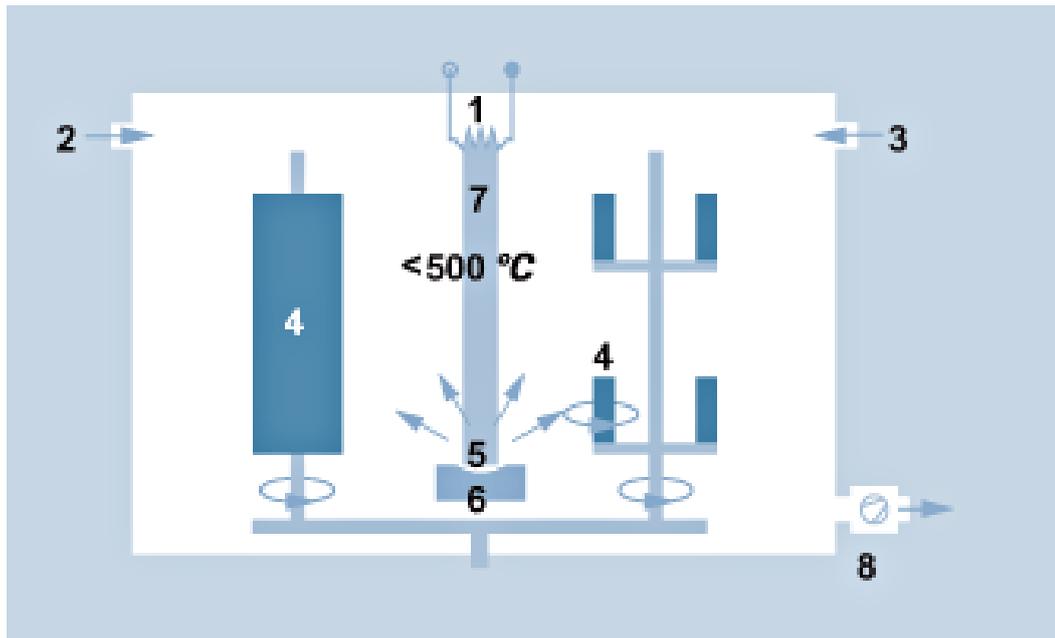
- 1 – Argônio;
- 2 – Gás reativo;
- 3 – Fonte do arco (material de revestimento e placa de reforço);
- 4 – Componentes;
- 5 – Bomba de vácuo.

3.3.2.3 O processo de Íons

Essa variante oferece a ionização do plasma melhor balanceada, o que possibilita mais controle do processo (SANTOS; SALES, 2007)

Este processo consiste em um processo PVD que emprega a evaporação por feixe eletrônico reativo. Enquanto que, a pulverização catódica utiliza o bombardeio com íons de argônio para remover o material de revestimento de uma chapa metálica, neste processo, o componente metálico do material de revestimento (por exemplo, titânio ou cromo) é evaporado por meio de um arco de baixa tensão (ERLIKON, 2010).

Figura 26 - Íons



Fonte: Oerlikon (2010)

Na Figura 26 os itens numerados representam:

- 1 – Fonte do feixe eletrônico;
- 2 – Argônio;
- 3 – Gás reativo;
- 4 – Componentes;
- 5 – Material de revestimento;
- 6 – Cadinho (ânodo);
- 7 – Descarga por arco de baixa tensão;
- 8 – Bomba de vácuo.

3.3.2.4 Características dos Materiais do Revestimento PVD

Os materiais que são usados no método de revestimento de PVD incluem TiN (nitreto de titânio), (Al, Ti)N (nitreto de alumínio e titânio), (Al, Ti, Si)N (nitreto de titânio alumínio e silício), CrN (nitreto de cromo) e carbono amorfo duro. Adicionalmente TiC e TiCN que são geralmente usados no processo de CVD também podem ser usados com o processo PVD. Cada material possui as suas próprias propriedades específicas e que também pode ser usado quer como camadas múltiplas ou única, de acordo com a sua aplicação (MITSUBISHI, 2006).

Quadro 4 - Propriedades dos materiais

	Dureza	Temperatura de oxidação
	Resistência ao desgaste	Resistência ao entalhe e à craterização
	(HV)	(°C)
TiN	1900	620
(Al, Ti)N	2800	840
(Al, Ti, Si)N	3200	1100
CrN	2000	-
Substrato	1600	-

Fonte: Adaptado de (Mitsubishi, 2006)

Segundo Mitsubishi (2006) as propriedades do metal duro revestido com PVD são definidas das seguintes formas:

Dureza (Resistência ao Desgaste do Flanco)

O (Al, Ti)N, é um complexo de nitreto de alumínio e titânio. As partículas de Al e Ti tem diferentes raios atômicos, criando uma microestrutura distorcida. É devido à esta distorção que é gerada uma linha de revestimento endurecido em sua camada. Uma linha de revestimento que é ainda mais endurecida é o (Al, Ti, Si)N e isso é devido às partículas de Si dentro da camada de revestimento que vem a fornecer propriedades elevadas de desgaste do flanco.

Quando se compara (Al, Ti)N, (Al, Ti, Si)N com CrN pode-se observar que o CrN não tem partículas endurecidas. No entanto, quando se usina cobre sob condições de alta temperatura de corte do coeficiente de atrito de CrN é muito mais baixo do que a do TiN e

(Al, Ti)N, como consequência, isso proporciona excelentes propriedades de resistência à soldagem. O TiN é um dos materiais da primeira geração de revestimentos, que é mais duro do que o metal duro e pode ser utilizado de forma eficaz para prolongar a ferramenta devido ao fato de que é mais estável quimicamente.

Temperatura de Oxidação (Resistência ao Entalhe na Aresta de Corte / Resistência ao Desgaste por Craterização)

O (Al, Ti)N é termicamente estável à temperaturas elevadas e tem excelente resistência ao desgaste durante ao corte a altas velocidades. Isto se dá devido ao fato de que o Al oxida sob elevadas temperaturas e pressões durante a usinagem e forma uma película protetora de Al_2O_3 amorfo. O (Al, Ti, Si)N tem uma estabilidade térmica mais elevada do que (Al, Ti)N e é utilizado para o revestimento de fresas para usinagem de aço endurecido.

O TiN com sua alta resistência à oxidação e baixa energia livre de formação, ou seja, termicamente estável e também é eficaz no aumento da vida da ferramenta.

3.3.2.5 Características dos Materiais do Revestimento PVD

Assim como CVD, os revestimentos de TiN, TiAlN tem as mesmas características na técnica de revestimento PVD.

As principais características das camadas de revestimentos são:

Nitreto de Cromo (CrN): o CrN é um excelente revestimento para ligas de alumínio, ligas de cobre e aços de baixa liga. O CrN também pode ser utilizado como uma alternativa para as ligas de titânio e níquel. Este revestimento tem uma baixa tendência para formar arestas postiças (DORMER, 2014).

Nitreto de Titânio Alumínio e Silício (Al, Ti, Si)N: o (Al, Ti, Si)N tem uma estabilidade térmica mais elevada do que (Al, Ti)N e é utilizado para o revestimento onde se precisa de uma aresta de corte mais positiva. Este tipo de revestimento é empregado em usinagem de materiais endurecidos, em sua maioria no fresamento.

Substrato Utilizado em Revestimento PVD no Metal Duro

As temperaturas utilizadas para o revestimento de PVD são mais baixas do que a de revestimento de CVD. Portanto, durante o revestimento PVD o substrato não é danificado e a

dureza do mesmo não é afetada. Como resultado, o revestimento de PVD pode ser aplicado a uma vasta gama de substratos, tais como o metal duro e cermet, assim também como as ferramentas de alta velocidade e as ferramentas de metal duro soldadas, sendo que ambos têm reduzido dureza e resistência a altas temperaturas (MITSUBISHI, 2006).

O revestimento PVD também é frequentemente usado para as brocas, fresas de topo, ferramentas de rosqueamento, etc. Isso porque o PVD pode manter a força da aresta de corte da ferramenta que exigem uma aresta de corte mais afiada (positiva) sem que a mesma apresente danos.

Figura 27 - Revestimento PVD



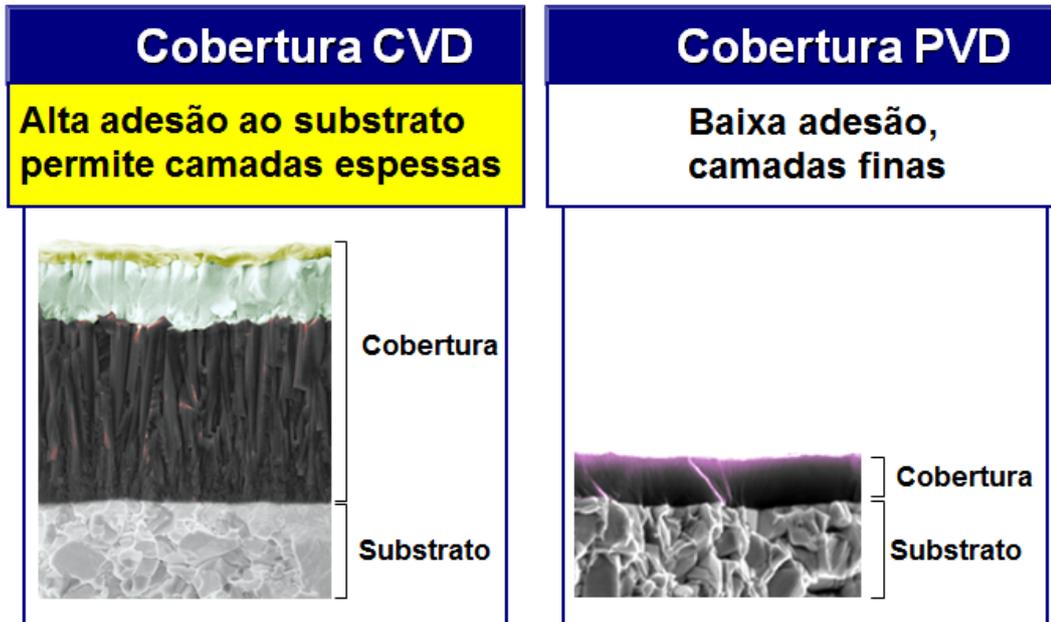
Fonte: Adaptado de (TUNGALOY, 2013)

3.3.3 Vantagens e Desvantagens do CVD e PVD

3.3.3.1 Adesão

Na Figura 28 pode ser observado que em termos de adesão ao substrato o revestido CVD oferece maior aderência. Ao efetuar uma cobertura pelo processo CVD na fronteira entre o substrato e o revestimento (devido a uma reação química), um tipo de ligação ocorre e isso leva a uma maior adesão. No caso do processo PVD que é a deposição física, devido ao fato de se ter temperaturas mais baixas, este tipo de ligação na fronteira não ocorre e, como tal a adesão é menor.

Figura 28 - Diferenças entre CVD e PVD, Adesão

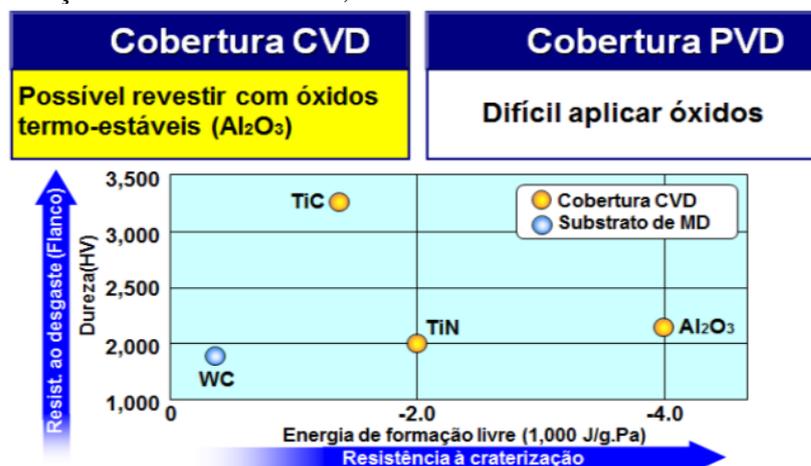


Fonte: Mitsubishi (2007)

3.3.3.2 Revestimento com Óxidos

Na Figura 29 se pode ver que o óxido de alumínio tem maior estabilidade térmica (menor formação de energia livre) quando é comparado com WC, TiC e TiN. Revestimentos CVD oferecem propriedades de resistência mais elevadas de calor quando comparado com revestimentos PVD. Óxidos são extremamente difíceis de serem obtidos através do processo de revestimento PVD, com isso existem poucas empresas que conseguem trabalhar com este processo.

Figura 29 - Diferenças entre CVD e PVD, Óxidos



Fonte: Mitsubishi (2007)

3.3.3.3 Substrato

O processo de revestimento CVD é realizado a temperaturas por volta de 1000 °C, portanto se for utilizado para aplicar um revestimento sobre HSS (aço rápido), devido à elevada temperatura, as propriedades do HSS serão afetadas, neste caso a dureza será reduzida.

O processo de revestimento PVD é realizado em temperaturas inferiores a 700°C e, como resultado, não cria problemas ao substrato. Portanto, PVD podem ser utilizados para uma grande variedade de materiais de substrato.

Figura 30 - Diferenças entre CVD e PVD, Substrato



Fonte: Mitsubishi (2007)

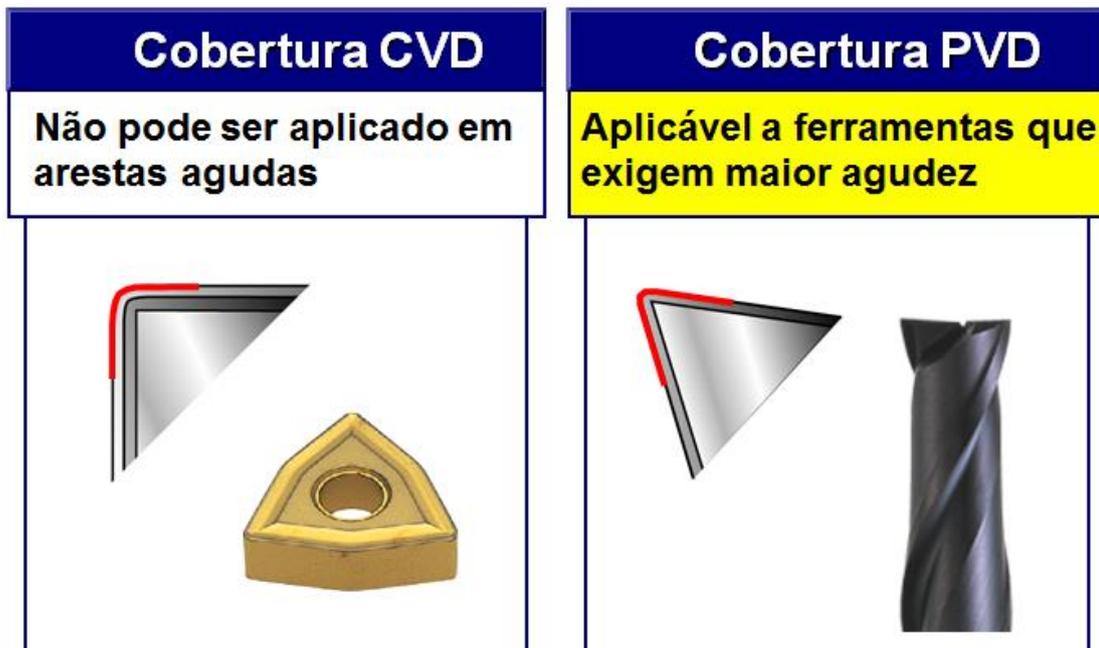
3.3.3.4 Aresta de Corte

Com relação à obtenção de uma aresta de corte mais positiva, ela pode ser alcançada por meio de um revestimento PVD que por sua vez são mais finos, em geral com espessura média de 3µm.

Ao utilizar um revestimento CVD, devido ao calor do processo na aresta de corte, podem ser gerados carbeto muito quebradiços que são precipitados (W_6Co_6C , W_3Co_3C), quando isto ocorre, a aresta de corte se torna extremamente dura e quebradiça e não podendo ser efetivamente utilizado. Este fenômeno recebe o nome de fase “eta”.

Ao tentar obter arestas de corte mais positivas através do processo CVD, o próprio revestimento limita já que a espessura da camada é maior, em média $10\mu\text{m}$, por este motivo deixando a aresta de corte mais arredondada. Isto se deve também devido à taxa de crescimento de grão, que resulta no fato de uma aresta de corte afiada não pode ser alcançada.

Figura 31 - Diferenças entre CVD e PVD, Aresta de Corte



Fonte: Mitsubishi (2007)

3.3.3.5 Adesividade dos Revestimentos

De acordo com Mattox (2001), adesividade é a resistência mecânica que une dois diferentes materiais ou objetos, sendo que um requisito fundamental da maioria dos sistemas de deposição de revestimentos.

A adesividade básica é o mais alto valor permissível de adesividade, sendo função da natureza dos materiais e do tipo de ligação estabelecida entre substrato e o revestimento (PARACCHINI; MUTO, 2006). A adesividade básica pode ser entendida como a soma de todas as interações interatômicas que ocorrem na interface substrato/revestimento, e quantificada como o trabalho necessário para separar completamente o revestimento do substrato ao longo da interface, excluindo todos os outros efeitos de natureza das ligações entre os átomos de ambos os materiais (OLLENDORF; SCHNEIDER, 1999).

A adesividade prática não só depende da adesividade básica, como faz referência à falha do revestimento para proteção ao desgaste, que depende de uma complexa combinação de

propriedades elásticas e tenacidade à fratura do revestimento e do substrato, do tamanho da distribuição das imperfeições existentes na microestrutura do revestimento ou da distribuição de defeitos interfaciais, do teste aplicado para a verificação da qualidade do revestimento, dos níveis de tensão residual, dos poros e outros defeitos existentes no reticulado cristalino do material, das condições de carga e do comportamento ao atrito do revestimento em contato contra outro material (BUNSHAH, 2001; OLLENDORF ; SCHNEIDER, 1999).

Segundo Mattox (2001), a adesividade prática de adesividade aparente que é determinada pela aplicação de uma tensão mecânica externa, e a falha pode ocorrer na região de interface substrato/revestimento. Holmberg e Matthews (1994) utilizam o termo adesividade efetiva no estudo da adesividade revestimento/substrato, uma vez que revestimentos com energia de ligação iguais ao do substrato podem exibir diferentes comportamentos de adesividade efetiva. É possível relacionar a medida prática da adesividade com a adesividade básica através da seguinte relação dada pela Equação (3) (PARACCHINI; MUTO, 2006).

$$MSAP = AB \quad IS \pm M \quad (3)$$

Onde:

IS é a tensão interna do revestimento;

MSM é o erro específico do método utilizado para a medida da adesividade prática;

AP adesividade prática;

AB adesividade básica.

Em geral, todos os métodos para medir a adesividade implicam que $AP \ll AB$ (PARACCHINI; MUTO, 2006). Experimentalmente a adesividade pode ser medida através de duas maneiras (BUNSHAH, 2001):

a) Em termos de força: a força de adesividade é definida como a máxima força por unidade de área para separar o revestimento do substrato;

b) Em termos de energia: o trabalho de adesividade WAB é definido como o trabalho realizado para separar o revestimento (A), do substrato (B) que é dado pelo critério de energia, seguindo a Equação (4).

$$WAB = \gamma_A + \gamma_B \quad \gamma_{AB} \quad (4)$$

Onde: γ_A e γ_B são as energias livres específicas das superfícies A e B, e γ_{AB} é a energia livre específica interfacial.

A força de adesividade pode ser relacionada ao trabalho de adesividade através algumas suposições sobre as mudanças na força com a separação das superfícies (MITTAL 1976 apud BUNSHAH, 2001), porém no geral, o trabalho de adesividade é um conceito muito, pois não leva em consideração muitas suposições. Em termos de energia se a ruptura ocorrer na interface AB a falha é considerada adesiva, por outro lado se ocorrer dentro de A ou de B a falha é considerada do tipo coesiva (FRANCO JR., 2003).

De acordo com Franco Jr. (2003) os principais fatores que podem ser determinantes na adesividade do revestimento sobre o substrato são:

- Tipo de interface estabelecida entre o substrato e o revestimento;
- Microestrutura do revestimento: Morfologia e Tensões Residuais;
- Limpeza, preparação e modificação da superfície do substrato.

A adesividade é uma propriedade que está associada essencialmente à região de interface substrato/revestimento. Nessa região a técnica utilizada para deposição do filme e as propriedades dos materiais do substrato e do revestimento conduzem à formação de forças de natureza atômica ou forças de natureza mecânica (HOLMBERG; MATTHEWS, 1994).

A região de interface pode ser formada por microestruturas diferentes, através de uma pseudo-difusão ou ligação de Van der Waals quando a separação entre o substrato e o revestimento ocorre a uma distância de apenas poucos átomos. A uma distância tão pequena não se pode falar realmente na formação de uma camada de difusão verdadeira ou de uma ligação química entre os dois materiais. Nesta condição forma-se uma interface com uma camada muito limitada em que defeitos e tensões internas estarão confinados, e na presença de tal microestrutura na interface pode-se ter uma pobre adesividade (PARACCHINI; MUTO, 2006).

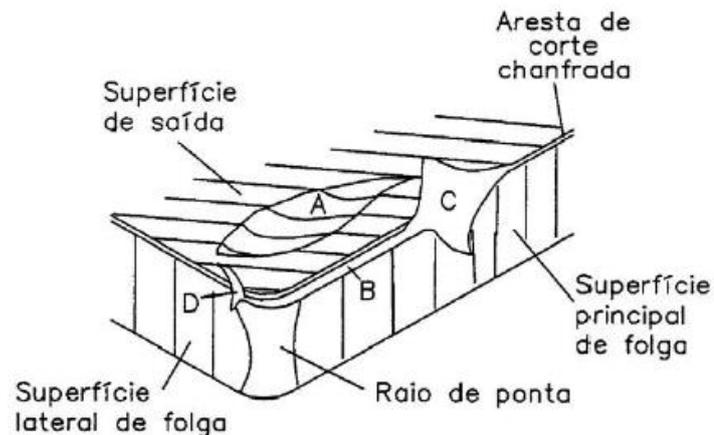
Se uma ligação química verdadeira for formada na região de interface, através da criação de uma *interlayer*, ou camada intermediária, esta camada pode ser benéfica à adesividade (exceto para aqueles casos em que a camada intermediária é de natureza frágil) (PARACCHINI; MUTO, 2006). Para compreender detalhadamente a interface substrato/revestimento é necessária uma previsão mais segura do comportamento do sistema mecânico, conjugado substrato/revestimento (FRANCO JR., 2003).

3.3.4 Danos à ferramenta de corte

Os desgastes que as ferramentas sofrem são originados principalmente pelo atrito entre o cavaco e a ferramenta e entre esta e a peça. Vários fatores intervêm neste desgaste, tais como cisalhamento de microsoldas, abrasão mecânica, difusão intermetálica e oxidação. A ação desses fatores está relacionada com a temperatura de corte, a qual depende principalmente da velocidade de corte (DINIZ et al. 2010).

Durante o processo de usinagem esses fatores geram alguns danos a aresta de corte, estes danos são classificados em danos normais como desgaste de flanco e craterização, e também danos anormais como fratura, quebra, soldagem, microlascamento, entalhe, trincas, deformação plástica e deslocamento do revestimento.

Figura 32 - Principais regiões de desgaste na aresta de corte

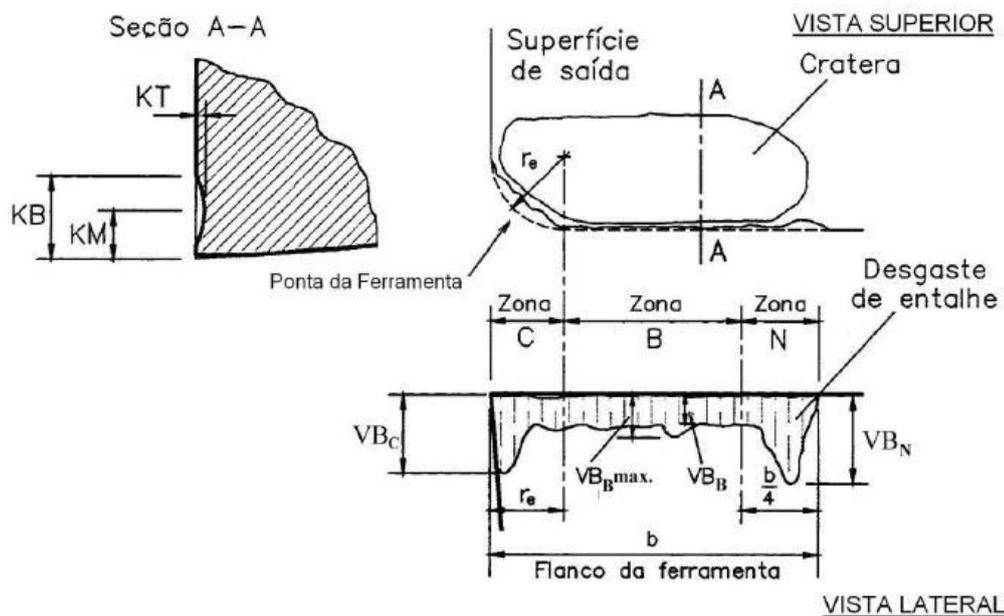


Fonte: Adaptado de (DEARNLEY; TRENT, 1982)

Segundo Santo e Sales (2007), a norma ISO 3685 utiliza os parâmetros K_T , V_B , $V_{B\text{MÁX}}$ e V_{B_N} para quantificar o desgaste nas ferramentas de corte. O critério recomendado para avaliar as de aço rápido, metal duro e cerâmica é:

- Desgaste de flanco médio, $V_{BB} = 0,3\text{mm}$;
- Desgaste de flanco máximo, $V_{B\text{MÁX}} = 0,6\text{mm}$;
- Profundidade da cratera, $K_T = 0,06 + 0,3f$, onde f é o avanço em mm/rot;
- Falha catastrófica.

Figura 33 – Parâmetros e regiões para medição do desgaste

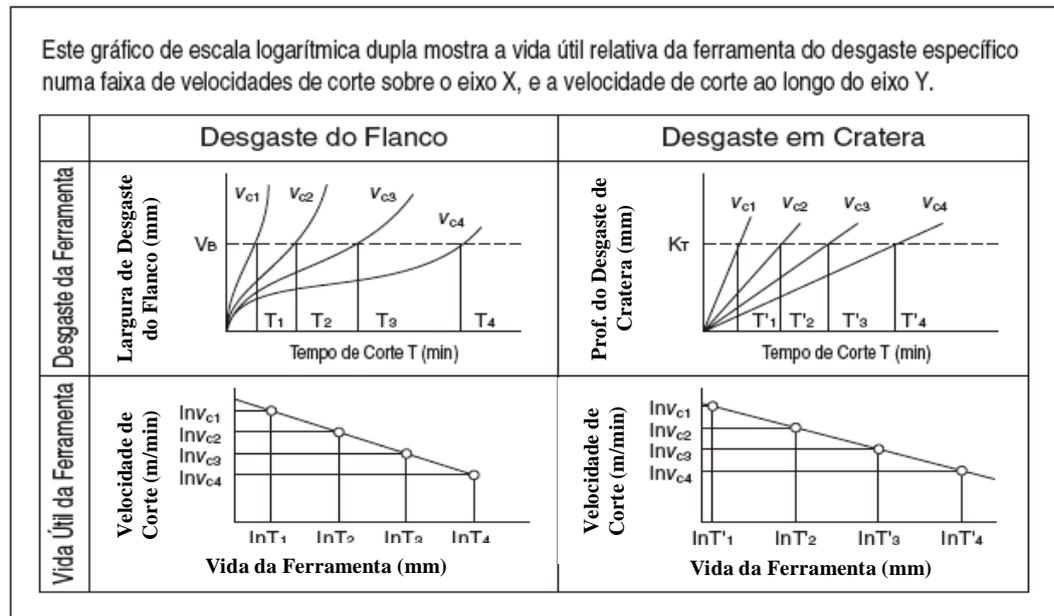


Fonte: NORMA ISO 3685 (1993)

Segundo Santo e Sale (2007), uma metodologia para expressar a vida da ferramenta (T) em função da velocidade de corte (v_c), mantendo os demais parâmetros (f , a_p , geometria de corte, materiais da ferramenta e da peça, processo, máquina e fluido) constantes, consiste em levantar pelo menos três curvas de desgaste, para três distintas v_c .

É estabelecido um critério de fim de vida da ferramenta $V_{BMÁX}$, com isso obtendo pelo menos três pontos. Cada ponto tem suas coordenadas relativas ao eixo x, correspondentes à vida, T em min, em relação ao eixo y, correspondente à v_c em m/min. De posse destes pontos, constrói-se o gráfico. Para tornar linear a curva, aplica-se no próximo passo, logaritmo nos dois eixos, obtendo-se, assim, um gráfico logarítmico.

Figura 34 – Gráfico em escala logarítmica da vida da ferramenta V-T



Fonte: adaptado de (Sumitomo, 2015)

3.3.4.1 Desgaste de Flanco

O flanco está sempre em contato com a peça e é o tipo de desgaste mais comum de ocorrer no processo de usinagem. Quando se usina materiais mais duros ou com alta adesividade, o desgaste de flanco acaba se desenvolvendo mais rapidamente. Este tipo de desgaste traz problemas à peça usinada como problemas no acabamento superficial e no dimensionamento da mesma. Para tentar desacelerar dano, o mais indicado é reduzir os parâmetros de corte como avanço e rotação.

Figura 35 - Desgaste de flanco



Fonte: Sumitomo (2015)

3.3.4.2 Desgaste de Cratera

O desgaste de cratera ocorre principalmente por difusão, mas também por aderência e o desgaste de entalhe por oxidação (Diniz et al. 2010). Em muitos casos, pode ser vista durante a usinagem da peça devido ao calor elevado que é gerado durante o processo, como na usinagem de materiais que têm alta resistência, alta adesão e baixa condutividade térmica. A aceleração deste desgaste e a falta de controle sobre o mesmo acaba gerando uma quebra posterior da ferramenta, para que isso seja evitado é recomendado um controle sobre os parâmetros de corte e profundidade de corte.

Figura 36 - Desgaste de cratera



Fonte: Sumitomo (2015)

3.3.4.3 Dano de Fratura

É um dos desgastes anormais que ocorre geralmente devido a grandes impactos e vibrações durante o processo de usinagem. Durante a usinagem de materiais duros ou de peças grandes com impactos (corte interrompido), podem levar a fratura. Além disso, quando rigidez ferramenta é baixa, as vibrações podem ocorrer levando a fratura.

Na usinagem de materiais como o ferro fundido e aço inoxidável, vibrações podem ocorrer facilmente e isso pode levar à fratura. Para que isso possa ser evitado ou então retardado o ideal é reduzir os parâmetros de corte, balanço da ferramenta e/ou alterar a fixação para uma mais rígida.

Figura 37 - Dano anormal, Fratura

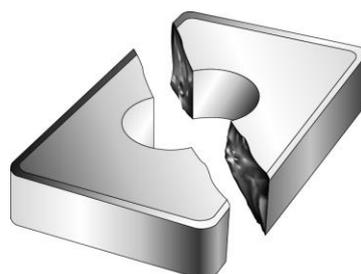


Fonte: Sumitomo (2015)

3.3.4.4 Dano de Quebra

É o dano proveniente da ruptura completa de uma pastilha e é o resultado de condições de corte inapropriadas e/ou ferramenta inadequada. Este tipo de dano também pode ser o resultado de má manutenção, ou seja, por exemplo, quando há a mudança da pastilha ou se a aresta de corte for alterada sem que tenha sido verificado que não há nenhuma sujeira ou corpos estranhos no alojamento do suporte que deveriam ser removidos corretamente.

Figura 38 - Dano de ruptura



Fonte: Adaptado de (Mitsubishi, 2006)

3.3.4.5 Dano de Soldagem

Este tipo de dano também é conhecido como Aresta Postiça de Corte (APC) e pode ocorrer facilmente durante a usinagem de materiais tenazes, ou quando há alta afinidade entre a ferramenta e a peça usinada. A soldagem é comum de ocorrer se a velocidade de corte é baixa e com isso então a temperatura na aresta de corte não atinge a temperatura de recristalização e resulta no desenvolvimento da BUE (Built Up Edge – “aresta postiça de corte”) (Diniz et al., 2010). A soldagem gera diversos problemas no processo de usinagem como um péssimo acabamento superficial, alteração na força de corte e desgaste da ferramenta de corte.

Figura 39 - Dano de soldagem

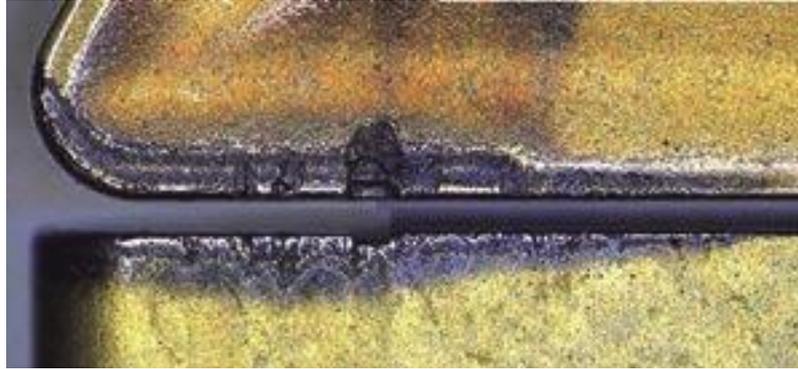


Fonte: Sumitomo (2015)

3.3.4.6 Dano de Microlascamento

O microlascamento da aresta de corte é geralmente um problema relacionado com a vibração e impactos ao longo da aresta de corte. Ele também pode ocorrer quando seções soldadas que se têm desenvolvido ao longo da aresta de corte (aresta postiça) são descascadas ou removidas. Este tipo de dano causa uma alta resistência de corte e desenvolve simultaneamente o desgaste de flanco e o microlascamento. Os cuidados para evitar este tipo de dano são controle de balanço da ferramenta, parâmetros de corte e profundidade de corte.

Figura 40 - Dano de microlascamento



Fonte: Sumitomo (2015)

3.3.4.7 Dano por Entalhe

Dano de Entalhe é um padrão de desgaste que pode ser visto no limite da aresta de corte, na aresta de corte principal (a aresta de corte, que está em contato com a peça usinada). Muitas vezes pode ser visto na usinagem de materiais que têm uma camada de superfície dura (superfície de peças fundidas e/ou forjadas) e de materiais que são fáceis de endurecer durante a usinagem (aços inoxidáveis).

Portanto, quando usinamos materiais que tem uma camada endurecida, como materiais fundidos/forjados, a quente e materiais que passaram por algum tipo de tratamento térmico (tratamento de superfície), em seguida, é necessário prestar atenção no processo de usinagem, pois este tipo de dano deverá aparecer.

O crescimento deste dano tende a levar a outros danos como fratura ou quebra.

Figura 41 - Dano de entalhe



Fonte: Sumitomo (2015)

3.3.4.8 Dano de Trincas Térmicas

Trincas térmicas são o resultado dos impactos de choque térmicos repetitivos ao longo da aresta de corte. Quando qualquer tipo de usinagem é realizado na aresta de corte torna-se extremamente quente. Para a usinagem a seco contínua (torneamento) os impactos do choque térmico na aresta de corte são limitados.

Mas se fosse com refrigeração torneamento ou fresamento, então o impacto do choque térmico ao longo da aresta de corte seria ilimitado. Quando se diz impacto do choque térmico está querendo dizer que o aquecimento e refrigeração repetitivo na aresta de corte. Quando o gradiente de temperatura se torna grande (especialmente quando se usina com refrigeração no torneamento ou fresamento) este tipo de dano na aresta de corte muitas vezes pode ser visto. Ocorre então uma expansão e contração repetitivo do revestimento da ferramenta. Isto leva ao desenvolvimento trincas entre os limites dos grãos do substrato e o revestimento da ferramenta.

Figura 42 - Dano por trinca térmica



Fonte: Adaptado de (Mitsubishi, 2006)

3.3.4.9 Dano por Deformação Plástica

Deformação plástica da aresta de corte significa que a pastilha submetida a altas temperaturas e sob uma carga demasiadamente elevada. Nesta situação, a aresta de corte torna-se mais tenaz e sofre a deformação. Pode ser visto na usinagem de materiais que resultam na geração de calor elevado (elevada resistência e adesão) e para materiais que têm baixa condutividade térmica.

Este tipo de dano pode posteriormente causar a quebra da pastilha.

Figura 43 - Dano de deformação plástica



Fonte: Sumitomo (2015)

3.3.4.10 Dano de Desplacamento (Lasca)

Descamação é um tipo de dano na pastilha que não é normalmente visto. Na usinagem de peças com material mais duro e que têm alta rigidez, as forças de corte agem em direção à face flanco (força nas costas) aumenta e empurra para trás a aresta de corte. Isto leva à descamação ao longo da aresta de corte. Ocorre facilmente quando há a concentração de estresse na aresta de corte.

Figura 44 - Dano por deslocamento



Fonte: Tungaloy (2013)

3.4 Rugosidade

Há diversos fatores que influenciam o acabamento superficial de uma peça como, o raio de ponta da aresta de corte, tolerâncias de fabricação da ferramenta, desgaste ou formação de arestas postiça na ferramenta, precisão da máquina, escoamento do cavaco, parâmetros de corte, etc. Com isso, sendo uma textura primária formada por sulcos ou marcas formadas pela ferramenta de corte (NETO, 2012).

Quadro 5 Fatores que afetam a rugosidade

	Causa	Solução
Classe	<ul style="list-style-type: none"> ● Soldagem ● Entalhe no flanco principal 	<ul style="list-style-type: none"> ● Usar classe com baixa afinidade (cermet) ● Usar classe com alta resistência à oxidação (com cobertura)
Geometria	<ul style="list-style-type: none"> ● Raio de ponta muito peq. ● Âng saída muito peq. ● <i>Honing</i> muito gde. ● Flanco muito peq. 	<ul style="list-style-type: none"> ● Aumentar o raio de ponta ● Usar inserto alisador ● Aumentar o ângulo de saída ● Reduzir o tamanho da preparação ● Aumentar o ângulo do flanco
Parâmetros de corte	<ul style="list-style-type: none"> ● Avanço muito alto ● Vc muito baixa ● Sem refrigeração 	<ul style="list-style-type: none"> ● Reduzir o avanço ● Aumentar a Vc ● Usar refrigeração

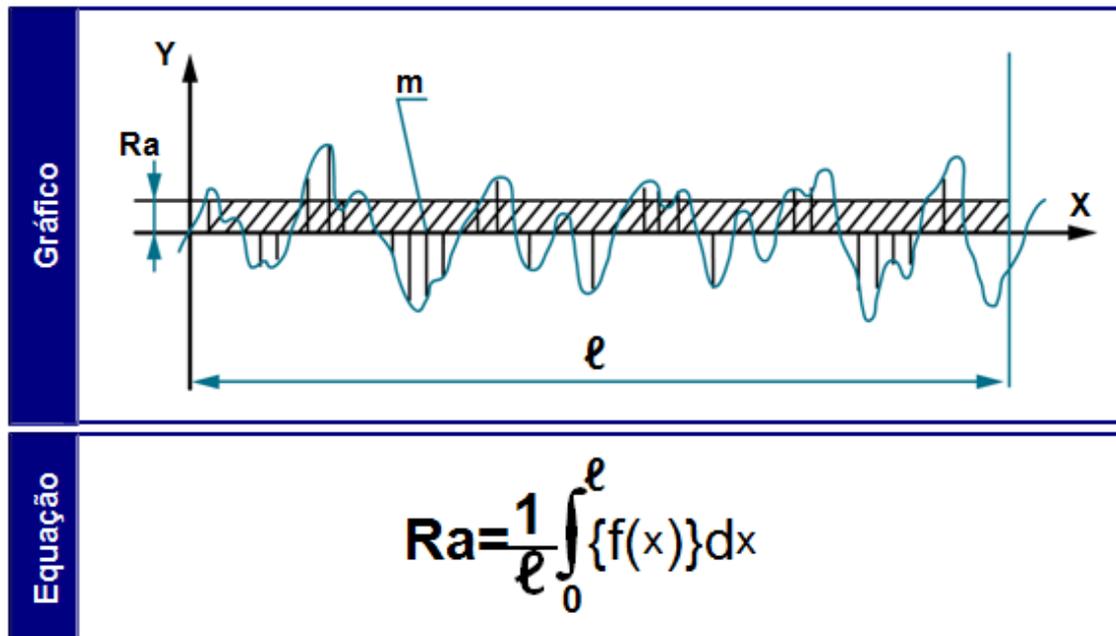
Fonte: Adaptado de (Mitsubishi, 2006)

O acabamento superficial pode ser influenciado também pelo tipo de usinagem, neste caso se é interno ou externo. O revestimento da ferramenta que será utilizada auxilia no acabamento superficial, pois pode-se evitar arestas postiças de corte (APC). Se o raio de ponta da ferramenta for maior o acabamento superficial tem um melhor resultado, uma vez que o acabamento sofre influência direta do raio de ponta. Quanto maior as taxas de avanço, maior será a rugosidade, pois assim como o raio de ponta, o avanço tem influência direta sobre o acabamento. Com isso ao diminuir o avanço o acabamento superficial sofre melhoras, porém diminui a eficiência da produção. Com isso, é necessário definir o avanço de modo que tanto a eficiência de usinagem quanto o acabamento superficial possam ser alcançados.

Em alguns casos a pastilha alisadora é utilizada para melhorar o acabamento superficial, e assim, possibilitar a utilização de avanços superiores aos tradicionais para que seja possível alcançar a rugosidade requerida. Isso ocorre em sua maioria para um grande aumento da produtividade sem perder a qualidade do acabamento superficial.

De modo geral, no Brasil as medições de rugosidade em sua maioria são aferidas em Ra ou Rz. O Ra é a média do acabamento superficial ao longo de um determinado comprimento, ou seja, é uma média aritmética.

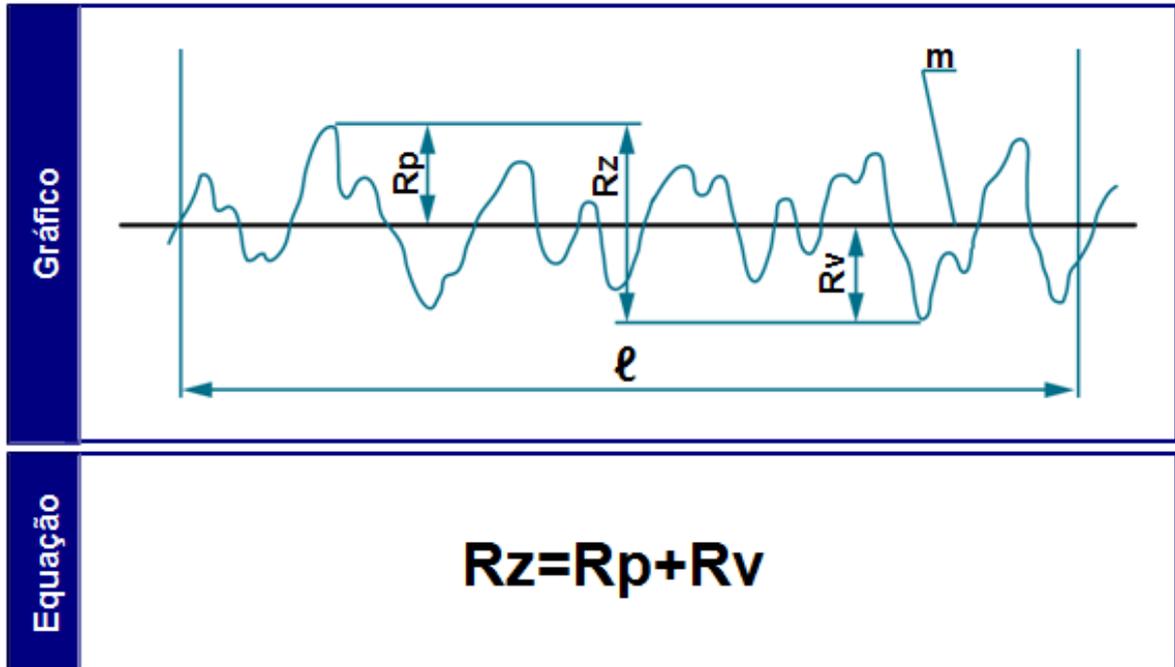
Figura 45 - Rugosidade Ra



Fonte: Adaptado de (Mitsubishi, 2006)

O parâmetro Rz é a uma medida de rugosidade em micrometro (μm). A aferição é realizada ao longo de um determinado comprimento de referência, e dentro do que o comprimento de referência Rz representa a diferença máxima na altura entre os vales superiores (Rp) e inferiores (Rv). De uma forma simplificada é a diferença do maior pico para o maior vale.

Figura 46 - Rugosidade Rz



Fonte: Adaptado de (Mitsubishi, 2006)

4. MATERIAIS E MÉTODOS

4.1 MATERIAIS

Torno CNC GL204M: foi usado para os testes laboratoriais de desgaste o torno CNC GL204M, usinando tarugos de ABNT 8620 com dimensões de 85x335mm, usando o programa feito manualmente no sistema FANUC.

As amostras foram submetidas a diferentes velocidades de corte para os dois revestimentos. Estas amostras tiveram um critério de vida pré-determinado ($V_B = 0,3\text{mm}$). As velocidades de corte foram fixadas em 350, 400, 450 e 500 m/min. Estas velocidades estão dentro do aceitável para todos os revestimentos.

Figura 47 - Torno CNC da marca ROMI modelo GL 240M



Fonte: Paula (2016)

Pastilhas de Metal Duro: foram utilizados dois tipos de revestimentos nas pastilhas de metal duro, onde cada uma delas foi produzida em um processo de revestimento diferente (PVD e CVD). Porém ambas na mesma geometria que é a WNMG080408-TM, conforme Figura 48.

Figura 48 - Quebra-cavaco TM utilizado nos ensaios da pesquisa



Fonte: Tungaloy (2012)

A pastilha de metal duro em PVD foi da classe de revestimento AH120 com dureza aproximada de 91,5 HRA, com resistência à ruptura transversal de 3,0 GPa e com espessura do revestimento de 3 μ m. A Figura 49 apresenta a característica do revestimento PVD do fabricante Tungaloy.

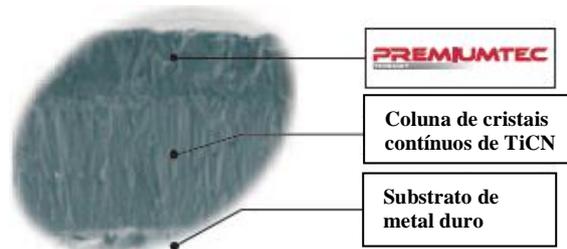
Figura 49 - Família AH de revestimentos PVD



Fonte: adaptado de (Tungaloy, 2012)

Enquanto a pastilha de metal duro em CVD será da classe de revestimento T9115 com dureza aproximada de 91,0 HRA, com resistência a ruptura transversal de 2,5 GPa e com espessura do revestimento de 16 μ m. A Figura 50 apresenta a característica do revestimento CVD do fabricante Tungaloy.

Figura 50 - Família T9100 de revestimentos CVD



Fonte: adaptado Tungaloy (2012)

A Tabela 3 apresenta a composição química das pastilhas utilizadas no experimento e suas devidas características.

Tabela 1 – Característica dos revestimentos PVD e CVD da empresa Tungaloy

Pastilha WNMG060408-TM							
Técnica	Classe	Dureza	Resistência a Ruptura Transversal (GPa)	Espessura do Revestimento (μm)	Revestimento	Aplicação	Substrato
PVD	AH120	90,8	2,8	3	(Ti, Al)N	P15 - P25	WC, TiC, TaC, Co
CVD	T9115	91	2,5	16	TiCN + Al ₂ O ₃ + TiN	P15 - P25	WC, TiC, TaC, Co

Fonte: Adaptado de (Tungaloy, 2012)

Para a caracterização dos substratos, foram utilizadas pastilhas sem revestimento e de superfície plana com a geometria CNMA120408 e exatamente as mesmas composições química das pastilhas já com revestimento e formador de cavaco (WNMG060408-TM T9115/AH725). A composição utilizada para a fabricação do substrato das pastilhas foi WC, TiC, TaC, Co.

4.2 MÉTODOS

Inicialmente as pastilhas de metal duro utilizadas nesta pesquisa foram caracterizadas para assim ter as definições de como as mesmas se encontravam antes de serem utilizadas nos testes laboratoriais. Para tal, foram realizadas análises nas pastilhas somente com o substrato e nas pastilhas com revestimento. As caracterizações nas pastilhas de metal duro foram realizadas no DRX (difração raio-X), Perfilômetro Óptico e MEV (microscópio eletrônico de varredura) antes do seu uso no Laboratório Associado de Sensores e Materiais (LAS) que está localizado no Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE).

Após a caracterização das pastilhas de metal duro e seus revestimentos, as peças de aço SAE 8620 foram colocadas no centro de torneamento para assim realizar os ensaios de usinagem no Laboratório de estudo da usinagem, no Departamento de Materiais e Tecnologia, da Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá da Unesp.

4.2.1 Difração de Raio-X (DRX)

Para a identificação das fases cristalinas presentes nas amostras foi utilizada a técnica de difratometria de raios X, em equipamento da marca Panalytical e modelo X'Pert Powder (fonte de raios X de cobre, $\lambda = 1,54060$ Angstroms). Os parâmetros da análise foram: 2Theta entre 10 e 90°, passo de 0,02 ° e tempo por passo de 20 segundos. O equipamento é o apresentado na Figura 51.

Figura 51 - Equipamento de DRX marca Panalytical e modelo X'Pert Powder do LAS - INPE



Fonte: Produção do próprio Autor

No equipamento fora utilizado o seguinte método:

- Na máquina o *Soller Slit* (um conjunto de folhas paralelas e finas que impedem a divergência angular do feixe fora do padrão) absorve os feixes tortos deixando passar apenas os paralelos, agindo como se fosse um filtro;
- A máscara de 10mm (varia de 5 a 20mm, indo de 5 em 5mm), serve para dar determinada espessura a amostra (limite ou largura);
- Filtro de Níquel;

- Fenda de 1° (limite de altura);
- Fenda automática.

4.2.2 Perfilômetro Óptico

Para medir a rugosidade da superfície das pastilhas a máquina utilizada foi o Perfilômetro Óptico da marca Veeco, modelo WYKO NT1100, conforme Figura 52.

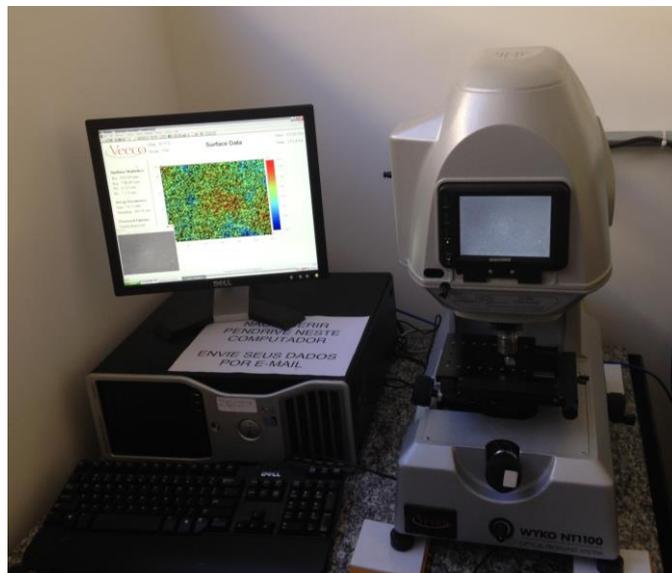
As rugosidades obtidas são especificadas como “Surface Statistics” nas escalas de Ra, Rz, Rt e Rq.

Os parâmetros utilizados (*Set-up Parameters*) foram:

- Dimensões: 736 x 480
- Amostragem: 409,36 nm

Os pontos pretos que podem aparecer e são regiões não localizadas pelo aparelho. OK.

Figura 52 - Perfilômetro Óptico marca Veeco e modelo WYKO NT1100



Fonte: Produção do próprio autor

4.2.3 Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV)

Para realizar a microscopia eletrônica de varredura das pastilhas de metal duro o equipamento utilizado foi o Microscópio Eletrônico de Varredura da marca JEOL, modelo JSM-5310, conforme Figura 53.

Figura 53 - Microscópio Eletrônico de Varredura marca JEOL e modelo JSM-5310



Fonte: Produção do próprio autor

Para realizar a medição do MEV as pastilhas passaram por três processos, que são: foram cortadas afim de se ter uma seção paralela onde possa-se realizar o polimento, para que fiquem com um acabamento superficial excelente e por fim o revestimento de ouro para que possa ser condutora e com isso o aparelho possa realizar as devidas microscopias.

Sendo assim, os processos foram os seguintes:

1 – Para realizar o corte das pastilhas e criar uma seção paralela para polimento, foi utilizada uma máquina de corte da marca SBT (South Bay Technology), modelo Model 650, com tensão de 110V e utilizando uma velocidade de corte (VC) de 6 a 10m/min, conforme Figura 54.

Figura 54 - Equipamento da marca SBT (*South Bay Technology*) e modelo Model 650



Fonte: Produção do próprio autor

O corte das pastilhas foram feitos com um disco de Diamante, avanço constante e refrigeração a água, conforme Figura 55.

Figura 55 - Corte das pastilhas



Fonte: Produção do próprio autor

2 – Após cortadas as pastilhas receberam o polimento na face onde houve o corte. Para isso foi utilizada a máquina Politriz Lixadeira Metalografica, modelo PL02E, pasta de diamante para desbaste de $1\mu\text{m}$ e de acabamento de $0,25\mu\text{m}$ (seringa de pasta azul) e o Seletor Eletrônico de Velocidade em modo Alto, conforme Figura 56.

Figura 56 – Equipamento da marca Politriz Lixadeira Metalografica e modelo PL02E - INPE



Fonte: Produção do próprio autor

Realizou-se o polimento das amostras até que as mesmas estivessem com qualidade superficial excelente, ficando “espelhadas” e sem apresentar nenhum tipo de riscos na região próxima ao revestimento, para assim, realizar a análise no MEV.

3 – O material em seguida passou por um processo *Sputtering* para que haja o revestimento de ouro na amostra, e com isso a mesma se torne condutora para que possam ser realizadas as análises por MEV.

O equipamento utilizado para o revestimento de ouro foi a máquina DENTON VACCUN, modelo DESKII, conforme Figura 57.

Figura 57 - *Sputtering* marca DENTON VACCUN, modelo DESKII - INPE



Fonte: Produção do próprio autor

Após a deposição do ouro, as amostras de pastilhas revestidas em CVD e PVD foram retiradas e estavam ambas com o revestimento de Ouro, conforme Figura 58.

Figura 58 - Pastilhas revestidas com ouro



Fonte: Produção do próprio autor

Após o material revestido com ouro, o mesmo foi colocado no equipamento de MEV envolto com uma fita de carbono para que possa ser realizada a condução dos elétrons.

4.2.4 Usinagem

A matéria prima para os testes laboratoriais de usinagem foram adquiridas com diâmetro de 86mm e comprimento de 335mm, chegando de forma bruta e acima das medidas limites para fixação no torno, conforme Figura 59. Porém, foi alterado conforme dimensionamento da Figura 60.

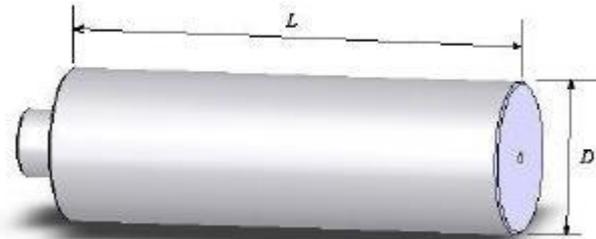
Todos os ensaios de usinagem foram executados no Laboratório de Estudo de Usinagem, no Departamento de Materiais e Tecnologia, da Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá da UNESP.

Figura 59 - Matéria prima para usinagem, SAE - 8620



Fonte: Produção do próprio autor

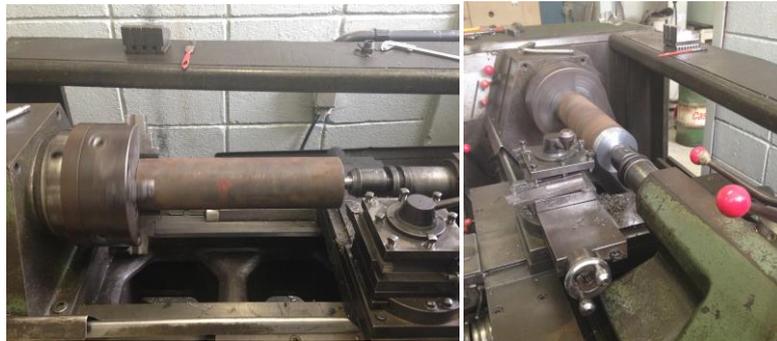
Figura 60 - Eixo modificado para fixação no torno CNC



Fonte: Adaptado de (Gama, 2014)

O processo de alteração dos eixos foi realizado no Torno Mecânico da marca IMOR e nele foram realizadas as usinagens de um rebaixo para fixação na castanha do Centro de Torneamento, conforme apresentado na Figura 61. Após usinados, os eixos foram levados para o Torno CNC para iniciar os testes de usinagem, conforme Figura 62.

Figura 61 - Preparação e modificação dos eixos



Fonte: Produção do próprio autor

Figura 62 - Eixos após modificação



Fonte: Produção do próprio autor

No Torno CNC foram fixadas as pastilhas de metal duro da marca Tungaloy no suporte *capto* da marca Seco Tools, conforme apresentado abaixo:

- PVD: WNMG060408-TM AH120
- CVD: WNMG060408-TM T9115
- Capto: C3-PWLNL22040-06

Para realização dos testes, as pastilhas foram montadas no suporte tipo *capto* (Figura 63) alternadamente, ou seja, foram realizados testes com uma por vez com o objetivo de uma análise prévia dos dados ao longo dos testes.

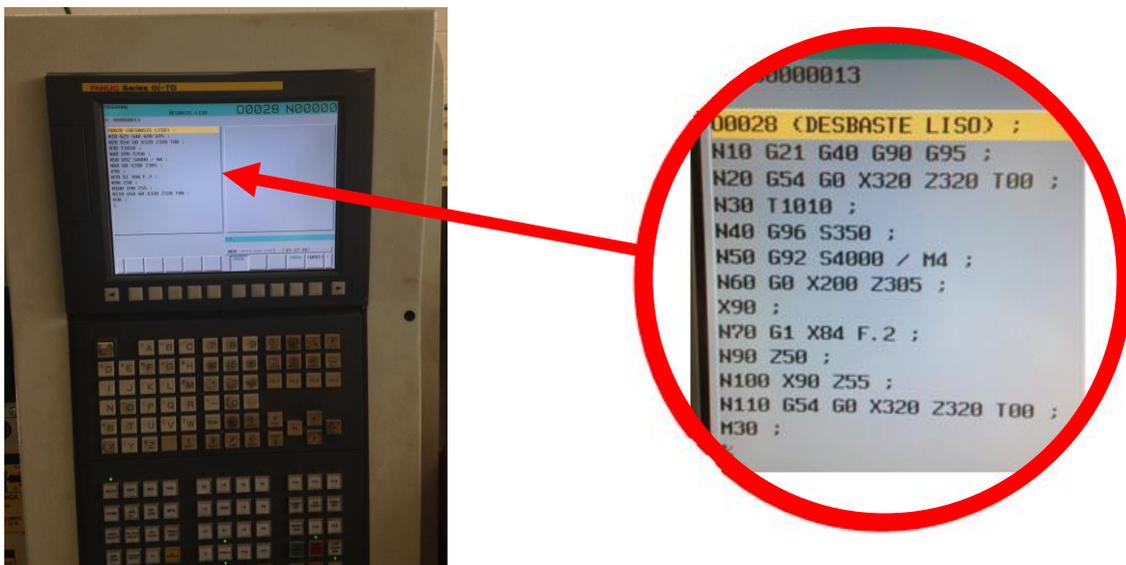
Figura 63 - Capto C3 com a pastilha PVD



Fonte: Produção do próprio autor

No programa a condição variável para cada teste era a velocidade de corte, pois todas as outras condições permaneceram inalteradas.

Figura 64 - Programa utilizado para usinagem



Fonte: Produção do próprio autor

Onde:

00028 = nome do programa, neste caso (Desbaste Liso);

N10 = define o número da sequência. Cada sequência pode ser identificada por uma sequência numérica que vai de um a quatro números após a letra “N”;

G21 = referência a unidade de medida (métrico);

G40 = cancela a compensação de raio da ferramenta;

G90 = sistema de coordenadas absolutas;

G95 = estabelece o avanço x/rotação;

G54 = referência de coordenadas de trabalho;

G0 = avanço rápido;

X = posição do eixo transversal (absoluto);

Z = posição do eixo longitudinal (absoluto);

T00 = a função “T” informa qual ferramenta será selecionada à máquina com todas as suas respectivas informações de pre-set, neste caso está informando que se deve zera qualquer informação anterior;

T1010 = a função “T” está estabelecendo qual ferramenta está sendo utilizada, neste caso ferramenta 10 e corretor 10 (1010);

G96 = estabelece programação em velocidade de corte constante, que é informada na sequência pela letra “S” e o valor;

G92 = estabelece o limite de rotação (RPM), que é informada na sequência pela letra “S” e o valor limite;

M4 = gira o eixo árvore no sentido anti-horário;

F = função avanço, que indica o avanço da ferramenta;

M30 = final de programa e retorno.

4.2.4 Medições de desgaste e rugosidade

Durante a usinagem, a cada parada de máquina as peças tinham sua rugosidade medida por um rugosímetro Mahr, modelo MarSurf300 M30 e o MarSurf RD18, onde através deles eram obtidas as rugosidades Ra e Rz. Para a análise da rugosidade se utilizou a rugosidade Ra e Rz, estas rugosidades estão relacionadas com o *cut-off*. O *cut-off* é o valor que relaciona a distância dos sucos que são gerados pelo avanço (f) da ferramenta enquanto ocorre o processo de usinagem. Como o avanço (f) utilizado foi de 0,2mm, se utiliza o *cut-off* de 0,8mm

conforme indicado pela Norma NBR 6405/1988. Este valor é recomendado para sucos entre 0,1 a 0,3mm.

Figura 65 - Rugosímetro Mahr, modelo MarSurf300 M30 e o MarSurf RD18



Fonte: Gama (2014)

Durante as paradas de máquina, a pastilha era retirada do Capto e levada até o microscópio Mahr, modelo MarVision MM200 com deslocamento micrométrico (Figura 66).

Neste microscópio a pastilha era analisada visando identificação dos desgastes de flanco, afim de que quando fosse atingido o VB limite de 0,3mm o teste fosse interrompido e uma nova peça e pastilha fossem montadas para testes, alterando a variável que era a velocidade de corte quando necessário (conforme programação).

Figura 66 - Microscópio Mahr modelo MarVision MM200



Fonte: Gama (2014)

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 Estrutura química das pastilhas

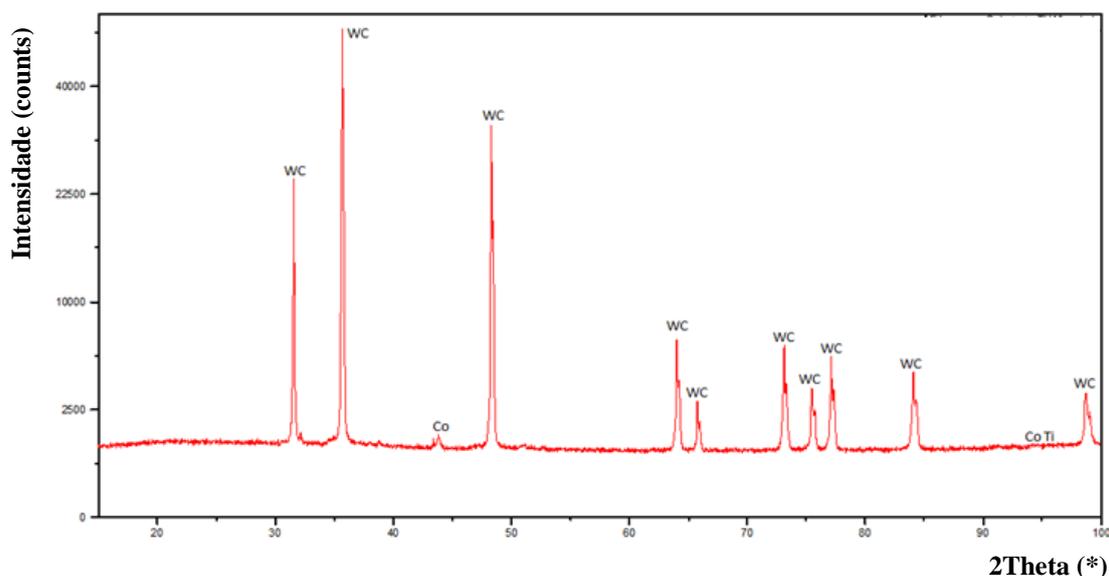
Conforme Figura 67 abaixo, o material que é utilizado como substrato para a técnica de revestimento CVD, é possível identificar WC, Co e CoTi. Estes elementos são a base química da metalurgia do pó, utilizado para a confecção do substrato.

O elemento que aparece em maior quantidade é o WC, isso se dá porque esta é a base do substrato e sua mistura é a maior porção da metalurgia do pó para pastilhas de metal duro.

Pode-se observar também o Co e o mesmo misturado com o Ti, mas ambos em menor quantidade e destaque, pois são complementos da mistura.

Por se encontrar em pequena quantidade comparado aos demais elementos da composição química deste substrato, não é possível encontrar Ta na composição.

Figura 67 - Difração Raio-X do substrato do CVD



Fonte: Produção do próprio autor

Quando a pastilha recebe o revestimento pela técnica CVD, a sua camada recebe o nome de T9115, conforme denominado pelo fabricante Tungaloy.

Na Figura 68 pode-se observar o grande volume de Al_2O_3 que se encontra na composição. Isso se dá porque a maior parte do revestimento, ou seja, a camada mais expressa é destes elementos químicos.

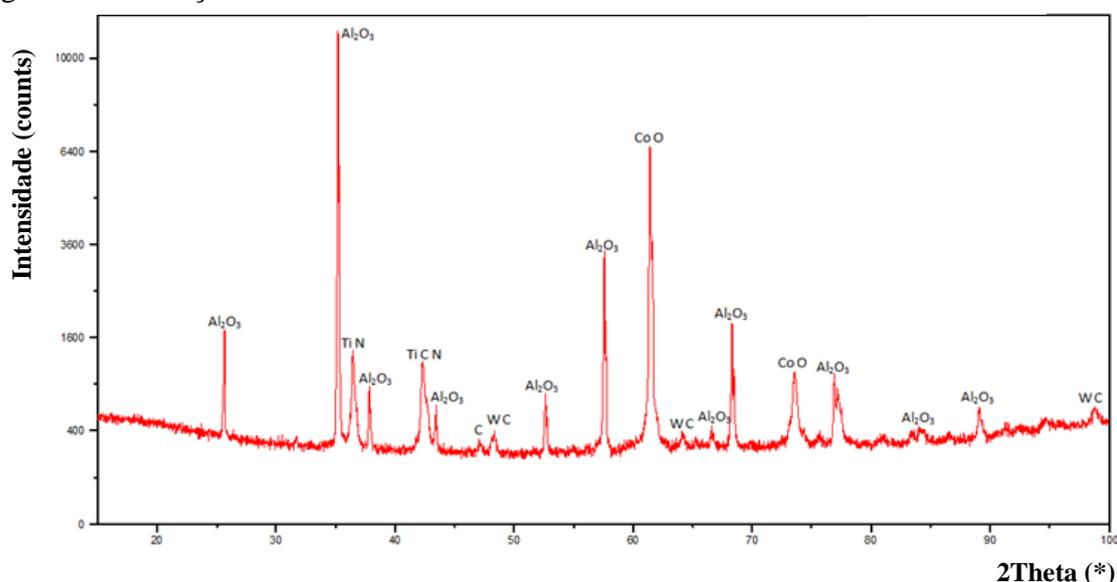
O Co é utilizado como material base do substrato, mas pode-se observar que o mesmo precipita e se difunde com a camada de Al_2O_3 e por este motivo o O acaba se difundido com o Co, com isso, forma-se o CoO .

Além disso, pode-se encontrar os elementos químicos TiN e TiCN. Estes elementos são de camadas que se antecedem uma a outra, sendo assim, pode-se notar a proximidade das mesmas e como não tem uma grande quantidade aparece apenas em poucos pontos.

Mesmo sendo uma camada espessa de revestimento, é possível identificar o WC e o C que são a base de todo o substrato.

O elemento não encontrado foi o Ta, possivelmente por ser o elemento que se encontra em menor quantidade na mistura não é possível de ser identificado.

Figura 68 - Difração Raio-X do revestimento CVD



Fonte: Produção do próprio autor

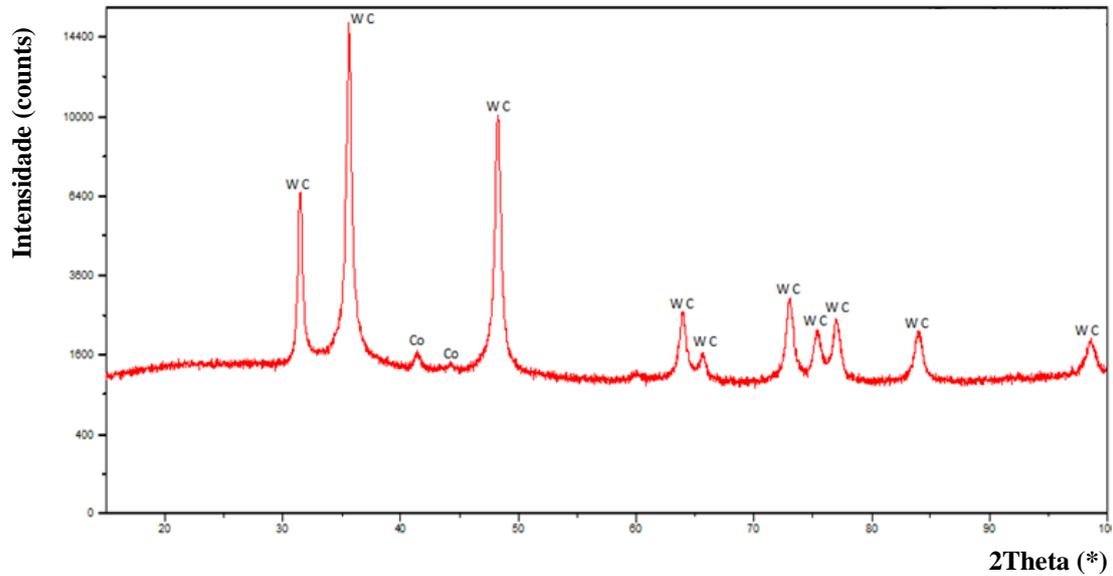
Conforme Figura 69, o material que é utilizado como substrato para a técnica de revestimento PVD, é possível identificar WC e Co. Estes elementos são a base química da metalurgia do pó, utilizado para a confecção do substrato.

Diferente do substrato anterior não é possível identificar o Ti, isso possivelmente ocorre porque este elemento químico assim como o Ta estão em pequena quantidade na mistura.

Assim como no substrato do processo de revestimento anterior, este apresenta uma grande concentração de WC e isso é possível porque o mesmo também é a base para este substrato.

Observa-se também o Co mas em menor quantidade ou volume, isso porque na mistura do substrato o mesmo encontra-se em menor quantidade.

Figura 69 - Difração Raio-X do substrato do PVD



Fonte: Produção do próprio autor

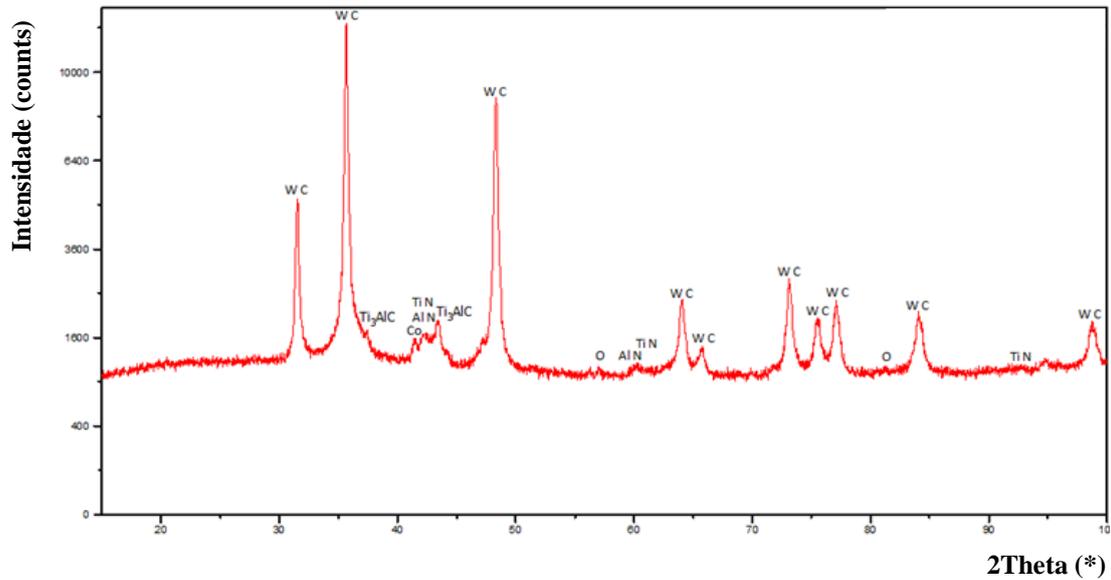
Quando a pastilha recebe o revestimento pela técnica PVD, a sua camada recebe o nome de AH120 para este caso, conforme denominado pelo fabricante Tungaloy.

Na Figura 70 pode-se observar o grande volume de WC que se encontra na composição. Isso se dá porque a maior parte do substrato é destes elementos químicos, pois ele é a base. Acaba aparecendo em maior quantidade que no revestimento anterior porque este revestimento tem uma espessura muito menor que o outro, em sua grande maioria mais de 5 vezes menos espessa.

Por ser um revestimento de (Al, Ti)N, encontra-se as diferentes combinações destes elementos, onde aparece como AlN ou TiN e em um dado momento o Al e o Ti acabam se combinando formando assim o Ti_3AlC .

Assim como observado na análise feita nas microscopias eletrônicas por varredura, o O também aparece na difração raio-X, possivelmente por algum efeito do forno de revestimento.

Figura 70 - Difração Raio-X do revestimento PVD



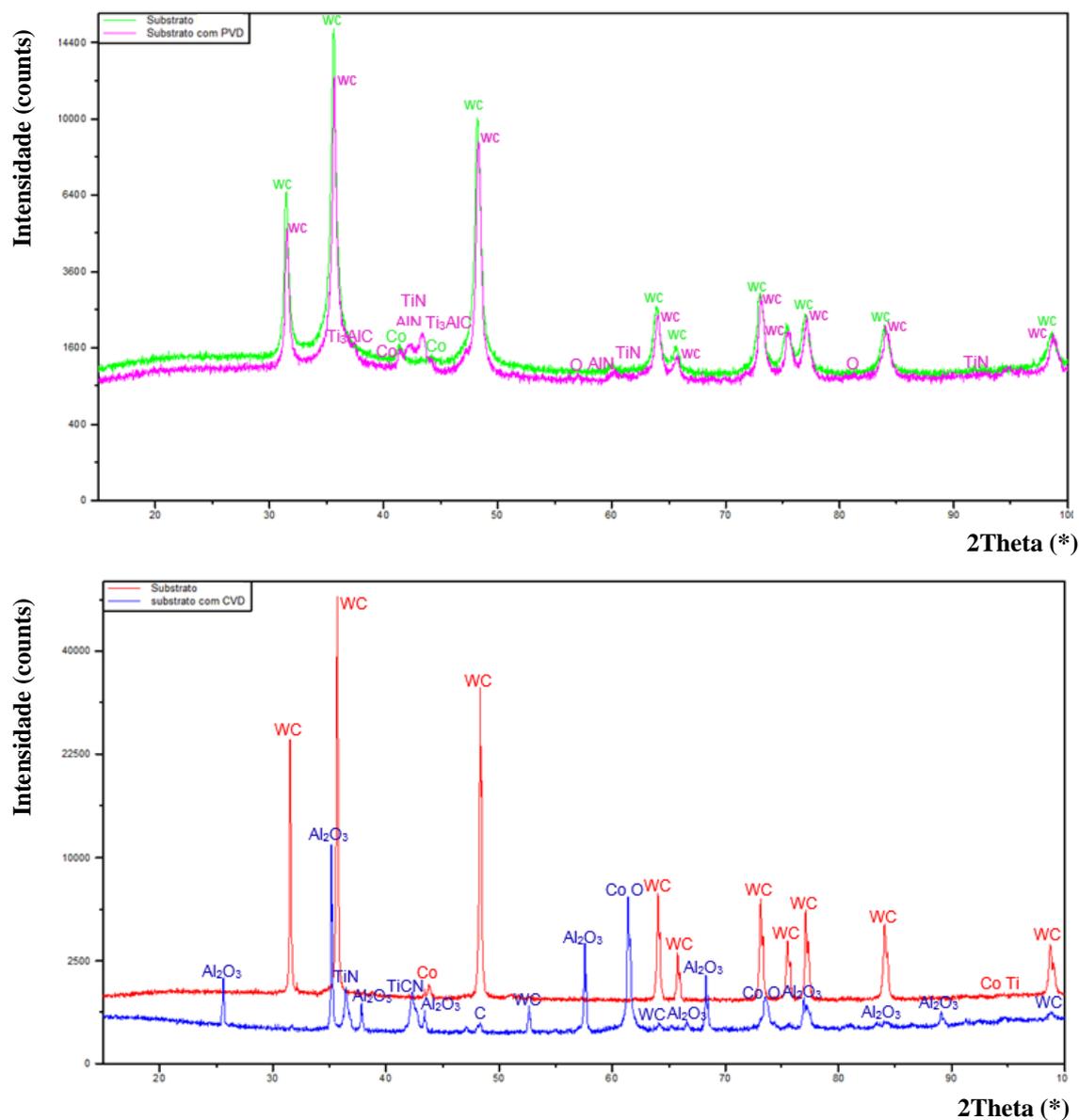
Fonte: Produção do próprio autor

Quando se analisa os revestimentos juntamente com os substratos, pode-se observar uma grande diferença entre as técnicas e isso se dá devido ao fato de no caso da técnica CVD a camada de revestimento tem uma espessura 16 μ m enquanto no caso da camada de PVD essa espessura é de 3 μ m.

Essas grandes diferenças nas espessuras fazem com que na análise da difração raio-X tenha um comportamento completamente diferente entre os casos, tendo assim apenas no caso da PVD uma grande similaridade com seu revestimento.

Conforme Figura 71 pode-se observar essa diferença entre os casos.

Figura 71 - Difração Raio-X, Substrato vs Revestimento

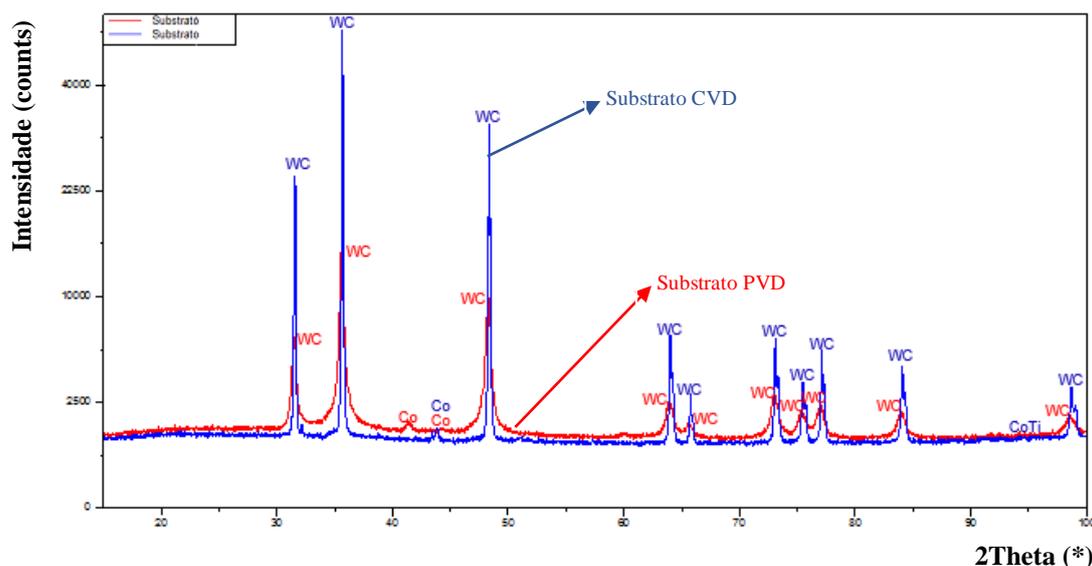


Fonte: Produção do próprio autor

Quando realiza-se a mesma análise cruzando os substratos, pode-se observar um padrão entre eles, sendo assim, pode-se afirmar que os dois substratos têm as mesmas composições nas mesmas quantidades e propriedades. Possivelmente a única diferença entre os substratos seja o tamanho do grão entre eles para que haja a afinidade química dos revestimentos, em especial no caso da técnica CVD.

Na Figura 72 pode-se observar a similaridade entre os substratos.

Figura 72 - Difração Raio-X, Substratos CVD vs PVD



Fonte: Produção do próprio autor

5.2 Microscopia das pastilhas

Nas Figuras 73 e 74 são apresentadas as imagens e os gráficos obtidos através da técnica *linescan* e que apresentam dois cenários diferentes.

Na amostra revestida com a técnica CVD observa-se que há uma concentração dos elementos químicos na região onde há o revestimento e pouca difusão destes elementos no substrato, com exceção do C que aparece de forma uniforme em todo o gráfico. Isso se dá porque o C é um dos elementos químicos do substrato e também do revestimento.

Para entender melhor os picos (elementos) que aparecem no gráfico CVD, tem-se que analisá-los separadamente.

Al e O – Os picos existentes no fim do gráfico de Al seguido de O se dá porque uma das camadas do revestimento é Al_2O_3 . Esta camada é a mais espessa do revestimento, fazendo com que esses dois elementos apareçam em grande quantidade na região revestida.

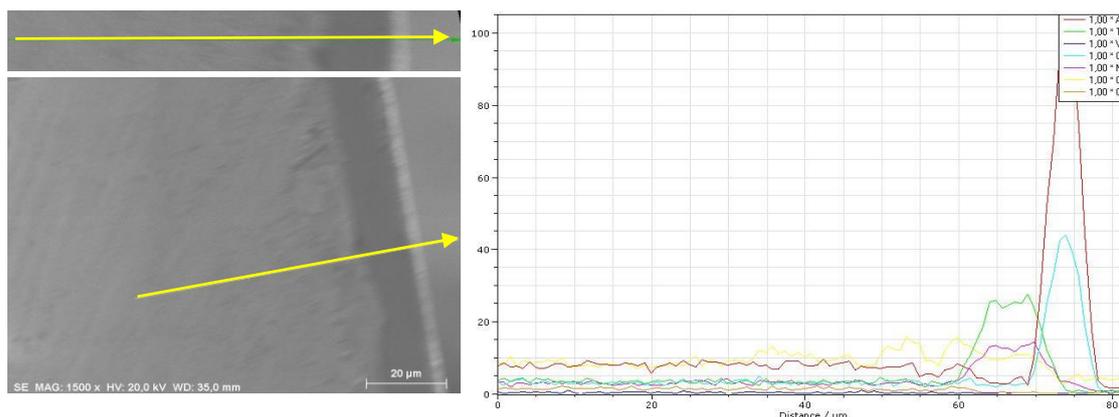
Ti e N – Dois elementos que também aparecem em destaque são o Ti e o N, ambos têm picos expressivos antes dos de Al e O, isso ocorre porque uma das camadas é composta por TiN e normalmente é uma das últimas.

C – Outro elemento que aparece, porém de forma mais discreta é o C, este por sua vez aparece mais uniforme ao longo do gráfico, isso se dá porque ele é um elemento base do substrato (WC) e também na região revestida existe uma camada de TiCN.

W – Um dos dois elementos que aparece de uma forma mais uniforme e constante ao longo da amostra é o W, pois ele é a base do substrato.

Co – O elemento que tem um comportamento parecido com o do W é o Co. Este elemento também é utilizado no substrato e por este motivo aparece de uma forma mais uniforme e organizada.

Figura 73 - Linescan da pastilha com a classe de revestimento CVD T9115



Fonte: Produção do próprio autor

Diferente da amostra anterior, a revestida com a técnica PVD tem uma grande difusão dos elementos para o substrato e uma certa desorganização dos mesmos. Os elementos químicos não se encontram concentrados apenas em uma determinada região como de base ou camada, mas sim ao longo de toda área analisada.

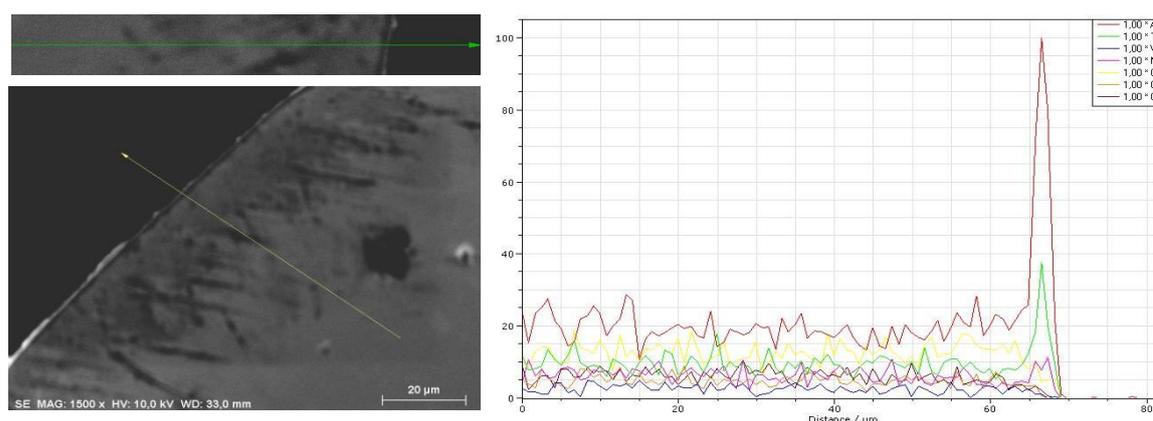
Al, Ti e N – Este tipo de revestimento tem como base Al, Ti e N, por este motivo tem a grande tendência destes aparecerem em maior quantidade (picos). Em sua grande maioria, o revestimento PVD para ferramentas de corte tem de 2 a 5µm, logo, ao analisar o gráfico podemos observar que é exatamente a região de maior concentração dos elementos.

W e Co – Assim como na técnica de revestimento anterior, nesta o W e o Co são elementos que fazem parte do substrato e por este motivo aparecem de forma uniforme ao longo da região analisada.

C – Um elemento que aparece de forma mais concentrada no substrato é o C, com uma grande tendência de queda próximo do revestimento, isso se dá porque ele é um elemento base do substrato (WC) e não da camada revestida.

O – Um elemento que aparece, porém de forma muito discreta é o O. Este elemento químico não é utilizado no revestimento ou no substrato, mas deve ser proveniente da oxidação de algum outro elemento durante a sinterização da pastilha no forno. Pode-se observar que praticamente não há O na região revestida, mas uma pequena difusão do mesmo no começo do revestimento, porém, logo próximo do fim do mesmo o elemento já não existe mais.

Figura 74 - *Linescan* da pastilha com a classe de revestimento PVD



Fonte: Produção do próprio autor

Para entender se houve de fato difusão dos elementos químicos do substrato para o revestimento e do revestimento para o substrato, se utilizou a técnica de *mapping* para realizar esta análise.

Nas Figuras 75 e 76 apresentam-se as imagens obtidas através da técnica *mapping* e que apresentam dois cenários diferentes. Para ambas as amostras, nesta técnica se retirou o elemento químico C para que fosse uma melhor visualização, uma vez o que mesmo se apresentou constante em toda a análise e na técnica PVD a difusão para o revestimento praticamente não ocorreu. É apresentado na Figura 76 a presença de C na técnica de revestimento CVD, o mesmo se encontra totalmente uniforme e quando analisado junto com os demais elementos gerava uma poluição visual, por este motivo fora analisado separadamente.

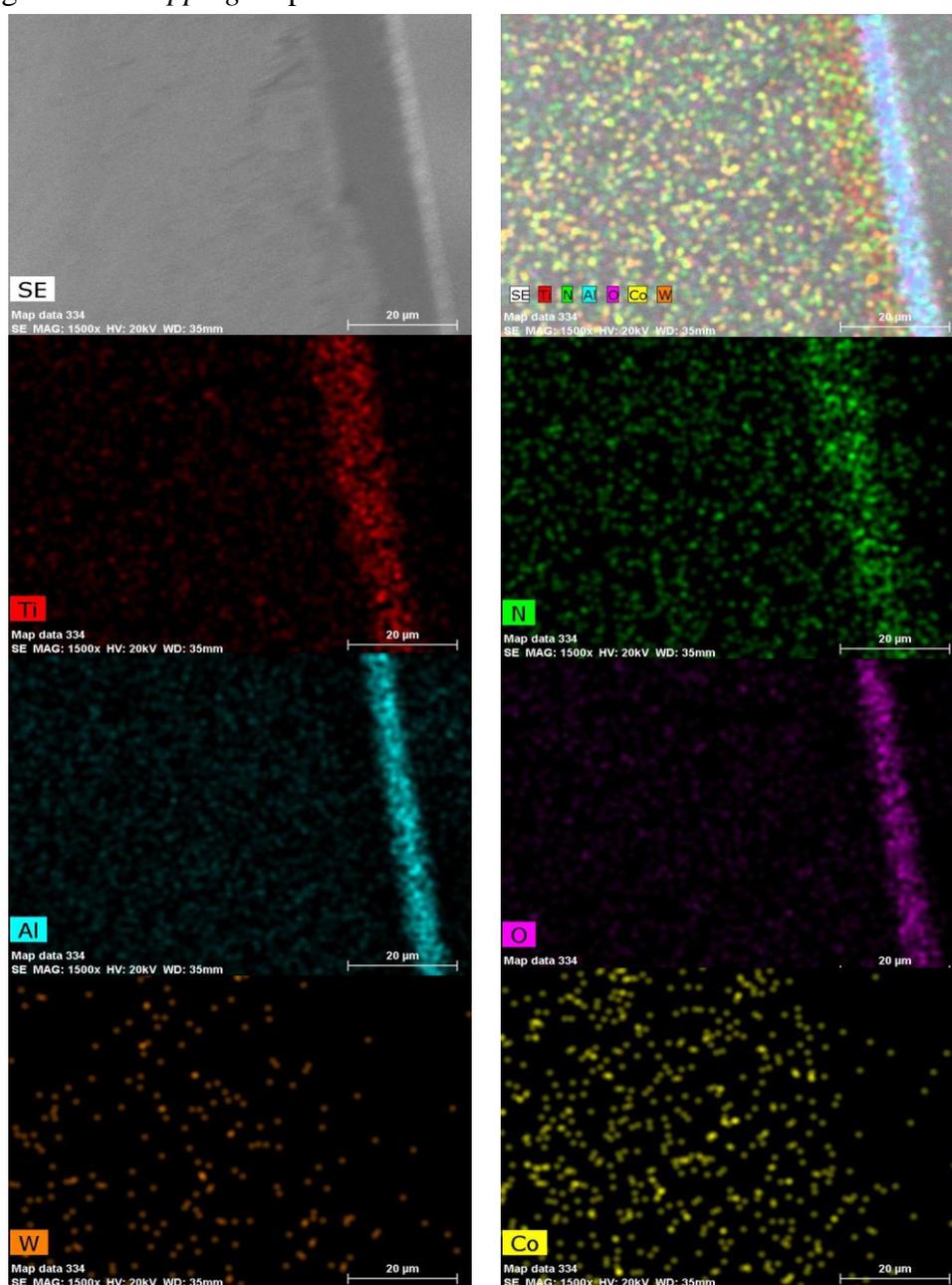
Na amostra da técnica CVD pode-se analisar que os materiais se encontram de forma organizada e com pouca difusão dos elementos do substrato para o revestimento. Tanto na imagem dos elementos juntos quanto nas imagens de cada um separadamente, nota-se que todos os elementos do revestimento acabam se difundindo para o substrato e entre eles.

Ainda na imagem de todos os elementos, pode-se notar que o Ti aparece antes e depois do Al, o mesmo ocorre com o N. Este fato ocorre porque antes do Al existe uma camada de

TiCN e depois existe uma camada de TiN. Por este motivo, existe a grande tendência de ocorrer difusão do Ti e do N entre as camadas e também para o substrato. Pode-se notar que os elementos Al e O estão localizados na mesma região do revestimento, comprovando que aquela camada é a de Al_2O_3 , que antecede a TiN.

Logo acima da camada de Al_2O_3 encontrasse a camada de TiN e isso pode ser observado na Figura 75, pois os elementos Ti e N se encontram na mesma região. Já os elementos base como W e Co encontram-se posicionados na região do substrato e com pouco sinal de difusão destes elementos para o revestimento.

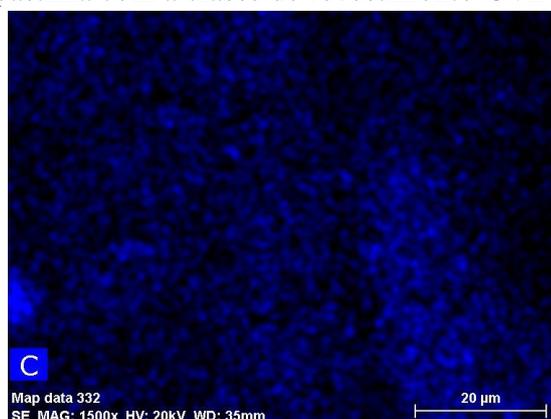
Figura 75 - *Mapping* da pastilha com a classe de revestimento CVD



Fonte: Produção do próprio autor

Ainda analisando a técnica de revestimento CVD e separadamente o C, pode-se observar que o mesmo se encontra de uma forma totalmente uniforme ao longo do substrato e do revestimento, uma vez que o mesmo é utilizado em ambos os casos.

Figura 76 - *Mapping* da pastilha com a classe de revestimento CVD apresentando o C



Fonte: Produção do próprio autor

Na amostra da técnica PVD pode-se analisar que os materiais se encontram de forma mais difundida do revestimento para o substrato.

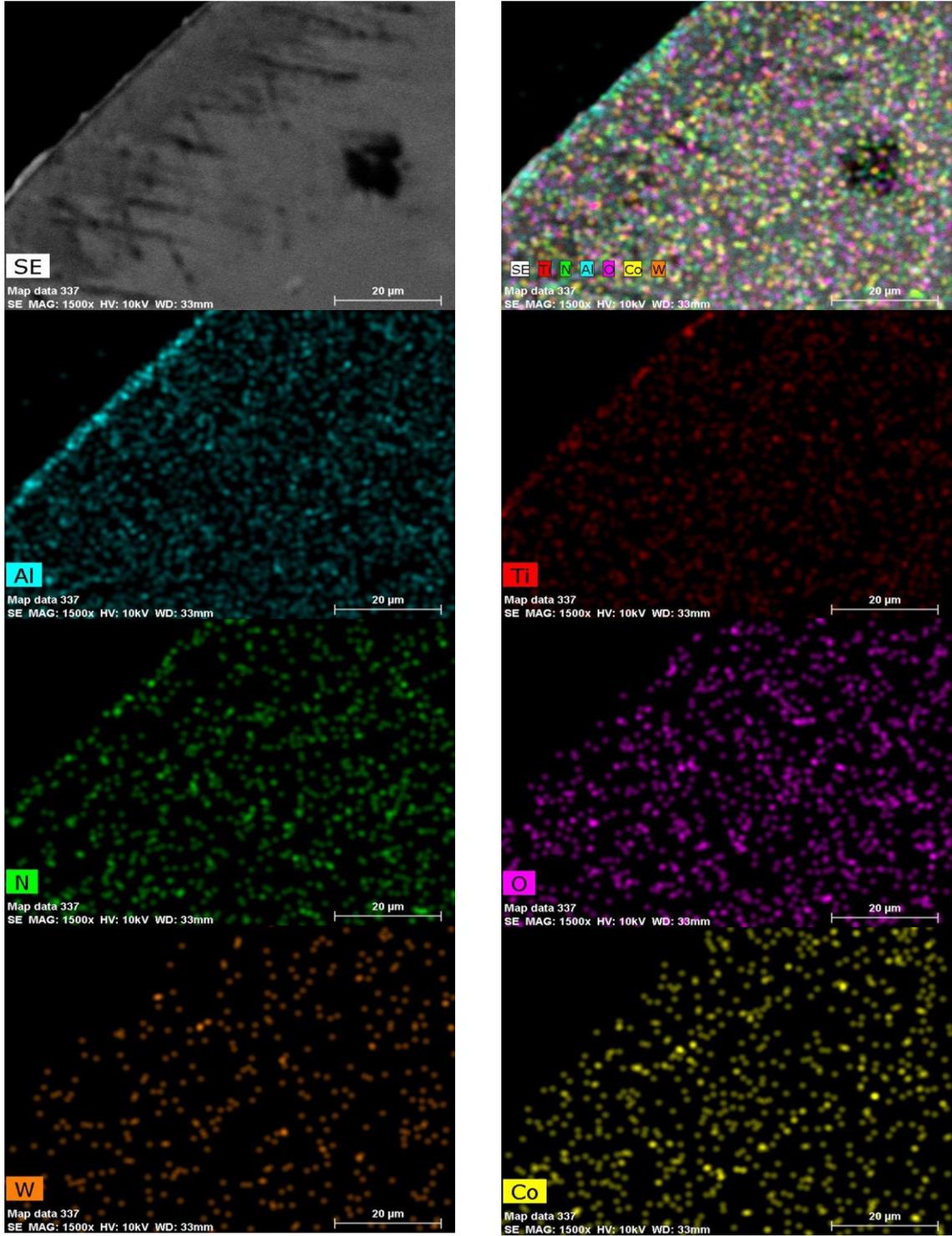
Tanto na imagem dos elementos juntos quanto nas imagens de cada um separadamente, notasse que todos os elementos do revestimento acabam se difundindo para o substrato.

Pode-se notar que os elementos Al e Ti estão na mesma região do revestimento, comprovando que aquela camada é a de (Al,Ti)N, que se encontra diretamente sobre o substrato.

Já os elementos base como W e Co encontram-se posicionados na região do substrato e com pouco sinal de difusão destes elementos para o revestimento.

Um elemento que apareceu de forma surpreendente foi o O, que se apresenta na região do substrato e praticamente não se difundiu para a região do revestimento. Assim como o Co aparece de forma uniforme e bem distribuído na região de análise. E como na técnica de revestimento CVD o C fora analisado separadamente, isso porque o comportamento foi praticamente igual ao da técnica anterior e também porque o mesmo quando analisado junto aos demais elementos dificultava a melhor análise do O.

Figura 77 - Mapping da pastilha com a classe de revestimento PVD

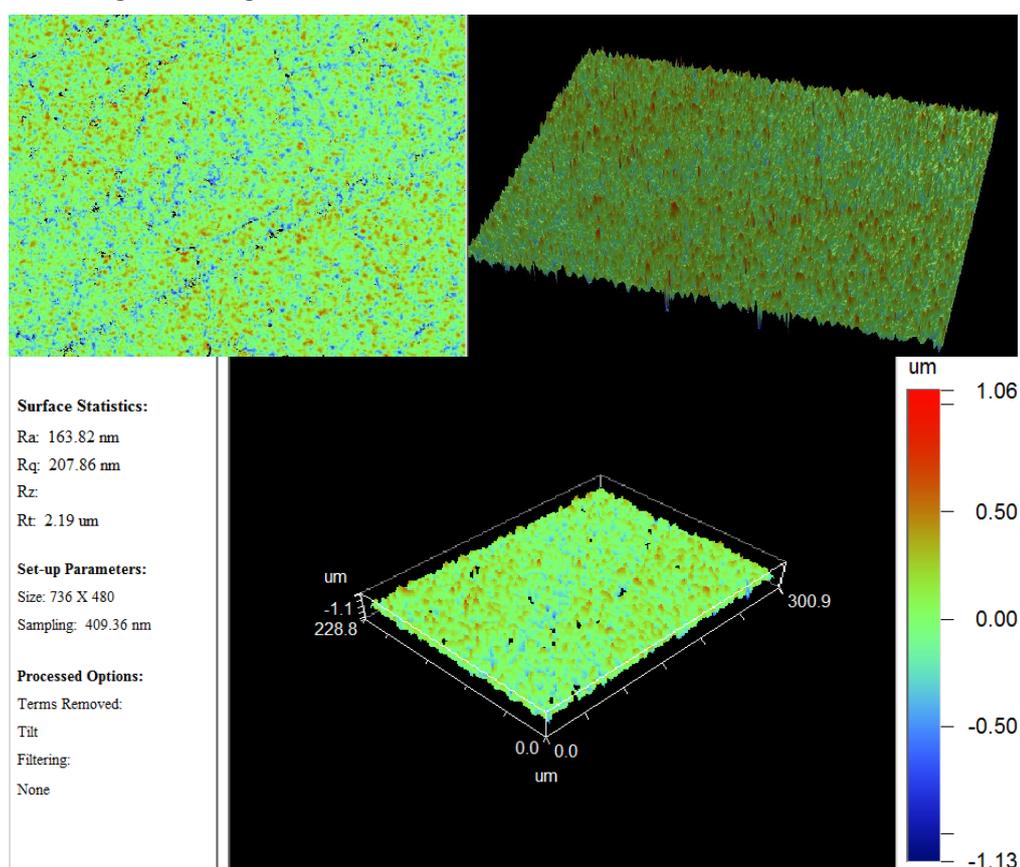


Fonte: Produção do próprio autor

5.3 Rugosidade superficial das pastilhas

Conforme Figura 78, observa-se a rugosidade afim de verificar seu padrão na superfície e no flanco das amostras.

Figura 78 - Imagem da rugosidade da face do CVD



Fonte: Produção do próprio autor

Conforme apresentado na Figura 78, as medidas da rugosidade se encontram em nanômetro (nm) e foram analisadas pela imagem superficial e 3D como acima. Para ter uma clareza e um número mais preciso, foram medidos diversos pontos na superfície de saída e no flanco da pastilha. Como a face de saída que é o ponto por onde se escoia o cavaco, tem seu perfil definido pelo punção (superior e inferior). Já o flanco que é a região onde sofre maior interferência de calor, tem seu acabamento definido pelas paredes da matriz. A pastilha é extraída da matriz pelo punção inferior, como consequência disso o flanco desliza pelas paredes e tende a ter seu acabamento mais prejudicado.

Conforme pode-se observar na Tabela 1 a seguir, a rugosidade das amostras quando revestidas tem um acabamento superficial melhor e com isso um Ra menor, o que não acontece com o flanco que por sua vez tem o acabamento superficial pior do que quando a pastilhas estava sem o revestimento.

No caso do revestimento CVD o acabamento superficial da face é mais de 3 vezes menor do que quando sem o revestimento. Possivelmente isso se dá devido ao fato das diversas camadas que acabam reduzindo a rugosidade.

O revestimento PVD por sua vez teve uma redução na rugosidade da amostra revestida para apenas o substrato, porém o valor não seja tão alto como no caso da técnica de revestimento anterior devido ao fato de que o PVD é uma única camada e que sua espessura é muito fina se comparado ao CVD. Ocorreu o mesmo caso do revestimento anterior, o flanco tem uma rugosidade superior à da face.

Com base neste dado pode-se observar que o acabamento da face sempre será menor que o do flanco.

Tabela 2 - Rugosidade superficial das pastilhas utilizadas na pesquisa

Valores da Rugosidade em Ra (nm)								
Tipo de Material	Substrato		Revestimento		Substrato		Revestimento	
	do CVD		T9105		do PVD		AH120	
Pontos/Região	Face	Flanco	Face	Flanco	Face	Flanco	Face	Flanco
1	595,04	472,6	162,45	573,79	402,27	492,65	358,69	425,04
2	546,66	549,01	159,18	562,84	413,06	450,47	361,48	442,6
3	537,66	507,66	163,82	499,53	405,52	449,38	365,44	466,21
4	560,38	540	166,61	489,35	394,17	422,65	378,42	430,08
5	532,37	532,67	157,83	513,28	424,91	451,76	381,71	493,37
6	513,94	502	160,48	497,35	418,42	403,38	385,82	444,06
7	522,31	493,62	165,86	508,87	410,22	401,87	390,04	425,32
Média	544,05	513,94	162,32	520,72	409,8	438,88	374,51	446,67
Desvio Padrão	27,17	27,58	3,33	33,58	10,27	32,13	12,51	25,12

Fonte: Produção do próprio autor

5.4 Formação do cavaco

Durante a usinagem o material removido sofre grandes deformações até seu escoamento sobre a superfície da ferramenta, com isso, forma-se o cavaco, onde este por sua vez, tem sua espessura alterada e com isso torna-se mais espesso e o comprimento se torna mais fino. Na região onde esta transformação ocorre, há uma necessidade maior de potência ou de energia para que possa deformar o material, por este motivo há uma grande geração de calor e um aumento da resistência ao corte.

No Quadro 7 pode-se observar os cavacos gerados no processo de torneamento utilizando cada técnica de revestimento.

Quadro 6 – Cavacos gerando durante o torneamento do aço SAE 8620

	Revestimento CVD	Revestimento PVD
V_c = 350 m/min f = 0,2 mm/rot ap = 1 mm (no raio) usinagem a seco		
V_c = 400 m/min f = 0,2 mm/rot ap = 1 mm (no raio) usinagem a seco		
V_c = 450 m/min f = 0,2 mm/rot ap = 1 mm (no raio) usinagem a seco		
V_c = 500 m/min f = 0,2 mm/rot ap = 1 mm (no raio) usinagem a seco		

Fonte: Produção do próprio autor

Em uma análise do Quadro 7, pode-se observar que os cavacos tiveram comportamentos parecidos e com isso sua formação foi espiral e com um comprimento limitado em 40 mm aproximadamente na pior condição. Este fato já era esperado, isso porque mesmo alterando a velocidade de corte, o avanço se manteve constante e assim o material removido se manteve dentro da zona de formação do quebra-cavaco ($ap \times f$), portanto, tendo todos a mesma aparência.

Dentre os cavacos gerados durante o torneamento do aço SAE 8620, um destaque para o parâmetro de velocidade de corte de 450 m/min, nas duas técnicas de revestimento, tanto CVD quanto PVD os cavacos tiveram formação e comprimento muito semelhante. Sendo assim, sendo a melhor condição para formação de cavaco, ou seja, para qualquer uma das classes de revestimento, esta velocidade de corte combinada com o a_p e o f tem seu melhor resultado.

Os cavacos ainda que quase em todas as velocidades de corte apresentarem uma espiral com mais de cinco voltas, ainda se enquadram dentro do tipo ideal de formação de cavaco. Este tipo de cavaco em espiral curta é comum durante a usinagem do aço SAE 8620, logo com isso, este ensaio demonstrou que independente da classe de revestimento, a formação de cavaco é a mesma dentro de dados de cortes similares.

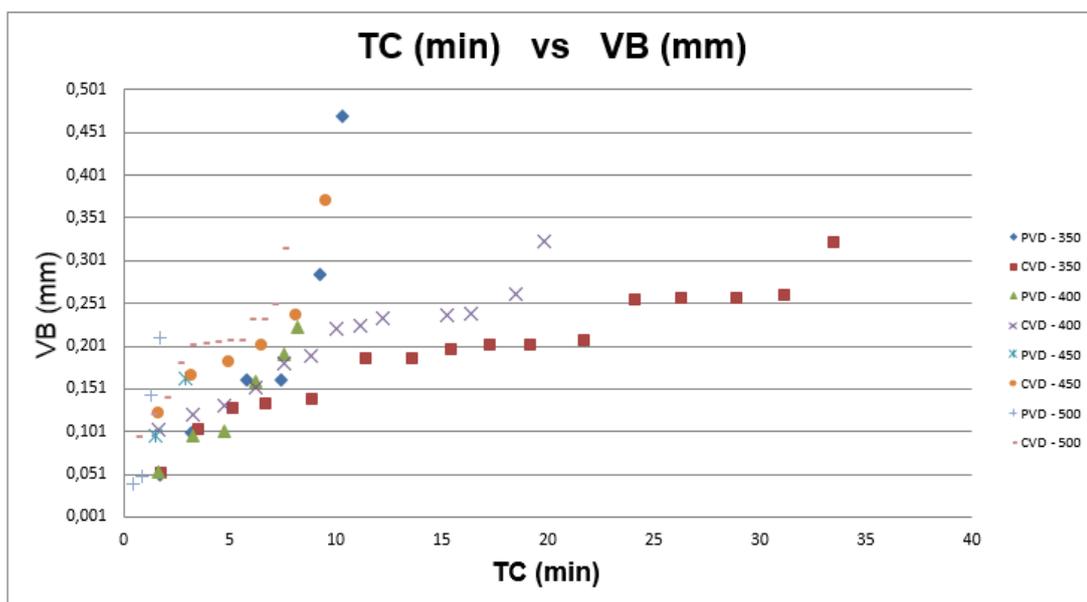
5.5 Vida da ferramenta

Nas Figuras 79 e 80, são apresentadas as vidas das ferramentas em função de cada velocidade de corte utilizada. O critério de vida da ferramenta se entende como o tempo total em que a ferramenta de corte permanece em contato com a peças usinada, até que alcance o critério de vida determinado. Assim que o critério de vida determinado é atingido, a ferramenta de corte é retirada para que não haja danos ao processo ou então uma quebra da mesma. Portanto, utilizando como base o critério de desgaste $V_{Bmáx}$ informado anteriormente, as pastilhas de metal duro revestidas trabalharam até atingir o critério de desgaste de flanco $V_B = 0,3\text{mm}$, este por sua vez, foi definido com o objetivo de se obter um comprimento de corte que possibilitasse o estudo da progressão do desgaste e do comportamento da rugosidade para cada velocidade de corte utilizada.

Na Figura 79 pode-se notar que a classe de revestimento que teve um maior tempo de contato antes de atingir o critério de vida estabelecida foi a técnica de revestimento CVD, isso ocorreu para a velocidade de corte de 350 m/min e para a velocidade de corte de 400 m/min. A pastilha de metal duro revestida de PVD teve um rendimento satisfatório na velocidade de corte de 350 m/min, sendo assim, a melhor condição para a técnica de revestimento PVD.

O critério apresentado na Figura 79 é o desgaste do flanco por tempo de contato.

Figura 79 - Vida da ferramenta para as velocidades de corte variando de 350 a 500 m/min



Fonte: Produção do próprio autor

Na Tabela 3, é apresentado os desgastes de flanco máximo de cada revestimento e suas respectivas velocidades de corte.

Tabela 3 – Vida das pastilhas e V_c (velocidade de corte) de cada revestimento.

V_c	VBmax PVD (mm)	VBmax CVD (mm)
350 m/min	0,470	0,321
400 m/min	0,223	0,324
450 m/min	0,171	0,371
500 m/min	0,210	0,315

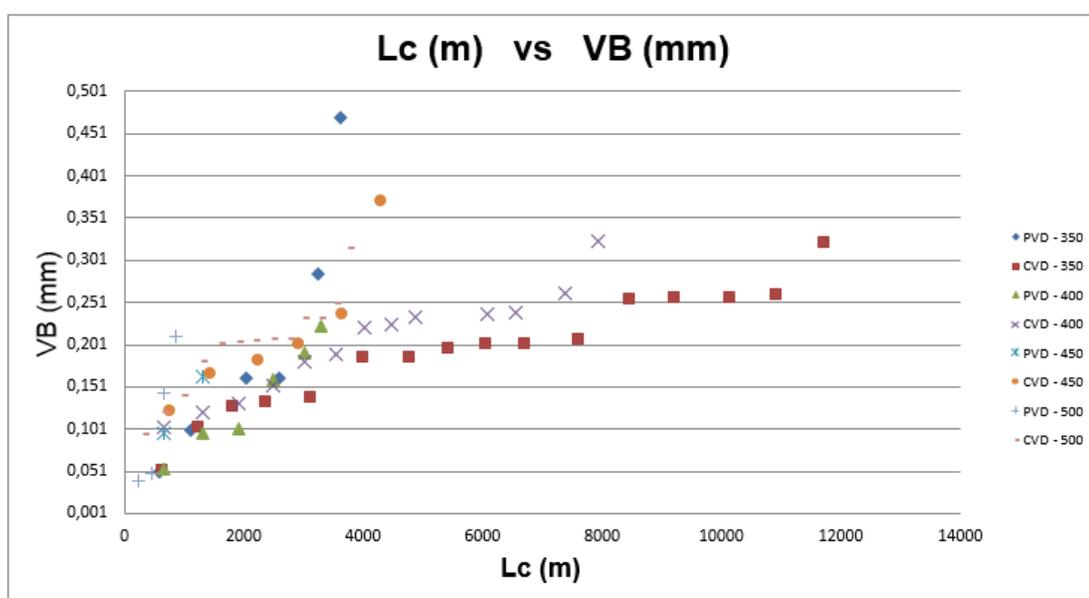
Fonte: Produção do próprio autor

As pastilhas com o revestimento PVD tiveram seus desgastes de flanco (V_B) inferiores a 0,3mm porque apresentaram algo outro tipo de defeito, como entalhe ou quebra. Estes defeitos estão identificados nas e descritos da Figura 81 a 84 com as imagens das arestas de corte.

É apresentado na Figura 80 o critério de vida representada por desgaste de flanco por comprimento usinado.

Neste gráfico nenhuma das velocidades de corte da classe de revestimento PVD obteve um resultado melhor que as velocidades de corte da classe de revestimento CVD, com isso, as pastilhas revestidas com CVD em todos os casos obtiveram um comprimento de corte superior em comparação com a PVD.

Figura 80 - Vida da ferramenta para as velocidades de corte variando de 350 a 500 m/min



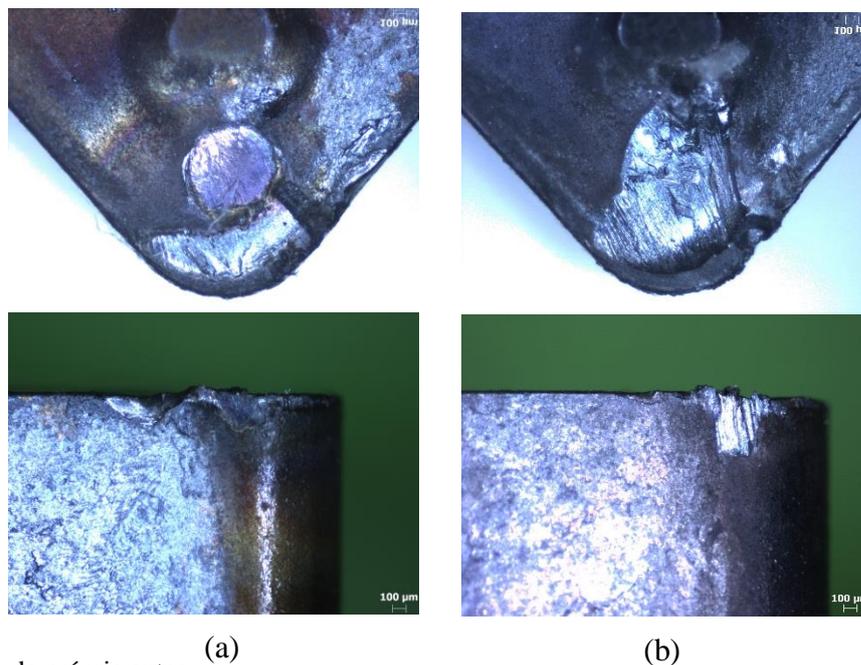
Fonte: Produção do próprio autor

Com base nos gráficos apresentados, pode-se observar que em todas as velocidades de corte utilizadas, as pastilhas revestidas com CVD tiveram um melhor desempenho e uma vida maior ao se comparar com o revestimento PVD.

As Figuras de 81 a 84 apresentam as imagens dos desgastes das arestas de corte de cada revestimento após alcançar o critério de vida estabelecida, para que assim, se possa fazer uma melhor análise. Com estas imagens é possível realizar uma análise macroscópica.

Na Figura 83 pode-se notar o desgaste elevado da pastilha revestida por PVD na superfície de saída e também um desgaste acentuado no flanco ao se comparar com o revestimento CVD.

Figura 81 – Desgastes das pastilhas usadas na usinagem do aço SAE 8620 com parâmetro de velocidade de corte de 350 m/min com revestimento CVD (a) e revestimento PVD (b)



Fonte: Produção do próprio autor

O revestimento PVD até um tempo de contato aproximado a 7,5 minutos teve um desgaste menor que o revestimento CVD, porém, ao passar deste tempo de contato o desgaste aumentou de forma elevada e ao passar de 10 minutos de tempo de contato o desgaste ultrapassou a $V_{Bmáx}$ predeterminada de 0,3mm. Outro fator a se destacar é que todo o tempo de contato deste revestimento foi com cavaco aderido que apareceu desde a primeira aferição com menos de 2 minutos de contato.

Entretanto o revestimento CVD obteve um desgaste superior nos primeiros minutos de contato ao se comparar com o outro revestimento, mas ao passar de aproximadamente 5 minutos de tempo de contato, o revestimento CVD teve seu desgaste evoluindo de forma lenta até chegar a condição de desgaste estabelecida, que foi depois de um tempo de contato próximos a 35 minutos. Assim como o revestimento PVD, este revestimento também teve cavaco aderido em sua aresta de corte desde a primeira aferição e até alcançar o limite de desgaste.

A Tabela 4 apresenta o tempo de contato aproximado de cada pastilha e seu respectivo desgaste.

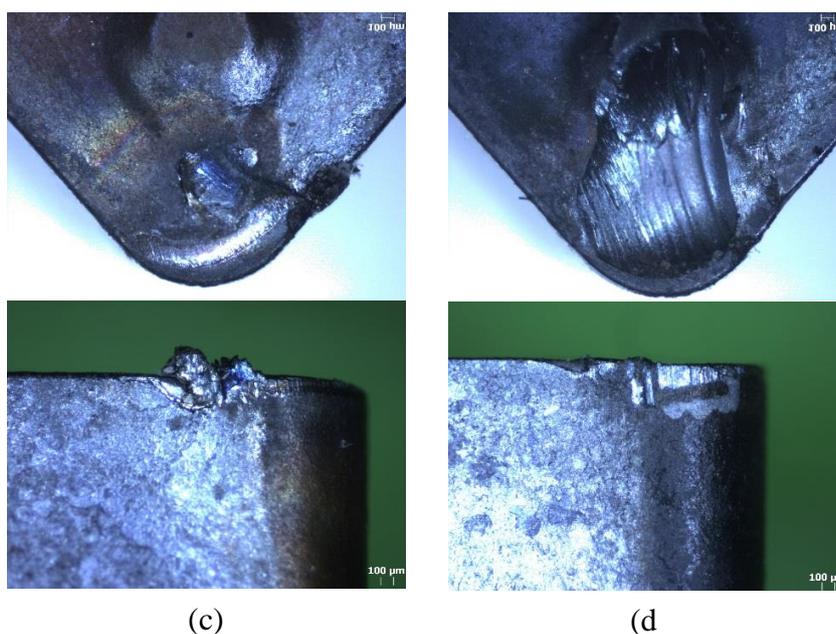
Tabela 4 – Tempo de contato e desgaste dos revestimentos à Vc de 350 m/min

Vc 350 m/min		
TC min (aproximado)	VB max PVD (mm)	VB max CVD (mm)
2,5	0,05	0,1
5	0,1	0,133
7,5	0,161	0,186
10	0,284	0,186
12,5	0,47	0,186
15	---	0,196
17,5	---	0,201
20	---	0,201
22,5	---	0,207
25	---	0,254
27,5	---	0,257
30	---	0,26
32,5	---	0,321
35	---	---

Fonte: Produção do próprio autor

Na Figura 82 o desgaste da pastilha revestida com PVD na superfície de saída é elevado, porém muito mais elevado do no parâmetro de corte com velocidade de corte de 350 m/min.

Figura 82 - Desgastes das pastilhas usadas na usinagem do aço SAE 8620 com parâmetro de velocidade de corte de 400 m/min com revestimento CVD (c) e revestimento PVD (d)



Fonte: Produção do próprio autor

A pastilha revestida com PVD sofreu uma grande deformação na superfície de saída e assim perdendo totalmente o formador de cavaco. Desde a primeira aferição, houve a apresentação de cavado aderido na aresta de corte e o mesmo se manteve até um tempo de contato aproximado a 7,5 minutos, porém, ao passar de 8,0 minutos de tempo de contato houve a formação de um entalhe próximo a região de contato no flanco entre a peça usinada e a pastilha, mesmo o desgaste sendo menor de 0,24mm o experimento foi interrompido porque ao entalhe acabou tendo um comprimento 0,385mm. Por estar no flanco e também se tratar de um desgaste o experimento foi encerrado com um tempo de contato aproximado de 8,2 minutos. Na Figura 82, pode-se notar claramente o substrato sem revestimento abaixo do desgaste de flanco, possivelmente após mais 1 ou 2 minutos esta região já fosse um desgaste e não apenas uma região sem revestimento.

O revestimento CVD também obteve cavaco aderido na aresta de corte, porém de forma inconstante, ou seja, não estava presente na aresta em todas as aferições. Assim como o outro revestimento, este também teve o desgaste crescendo de forma constante sem grandes elevações, mas como apresentado na Figura 82 quando alcançou o desgaste preestabelecidos, a pastilha tinha cavaco aderido em sua aresta. Outro fator marcante da imagem é o desgaste da superfície de saída que foi muito inferior à do outro revestimento. Este revestimento obteve um tempo de contato aproximado de 20 minutos e um desgaste de flanco de 0,324mm, conforme Tabela 5.

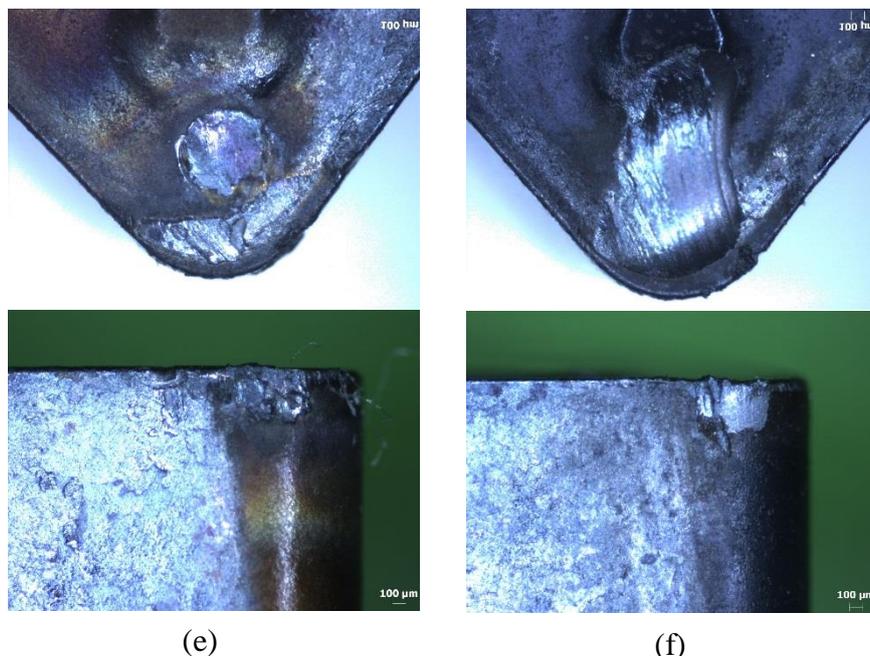
Tabela 5 - Tempo de contato e desgaste dos revestimentos à Vc de 400 m/min.

Vc 400 m/min		
TC min (aproximado)	VB max PVD (mm)	VB max CVD (mm)
2,5	0,053	0,104
5	0,102	0,131
7,5	0,191	0,18
10	0,223	0,221
12,5	---	0,233
15	---	0,238
17,5	---	0,239
20	---	0,324
22,5	---	---
25	---	---
27,5	---	---
30	---	---
32,5	---	---
35	---	---

Fonte: Produção do próprio autor

Na Figura 83 apresentam-se os desgastes da superfície de saída e de flanco das pastilhas, onde observa-se no flanco da pastilha revestida de CVD o efeito da temperatura de

Figura 83 - Desgastes das pastilhas usadas na usinagem do aço SAE 8620 com parâmetro de velocidade de corte de 450 m/min com revestimento CVD (e) e revestimento PVD (f)



corde que gerou um efeito de cores na região.

Fonte: Produção do próprio autor

A pastilha revestida de PVD até aproximadamente 2 minutos de tempo de contato, apresentou-se um desgaste bom parecido com as dos outros parâmetros, porém, ao passar 2,4 minutos de tempo de contato, próximo ao desgaste natural de flanco, a pastilha teve um desgaste acentuado em forma de entalhe e assim como o parâmetro anterior, ultrapassando o valor preestabelecido. Pode-se observar o possível deslocamento do revestimento e que certamente prejudicaria o desempenho da pastilha ao longo do experimento sem não houvesse aparecido o entalhe e o mesmo tivesse um desgaste de 0,427mm.

Assim como nos demais parâmetros, a pastilha revestida com CVD teve um aumento contínuo de ser desgaste V_B seguido sempre de cavaco aderido na sua aresta de corte, mas, diferente do revestimento PVD, tendo após 8 minutos de contato um grande aumento do desgaste até chegar ao desgaste de 0,371mm após 9,5 minutos de contato. Neste parâmetro pode-se observar que o aquecimento foi superior aos anteriores porque houve um colorimento do flanco e também cavacos aderido aparentemente deformados, como se houvessem mudado

de estado físico. Para este parâmetro o tempo de contato foi 2 vezes menor para teste revestimento do que no parâmetro anterior.

A Tabela 6 apresenta os tempos de contatos aproximados e seus respectivos desgastes para a velocidade de corte de 450 m/min.

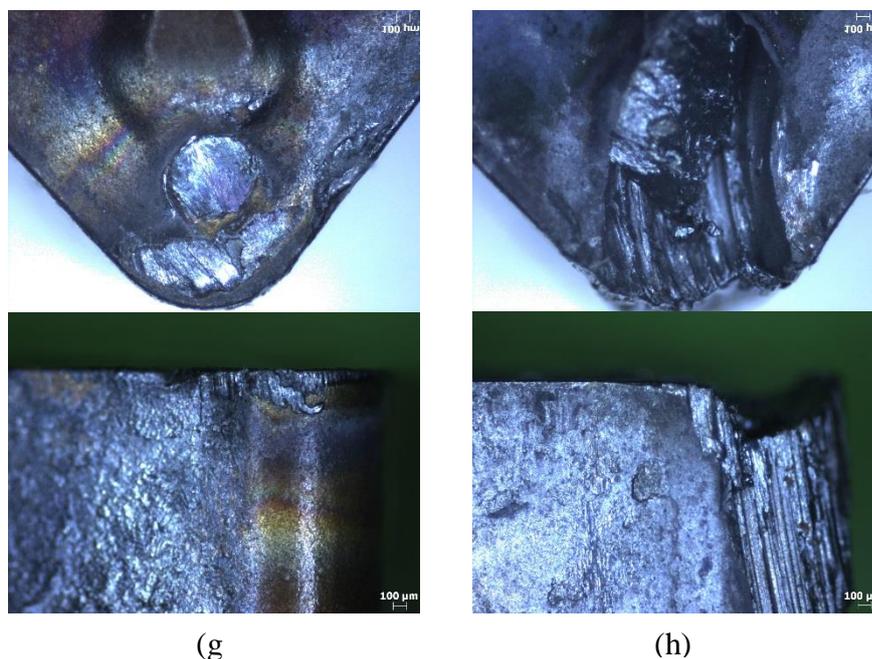
Tabela 6 - Tempo de contato e desgaste dos revestimentos à Vc de 450 m/min.

Vc 450 m/min		
TC min (aproximado)	VB max PVD (mm)	VB max CVD (mm)
2,5	0,096	0,123
5	0,163	0,182
7,5	---	0,201
10	---	0,371
12,5	---	---
15	---	---
17,5	---	---
20	---	---
22,5	---	---
25	---	---
27,5	---	---
30	---	---
32,5	---	---
35	---	---

Fonte: Produção do próprio autor

A Figura 84 apresenta as pastilhas revestidas após o ensaio à uma velocidade de corte de 450 m/min, observa-se que a pastilhas revestida por PVD não suportou a condição de corte e com isso, acarretou em uma quebra da aresta de corte.

Figura 84 - Desgastes das pastilhas usadas na usinagem do aço SAE 8620 com parâmetro de velocidade de corte de 500 m/min com revestimento CVD (g) e revestimento PVD (h)



Fonte: Produção do próprio autor

O revestimento PVD assim como nos parâmetros anteriores, teve um desgaste normal na aresta de corte até um tempo de contato aproximado de 1,3 minutos, pois a partir de então passou a apresentar um início de craterização na aresta de corte, onde logo após 2 minutos de contato, obteve-se a quebra da aresta de corte.

Enquanto no caso do revestimento CVD, obteve-se um aumento natural do desgaste da aresta de corte até se alcançar o limite de desgaste. Assim como nos parâmetros anteriores, neste também se obteve cavaco aderido na aresta de corte em todo o ensaio. Como no parâmetro anterior, o cavaco aderido se apresenta em um formato diferenciado e pode ser que tenha sofrido alguma alteração de estado durante o ensaio.

A Tabela 7 apresenta os desgastes das pastilhas revestidas utilizando um parâmetro de corte de 500 m/min.

Tabela 7 - Tempo de contato e desgaste dos revestimentos à Vc de 500 m/min.

Vc 500 m/min		
TC min (aproximado)	VB max PVD (mm)	VB max CVD (mm)
2,5	0,2	0,181
5	---	0,208
7,5	---	0,315
10	---	---
12,5	---	---
15	---	---
17,5	---	---
20	---	---
22,5	---	---
25	---	---
27,5	---	---
30	---	---
32,5	---	---
35	---	---

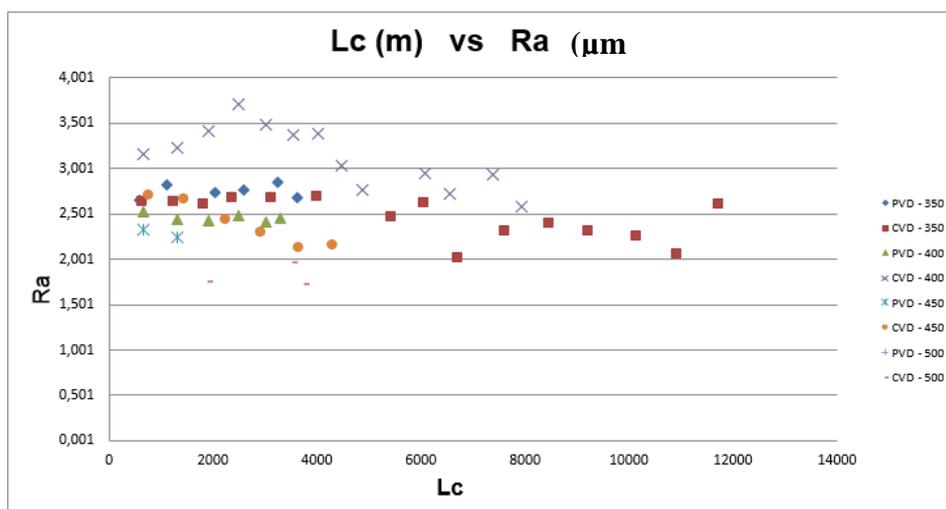
Fonte: Produção do próprio autor

5.6 Rugosidade da peça usinada

Para se analisar os efeitos gerados pelo desgaste da ferramenta de corte sobre a peça, as rugosidades foram aferidas.

O acabamento superficial é de extrema importância para a peça usinada e em boa parte das vezes é o critério de troca da ferramenta na indústria. Quanto menor a rugosidade de peça, melhor o acabamento superficial e repetitividade do dimensional das peças usinadas.

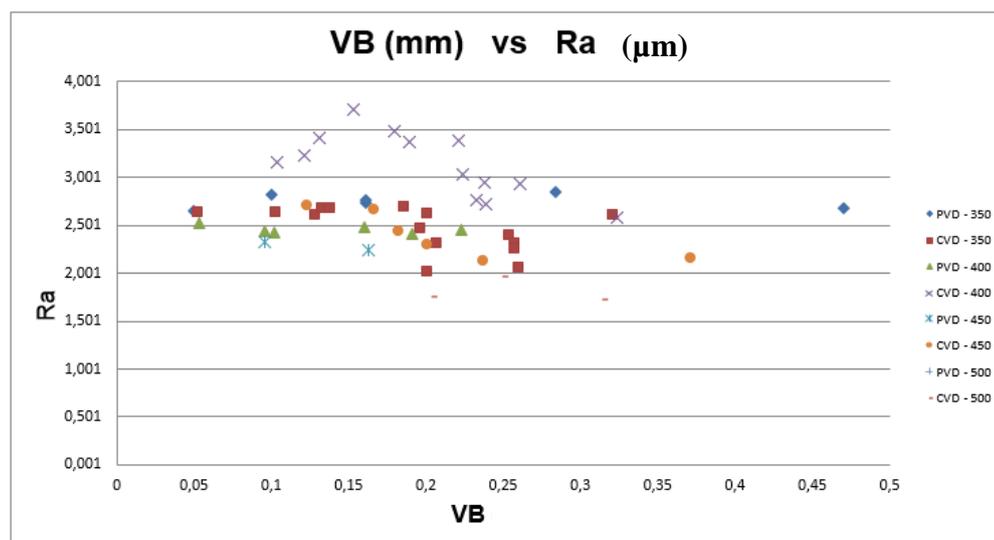
Figura 85 - Rugosidade média Ra dos revestimentos durante a usinagem



Fonte: Produção do próprio autor

Na Figura 85 nota-se que a rugosidade da peça usinada não teve muita oscilação, ficando com um Ra de 2 a 3 μm , porém o único parâmetro que acima, ou melhor, teve uma maior oscilação foi a velocidade de corte de 400 m/min no revestimento CVD. Para se analisar melhor o ocorrido deste parâmetro ao longo do aumento do desgaste de flanco, à Figura 86 o desgaste de flanco (V_B) por rugosidade Ra.

Figura 86 - Rugosidade média Ra dos revestimentos durante a usinagem



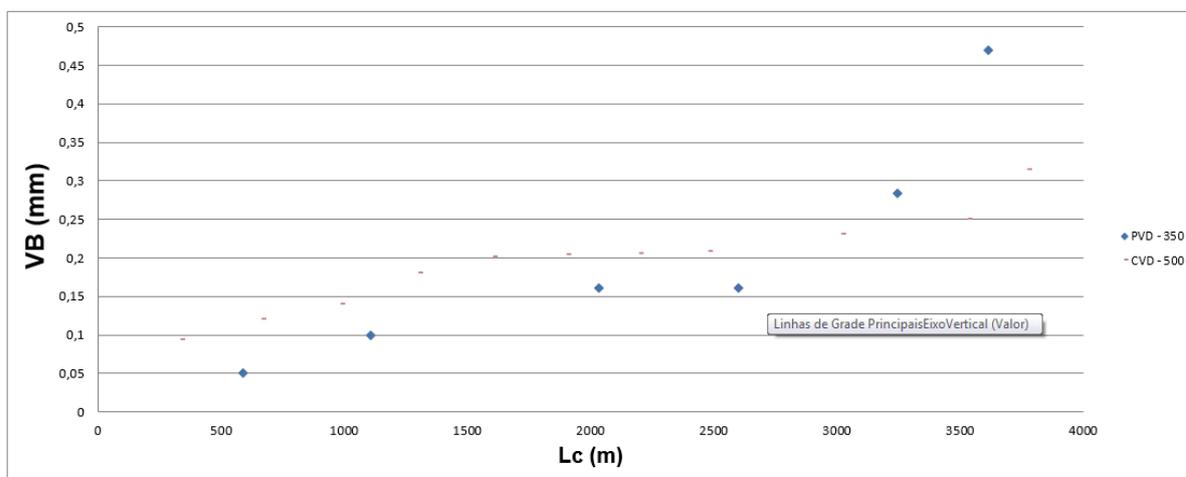
Fonte: Produção do próprio autor

Na Figura 86, nota-se que a velocidade de corte da pastilha revestida de CVD em 400 m/min deixou uma rugosidade superficial maior na peça usinada do que os demais parâmetros e mesmo tendo uma redução na rugosidade conforme a ferramenta sofria desgaste, se manteve acima dos demais parâmetros. Isso possivelmente se deve ao fato de ter aderido cavaco na aresta de corte da pastilha e que não se desprende e se manteve até alcançar o critério de vida estabelecido.

5.7 Revestimento CVD e PVD com vidas aproximadas

Ao analisar as pastilhas revestidas com CVD e PVD que tiveram uma vida aproximada, pode-se observar que a velocidade de corte foi bem diferente, ou melhor, foi o extremo para cada uma. Na Figura 87 pode-se notar que a vida das pastilhas foi bem próxima, assim também como o comprimento usinado, porém a rugosidade gerada pelo revestimento PVD foi bem superior à do revestimento CVD.

Figura 87 - Gráfico do comprimento usinado com o desgaste dos revestimentos CVD e PVD

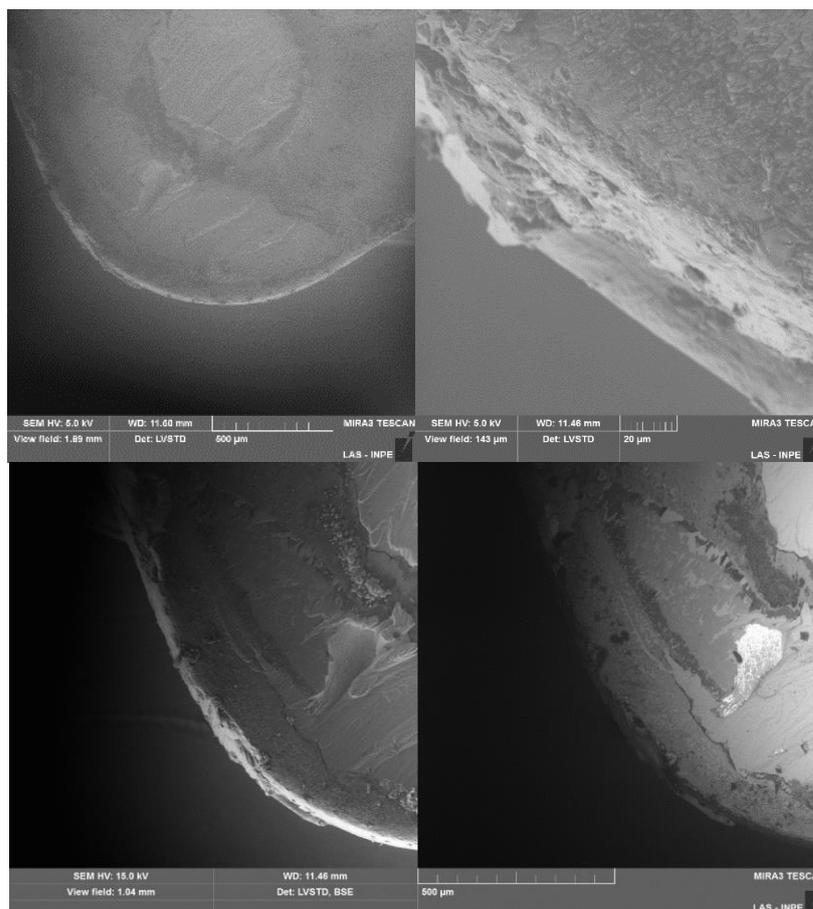


Fonte: Produção do próprio autor

Na Figura 87 pode-se analisar que mesmo a pastilha com revestimento PVD tendo um tempo de contato maior e um comprimento de corte bem próximo ao revestimento CVD, após 3.000m de comprimento usinado o desgaste passar a aumentar de forma acentuada até alcançar o critério de desgaste. Observa-se também que as pastilhas tiveram um comportamento parecido no que se trata de aumento do desgaste, porém, ao passar de 2.500m de comprimento usinado, a pastilha PVD acabou tendo seu desgaste acentuado enquanto a pastilha com revestimento CVD continuou tendo um aumento do seu desgaste sem que houvesse picos altos entre as aferições. O desgaste acentuado a partir de 3.000m de comprimento de corte linear se dá devido ao fator de que a pastilha com o revestimento PVD perdeu o seu revestimento e com isso o cavaco passou a ter um contato direto com o substrato e assim aumentando de forma significativa o desgaste. Contrapartida, a pastilha com revestimento CVD obteve um desgaste contínuo, sendo assim, um melhor controle do crescimento do desgaste.

A Figura 88 a seguir apresenta a microscopia do revestimento CVD e pode-se observar o desgaste na superfície de saída da pastilha. Com isso, se pode analisar as informações obtidas através dos gráficos apresentados e visualizar que mesmo havendo o deslocamento, esta técnica de revestimento obteve um desgaste inferior. Pode-se observar que o desgaste na superfície de saída foi inferior e também que houve o deslocamento de uma ou mais camadas do revestimento

Figura 88 - Microscopia da face de saída do revestimento CVD

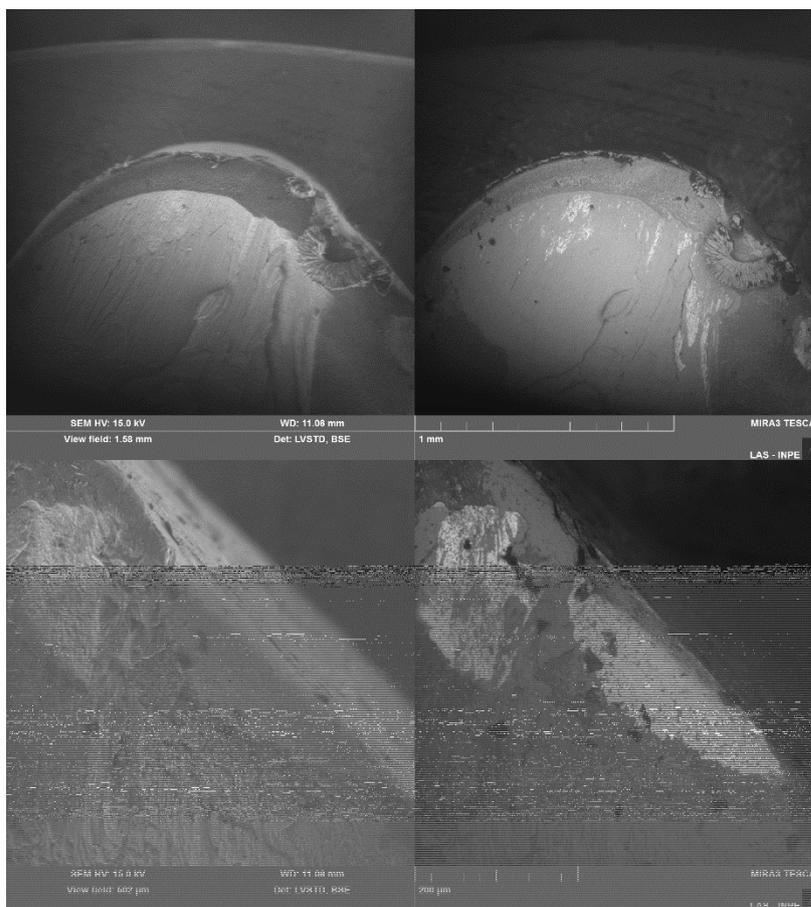


Fonte: Produção do próprio autor

Na Figura 880 observa-se os cavacos aderidos e também o sentido em que o mesmo escoou até o cisalhamento. Neste revestimento é possível observar que na face de saída houve o deslocamento de revestimento próximo a aresta de corte, porém não na região onde é feita a preparação de aresta, ou seja, borda entre a superfície e o flanco da pastilha e tendo nesta região grãos do material removido da amostra durante o ensaio que possivelmente aderiram nas bordas da aresta de corte enquanto ocorria o contato entre amostra e ferramenta.

Na Figura 89 pode-se analisar que o desgaste na face de saída da pastilha foi superior, assim, confirmar que a técnica de revestimento PVD mesmo trabalhando em uma velocidade de corte bem inferior ao outro revestimento e tendo um comportamento de crescimento de desgaste similar, a mesma apresentou em sua superfície um alto desgaste tendo uma grande cratera. Além disso, se pode observar de forma nítida o deslocamento do revestimento da pastilha, desta forma o substrato exposto.

Figura 89 - Microscopia da face de saída do revestimento PVD



Fonte: Produção do próprio autor

Além do deslocamento do revestimento ter ocorrido no flanco, pode-se observar que grãos do material removido se encontram no flanco. Sendo assim, ao perder a camada protetora, neste caso o revestimento, o substrato fica mais frágil e tem sua resistência muito menor, com isso o desgaste da pastilha passa a ocorrer de forma mais acentuada. Este fator explica porque que a partir de 2.500m de comprimento de corte usinado, esta técnica de revestimento apresentou um desgaste de forma mais acentuada.

Isso não ocorreu com o revestimento CVD porque o mesmo é multicamadas e ao perder uma camada, tem outra logo em seguida, possivelmente por este motivo, o desgaste deste revestimento tenha sido de forma moderada até alcançar o limite predeterminado.

Nesta Figura 89, nota-se também o cavaco aderido na superfície de saída da pastilha, e que permaneceu durante todos o ensaio na aresta de corte. Este cavaco pode ter auxiliado o aumento do desgaste do revestimento PVD nesta condição por estar exatamente na região de contato entre a amostra e a ferramenta, logo, o cavaco que entrava para o cisalhamento acabava passando sobre o cavaco aderido na aresta e gerando um esforço maior de corte.

6. CONCLUSÃO

De acordo com os resultados dos ensaios executados no ABNT 8620 para as ferramentas com os dois tipos de revestimentos CVD e PVD, onde se manteve o avanço e a profundidade de corte, alterando apenas a velocidade e corte, além também de toda a operação de usinagem ter sido feita a seco, conclui-se que:

- Com relação aos substratos, após a caracterização, observou-se que os substratos dos revestimentos CVD e PVD contém exatamente os mesmos elementos químicos e são exatamente iguais, com isso, eliminando qualquer hipótese de interferência do substrato rendimento da pastilha revestida.
- Ao se realizar o torneamento do aço ABNT 8620 com as pastilhas revestidas com técnica CVD e PVD, observou-se que os cavacos gerados pelas mesmas foram muito similares, logo as duas técnicas de revestimento trabalharam dentro de uma condição de corte totalmente favorável ao formador de cavaco e com isso, não houve qualquer diferença entre as pastilhas.
- Ao analisar o desempenho dos revestimentos durante o aumento da velocidade de corte, notou-se que o revestimento PVD teve um desgaste mais acentuado da aresta de corte, chegando até a quebra e uma das condições. Em alguns casos houve o deslocamento do revestimento das pastilhas, onde novamente, o revestimento PVD teve maior dificuldade por ser uma única camada e a mesma ser 5 vezes mais fina do que a CVD. Quando comparamos os dois revestimentos usando como base um comprimento de corte similar, observa-se que o revestimento CVD teve um melhor rendimento e também um melhor acabamento superficial. Neste revestimento, o desgaste da aresta de corte foi inferior no flanco e na superfície de saída, e assim, se obteve uma craterização bem inferior do que o revestimento PVD.
- Quanto ao acabamento superficial das amostras usinadas, quase todas as pastilhas tiveram suas aferições de Ra próximas a $2,5\mu\text{m}$, isso ocorreu porque todas as pastilhas trabalharam exatamente com as mesmas condições de avanço e com o mesmo raio de ponta, variáveis estas que influenciam diretamente na rugosidade do

material usinado. Houve apenas um parâmetro que ficou totalmente fora dos demais, este parâmetro foi o do revestimento CVD com velocidade de corte de 450 m/min. Este fato certamente ocorreu porque esta pastilha teve um cavaco aderido em sua aresta de corte desde o começo da usinagem e o mesmo também aderiu no flanco da pastilha, possivelmente gerando um “revestimento” do próprio material usinado. Conforme este material aderido foi se retirando da pastilha a rugosidade foi reduzindo.

- Na avaliação do desgaste das arestas de corte das pastilhas os revestimentos CVD e PVD, as pastilhas com o revestimento PVD tiveram um desgaste na superfície de saída muito superior as do revestimento CVD, chegando em alguns casos perder parte do formador de cavado. Ao se tratar do desgaste de flanco, novamente as pastilhas CVD tiveram um desempenho superior e com isso uma vida em média 2 vezes maior que as pastilhas revestidas com PVD.

Portanto, com base nas informações obtidas nesta pesquisa, se conclui que a técnica de revestimento CVD aplicadas nas pastilhas de metal duro e utilizadas no processo torneamento do aço ABNT 8620, tem um melhor desempenho e melhor acabamento superficial nas peças usinadas. Com isso, as pastilhas revestidas com a técnica CVD são mais indicadas para a usinagem do ABNT 8620 e atendem a atual necessidade da indústria metal mecânica que é a de ter sempre ferramentas de corte mais eficientes e que suportem cada vez mais parâmetros de corte agressivos para uma maior produtividade.

7. REFERÊNCIAS

AÇO ESPECIAL, (s.d.). **Produtos.** Disponível em: <http://www.acoespecial.com.br/produtos.php?id=3>. Acesso em: 12 de março de 2014. 2014.

ANCELMO, C. **Desafios da Usinagem.** 2012. Disponível em O Mundo da Usinagem: <http://www.housepress.com.br/mundoUsinagem/secao.asp?idSecao=99>. Acesso em: 06 de março de 2014. 2014.

ARFELD, E. D., HANUM, A. L. **Aços De Corte Fácil De Baixo Carbono,** Metalurgia – ABM, N241, p. 773-776. 1997.

BRUKER. (S.D.). Bruker AXS. **Difração de Raio X.** Disponível em: <http://www.bruker.com.br/axs/difracaoRaiosX.html>. Acesso em: 06 de março de 2014. 2014.

BUNSHAH, R.F. **“Handbook of Hard Coatings-Deposition Technologies, Properties and Applications”**, Noyes Publications, 550 pags. 2001.

CAMPBELL, S. A. **“The Science and Engineering of Microelectronic Fabrication”**, Oxford University Press, 1996.

CANEVAROLO JUNIOR, S. V. **“Ciência dos polímeros: Um Texto Básico Para Tecnólogos e Engenheiros”**. 2 edição. 280 páginas. São Paulo. 2006.

CIMM. **Ensaio de Dureza.** Teste de dureza Vickers. Disponível em: http://www.cimm.com.br/portal/material_didatico/6559-teste-de-dureza-vickers#.VQcXSY7F9UN. Acesso em: 08 de março de 2014. 2014.

CIMM. **Descrição dos processos de revestimento por Adição de Camadas.** Disponível em: http://www.cimm.com.br/portal/material_didatico/6376-descricao-dos-processos-de-revestimento-por-adicao-de-camadas#.VQcPeI7F9UN. Acesso em: 05 de março de 2014. 2013.

CIMM. **Definição O que é Usinagem.** Disponível em: <http://www.cimm.com.br/portal/verbetes/exibir/451-usinagem>. Acesso em: 09 de setembro de 2015. 2015.

DATSKO, J. **Machinability Index Material Properties And Manufacturing Processes**, In: Material properties and Manufacturing processes, John Wiley & Sons. Inc., p.444-468. 1967.

DAVIM, J. PAULO. **A Note On The Determination Of Optimal Cutting Conditions For Surface Finish Obtained In Turning Using Design For Experiments**, Journal of Materials Processing Technology, 116, p. 305-308. 2001.

DEARNLEY, P.A.; TRENT, E.M. **Wear Mechanisms of Coated Carbide Tools**, Metals Technology, vol.9, p. 60-75. 1982.

DINIZ, A. E. MARCONDES, F.C. COPPINI, N. L. **“Tecnologia da Usinagens dos materiais”**. 6 ed. São Paulo: MM editor, 242 pags. 2006.

DINIZ, A. E.; MARCONDES, F. C.; COPPINI, N. L. **Tecnologia da usinagem dos materiais**, São Paulo: 7ª. Ed., Art Líber Editora. 2010.

DME. (s.d.). **Catalogues**. Disponível em: <http://www.dmeeu.com/files/catalogues/pt/C10.pdf>. Acesso em: 10 de março de 2014. 2014.

DOW C.. **Chemical Vapor Deposition**. Disponível em: http://www.dowcorning.com/content/etronics/etronicschem/etronics_newcvd_tutorial3.asp?DCWS=Electronics&DCWSS=Chemical+Vapor+Deposition. Acesso em 08 de março de 2014. 2014.

EDWARDS, R. **Great Britain: The Institute of Materials**, Cutting tools, 1. ed. London. 1993.

Esteves, E.M. **Simulação Computacional de Medidas Estereológicas Em Estruturas De Metal Duro (WC-Co)**, Tese de Doutorado, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Centro de Ciências Exatas e da Terra, Natal-RN. 2011.

FERRARESI, DINO. **Fundamentos Da Usinagem Dos Materiais**, Ed. Edgard Blucher Ltda., São Paulo, 751 páginas. 1977.

FONTANA, L. “**Estudo da deposição de filmes de Ti e TiN e desenvolvimento do sistema modificado Triodo Magnetron Sputtering**”. Tese de doutorado, UFSC, Flórianopolis. 1997.

FRANCO Jr, A. R. “**Obtenção de Revestimentos Dúplex por Nitretação a Plasma e PVD-TiN em Aços-Ferramenta AISI D2 e AISI H13**”, Tese de Doutorado, Universidade de São Paulo, 196 pp, São Paulo-SP. 2003.

GAMA, R.P. **Estudo Da Formação Do Cavaco No Torneamento De Superligas De Níquel**, Dissertação de Mestrado, Universidade Estadual Paulista, 128pp, Guaratinguetá-SP. 2014.

GROVE, W.R. “**On the Electrochemical Polarity of Gases Phil**”. Trans. Royal. Soc. (London). 1852.

HATSCHEK, R. L. “**Coatings: Revolution in HSS tools American Machinist**”, march, pp . 129-143. 1983.

HOGMARK, S., JACOBSON, S. and LARSSON, M. “**Design and evaluation of tribological coatings**”, Wear, V. 246, Uppsala, Sweden. 2000.

HOLMBERG, K. and MATTHEWS, A. “**Coatings Tribology — Properties, Techniques and Applications in Surface Engineering**”, Elsevier Tribology Series, 28, Elsevier Science B.V., The Netherlands. 442 pags. 1994.

HUNT J.L., SANTHANAM, A.T. “**Fundamental issues in machining: Development and applications for coated carbide metal cutting tools**”. PED 43:139–155. 1990.

ISCAR. **Novos Produtos**. Disponível em: <http://www.ceriscar.com.br/novosprodutos.html>. Acesso em: 10 de março de 2014. 2013.

KANZLER, G. **Cobertura em pastilhas intercambiáveis**. Disponível em: <http://usinagemvirtual.blogspot.com.br/2009/09/cobertura-em-pastilhas-intercambiaveis.html>. Acesso em: 07 de março de 2014. 2009.

LEE, M. and RICHMAN, M. H. “**Some Properties of TiC-Coated Cemented Tungsten Carbides**”, *Metals Technology* – December. 1974.

MACHADO, A.R. E SILVA, M.B. **Usinagem dos Materiais**, Universidade Federal de Uberlândia, 8ª Edição, Abril Uberlândia-MG. 2004.

MARTINS, G. V. “**Estudo da Usinagem do Nióbio**”, Dissertação de Mestrado, Faculdade de Engenharia Química de Lorena, São Paulo. 2003.

METALS, GGD (s.d.). **GGD Metals**. Disponível em: <http://www.ggdmetals.com.br/aco-construcao-mecanica/sae-8620>. Acesso em: 13 de março de 2014. 2014.

MITSUBISHI. “**MITSUBISHI Tooling Technology, Level 2**”, MITSUBISHI Materials, 288 pags. 2006.

MITSUBISHI. “**MITSUBISHI Tooling Technology, Level 1**”, MITSUBISHI Materials, 162 pags. 2007.

MITSUBISHI. (s.d.). **METAL DURO COM COBERTURA (CVD&PVD)**. Disponível em: http://www.MITSUBISHIcarbide.net/contents/mht/pt/html/product/technical_information/grade/milling/f_cvd_pvd.html. Acesso em: 11 de março de 2014. 2013.

NETO, J. C. S. **Metrologia e Controle Dimensional**, Elsevier Editora Ltda, 239 p., Rio de Janeiro-RJ. 2012.

OERLIKON BALZERS COATING. **O processo PVD**. Disponível em: <http://www.oerlikonbalzerscoating.com/bbr/por/01-products-services/03-coating-technology/02-pvd-process/indexW3DnavidW261.php>. Acesso em: 15 de março de 2014. 2010.

OGATA, H. T. S. **Determinação Da Influência Das Tensões Residuais Nas Propriedades De Fadiga Em Aço SAE8620 Processado Com Diferentes Profundidades De Camada De Cementação**, Dissertação de Mestrado, Universidade Federal do Paraná, Curitiba-PR. 2003.

OLLENDORF, H. and SCHNEIDER, D. “**A comparative study of adhesion test methods for hard coatings**”, Surface and Coatings Technology, Vol. 113. 1999.

PAULA, M. A. **Avaliação da Aplicação de Fluido De Corte No Torneamento do Aço Inoxidável Martensítico AISI 410 Tratado Termicamente**, Dissertação de Mestrado, Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá-SP. 2016.

PLASMA EQUIPAMENT (s.d.). **Plasma Equipment Technical**. Disponível em: <http://www.plasmaequip.com/WHAT%20IS%20PECVD.pdf>. Acesso em: 07 de março de 2014. 2013.

ROCHA, O. F. “**Caracterização de Filmes Finos de Óxido de Silício Depositados em um Reator HD-PECVD a Partir de Teos a Ultra Baixa Temperatura**”, Dissertação de Mestrado, Universidade de São Paulo, 139pags. 2007.

ROHDE, S.L. and MUNZ, M.D., “**Advanced Surface Coatings: a Handbook of Surface Engineering**“, edited by D. S. Rickerby and A. Matthews, Blackie & Sons Limited Glasgow and London.

ROMI. (s.d.). **Linha Centur**. Disponível em: http://www.romi.com.br/fileadmin/Editores/MF/CATALOGOS_2013/CAT._NOV._2013/003_cat_centur.pdf. Acesso em: 09 de março de 2014. 2013.

SANDVIK. **Metal Duro Revestido**. Disponível em: http://www.sandvik.coromant.com/pt-pt/knowledge/materials/cutting_tool_materials/coated_cemented_carbide/pages/default.aspx. Acesso em: 05 de março de 2014. 2006.

SANDVIK. (02 de fevereiro de 2014). **Soluções de Usinagem**. Disponível em: <http://www.omundodausinagem.com.br/?cat=110>. Acesso em: 09 de março de 2014. 2014.

SANTOS, S. C., Sales, W. F. **“Aspectos Tribológicos da Usinagem dos Materiais”**, Editora Artliber, p.p. 125 – 150. 2007.

SANTOS, S.C., SALES, W.F., Da Silva, F.J., Franco, S.D. and Da Silva, M.B. **“Tribological characterization of PVD coatings for cutting tools”**, Surface and Coatings Technology, Vol. 184. 2004.

SJOSTRAND, M. E., THELIN A. G. **“CVD and PVD Technique for Producing Wear Resistant Coating”**, MPR-December, pp 905-910. 1986.

SOUZA, A. JOÃO. **Processo de Fabricação por Usinagem – Parte 1**, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Rio Grande do Sul. 2011.

STOETERAU, Rodrigo Lima. **“Processo de Usinagem: Fabricação por Remoção de Material”**. Apostila do Curso de Engenharia Mecânica UFSC.Santa Catarina, 2004.

SUH, N. P., **Coated Carbides, Past, Present and Future**. “International Conference on Hard Materials Tool Technology”, Carnegie-Melon University, Pittsburgh, Pennsylvania, 22-24, pp. 118-143. 1976.

SUMITOMO ELECTRIC HARTMETALL GMBH. **Catalogue 2014-2015**. Itami-shi, Hyogo, Japão. 2015.

TATSCH, P. J. (s.d.). **Deposição de Filmes Finos**. Disponível em: <http://www.ccs.unicamp.br/cursos/fee107/download/cap11.pdf>. Acesso em: 09 de março de 2014. 2014.

THIELE, J. D.; MELKOTE, S. N. **Effect Of Cutting Edge Geometry And Workpiece Hardness On Surface Generation In The Finish Hard Turning Of AISI 52100 Steel**, Journal of Materials Processing Technology, 94, p. 216-226. 1999.

TRENT, E. M. and WRIGHT, P. K. **Metal Cutting 4th Edition**, Butterworth Heinemann, 446 pags. 2000.

TUNGALOY CUTTING TOOLS. **Catalogue 2013-2014**. Iwaki, Fukoshima, Japão. 2014.

UNTERWEISER, PAUL M. et al. **Heat Treater's Guide – Standard Practices and Procedures for Steel**, Ohio – EUA. 1982.

VIANA, R. “**Estudo da Caracterização de Ferramentas de Corte Texturizadas a Laser e Revestidas Utilizadas no Fresamento Frontal do Ferro Fundido Vermicular**”, Tese de Doutorado, Universidade Federal de Uberlândia, 140 pags. 2009.