

MARCELO ANTUNES DE PAULA

AVALIAÇÃO DA APLICAÇÃO DE FLUIDO DE CORTE NO TORNEAMENTO DO
AÇO INOXIDÁVEL MARTENSÍTICO AISI 410 TRATADO TERMICAMENTE

Guaratinguetá

2016

MARCELO ANTUNES DE PAULA

AVALIAÇÃO DA APLICAÇÃO DE FLUIDO DE CORTE NO TORNEAMENTO DO
AÇO INOXIDÁVEL MARTENSÍTICO AISI 410 TRATADO TERMICAMENTE

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

Orientador: Prof. Dr. Marcos Valério Ribeiro

Guaratinguetá
2016

P324a	Paula, Marcelo Antunes de Avaliação da aplicação de fluído de corte no torneamento do aço inoxidável martensítico AISI 410 tratado termicamente / Marcelo Antunes de Paula – Guaratinguetá, 2016. 108 f : il. Bibliografia: f. 86-91 Dissertação (Mestrado) – Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá, 2016. Orientador: Prof. Dr. Marcos Valério Ribeiro 1. Usinagem. 2. Ferramentas de corte. 3. Aço inoxidável. I. Título CDU 621.9(043)
-------	--

MARCELO ANTUNES DE PAULA

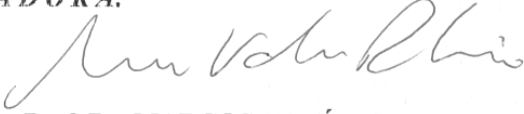
**ESTA DISSERTAÇÃO FOI JULGADA ADEQUADA PARA A OBTENÇÃO DO TÍTULO DE
“MESTRE EM ENGENHARIA MECÂNICA”**

**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 VALÉRIO RIBEIRO
UNESP/FEG


Prof. Dr. JOSÉ VITOR CÂNDIDO DE SOUZA
UNESP/FEG


Prof. Dr. AMAURI HASSUI
UNICAMP

Agosto de 2016

DADOS CURRICULARES

MARCELO ANTUNES DE PAULA

NASCIMENTO 03.07.1974 – GUARATINGUETÁ / SP

FILIAÇÃO João Antunes de Paula
 Dolores de Oliveira Leite Paula

2002/2014 Curso de Graduação
Engenharia Mecânica - Faculdade de Engenharia do Campus de
Guaratinguetá da Universidade Estadual Paulista

2014/2016 Curso de Mestrado
Engenharia Mecânica - Faculdade de Engenharia do Campus de
Guaratinguetá da Universidade Estadual Paulista

A toda a minha família e amigos, que ao longo desses anos, ajudaram de alguma forma no meu crescimento pessoal e profissional, dedico essa especial homenagem.

AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar agradeço a Deus, guia e alicerce em toda minha vida. Agradeço pela minha vida, pela minha família e por tudo que proporcionou ao longo desses anos.

Ao meu orientador, *Prof. Dr. Marcos Valério Ribeiro* pela orientação, auxílio e incentivo durante a execução desse trabalho.

Aos meus pais *João Antunes de Paula* e *Dolores de Oliveira Leite Paula* pela ajuda em toda minha vida, ajuda essa de essencial importância nos momentos de dificuldade e principalmente na formação do meu caráter.

Aos meus amigos *Everson Luís de Campos Moura*, *Rodrigo Ducatti Marson*, *Alan Yamada* e *Robinson Ohta*. Essas pessoas me ajudaram através do incentivo, auxílio e amizade ao longo de tantos anos.

Ao amigo *Marcel Yuzo Kondo* aluno de Doutorado da UNESP Campus de Guaratinguetá, que contribuiu de forma significativa durante a realização dos ensaios.

Aos funcionários da Biblioteca da UNESP do Campus de Guaratinguetá pela assistência, dedicação e gentileza no auxílio em muitos momentos.

Ao pessoal do Laboratório de Estudo da Usinagem do Departamento de Materiais e Tecnologia da UNESP Campus de Guaratinguetá, que me ajudaram de forma significativa na realização desse trabalho, sem o qual esse trabalho não seria realizado.

Um agradecimento à empresa SECO TOOLS pelo fornecimento das ferramentas de corte para execução dos ensaios, sem as quais não seria possível a realização desse trabalho.

*“O valor das coisas não está no tempo em
que elas duram, mas na intensidade com
que acontecem. Por isso, existem momentos
inesquecíveis, coisas inexplicáveis e pessoas
incomparáveis”*

Fernando Pessoa

DE PAULA, M. A. **Avaliação da aplicação de fluido de corte no torneamento do aço inoxidável AISI 410 tratado termicamente.** 2016. 108f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2016.

RESUMO

Muitos materiais são utilizados para diversas aplicações em projetos de engenharia. Os aços inoxidáveis martensíticos que são ligas de ferro e cromo (11-18%) com teor de carbono acima de 0,1% são aplicados na fabricação de válvulas, bombas de equipamentos, ferramentas de cutelaria, eixos acionadores, hastes de pistão, componentes de turbinas hidráulicas e instrumentos cirúrgicos. A evolução das propriedades e desempenho dos materiais utilizados em componentes para aplicações em engenharia é contínua ao longo dos anos, consequentemente os processos e as ferramentas utilizadas para fabricação desses componentes precisam evoluir conjuntamente. A proposta desse trabalho é avaliar o desempenho das ferramentas de corte de Metal Duro revestidas pelos processos (PVD-*Physical vapor deposition* e CVD-*Chemical vapor deposition*) na usinagem a seco e MQL do aço inoxidável martensítico AISI 410 tratado termicamente e a qualidade do acabamento superficial da peça, nas condições de corte com ($v_c = 125-150-175$ m/min, $f = 0,1-0,25$ mm/rev e $a_p = 0,5$ mm). A análise dos desgastes das ferramentas de corte foi realizada com auxílio de microscópios. A medição da rugosidade foi realizada com auxílio de um rugosímetro. Resultados finais evidenciaram que a ferramenta com revestimento CVD apresentou um melhor desempenho em ambas às condições de corte porque a amostra teve um bom acabamento superficial. A ferramenta com revestimento PVD apresentou avarias durante a realização dos ensaios, as avarias ocorreram na ferramenta em ambas às condições de corte durante os testes, primeiramente, na forma de pequenas lascas, em seguida, ocorrendo à quebra da ferramenta. Os cavacos obtidos durante os ensaios de uma forma geral foram na forma de lascas.

PALAVRAS-CHAVE: Usinagem. Ferramentas. Aços inoxidáveis. MQL. Rugosidade.

DE PAULA, M. A. **Application evaluation of cutting fluid in stainless steel AISI 410 turning heat-treated.** 2016. **108p.** Dissertation (Master in Mechanical Engineering) – Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Univ. Estadual Paulista - UNESP, 2016.

ABSTRACT

Many materials are used for various applications in engineering projects. The Martensitic Stainless Steels are alloys containing from 11.5 to 18% of chromium and 0.09 to 0.15% of carbon, which are widely used in the manufacturing of valves, pumps, cutlery tools, drive shafts, piston rods, hydraulic turbine components and surgical instruments. The evolution of the properties and performance of materials used in components for engineering applications is continuous over the years, therefore processes and tools used to manufacture these components must develop together. The purpose of this work is to evaluate the performance and wear of coated carbide tools (PVD - Physical vapor deposition e CVD - Chemical vapor deposition) in dry machining and MQL of Martensitic Stainless Steel AISI 410 heat-treated and the quality of workpiece surface finishing in cutting conditions ($v_c = 125-150-175$ m/min, $f = 0,1-0.25$ mm/rev, $a_p = 0.5$ mm). The tool wear analysis was realized with the aid of microscopes. The measurement of roughness was obtained with the aid of roughness meter. Final results showed that the coated carbide tool (CVD) performed well in both cutting conditions because the piece had a good surface finishing, the flank wear were not significant for the tested cutting lengths and the tool no damage showed. The coated carbide tool (PVD) showed damage in both cutting conditions during the tests, firstly on shape of small splinters, then to break the tool. The chips were obtained during tests on shape of small splinters.

KEYWORDS: Machining. Cutting tools. Stainless steel. MQL. Roughness.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 -	Passividade dos aços-cromo expostos durante 10 anos na atmosfera.....	3
Figura 2 -	Efeito do cromo na resistência dos aços à oxidação a altas temperaturas.....	4
Figura 3 -	Processo de torneamento.....	9
Figura 4 -	Direção dos movimentos de corte, de avanço e efetivo no torneamento.....	9
Figura 5 -	Processo de torneamento cilíndrico externo.....	10
Figura 6 -	Superfícies definidas sobre a peça usinada.....	11
Figura 7 -	Arestas de corte e superfícies de uma ferramenta de torneamento.....	13
Figura 8 -	Formas do cavaco: a) em fita; b) helicoidal; c) espiral; d) em lascas.....	16
Figura 9 -	Efeito da profundidade e avanço na forma dos cavacos.....	16
Figura 10 -	Área de contato cavaco-ferramenta.....	17
Figura 11 -	Zona de fluxo dentro do cavaco.....	18
Figura 12 -	(a) Fontes de geração de calor na formação dos cavacos e (b) distribuição de temperatura em uma ferramenta.....	19
Figura 13 -	Processo de PVD por implantação iônica.....	23
Figura 14 -	Revestimento de camada simples no processo PVD.....	24
Figura 15 -	Processo CVD.....	25
Figura 16 -	Revestimento de multicamadas no processo CVD.....	25
Figura 17 -	Desgaste frontal da ferramenta de corte de Metal Duro revestida com PVD....	26
Figura 18 -	Desgaste de entalhe.....	27
Figura 19 -	Desgaste de cratera na ferramenta de Metal Duro revestida com PVD.....	27
Figura 20 -	Deformação plástica da aresta de corte.....	28

Figura 21 - Lascamento e micro-lascamento.....	28
Figura 22 - Trincas de origem térmicas.....	29
Figura 23 - Quebra da ferramenta de Metal Duro revestida com PVD.....	29
Figura 24 - Parâmetros para medir os desgastes das ferramentas.....	32
Figura 25 - Tipos de fluidos de corte.....	37
Figura 26 - Diagrama esquemático da técnica MQL.....	40
Figura 27 - Características da textura superficial.....	41
Figura 28 - Comprimento para avaliação da rugosidade.....	43
Figura 29 - Rugosidade média (R_a).....	44
Figura 30 - Rugosidade máxima (R_y).....	44
Figura 31 - Representação esquemática do corpo de prova.....	46
Figura 32 - Substrato e revestimento PVD.....	47
Figura 33 - Substrato e revestimento CVD.....	48
Figura 34 - Comparação da microestrutura para as duas classes.....	49
Figura 35 - Torno da marca ROMI modelo GL 240M.....	50
Figura 36 - Equipamento para técnica MQL da marca Accu-lube.....	51
Figura 37 - Rugosímetro Mahr modelo MarSurf M300/MahrSurf RD 18.....	52
Figura 38 - Microscópio da marca Mahr modelo MahrVision MM 200.....	52
Figura 39 - Microscópio da marca Zeiss, modelo Stemi 2000.....	53
Figura 40 - Microscópio eletrônico de varredura da marca Zeiss, modelo EVO LS15.....	53
Figura 41 - MEV da ferramenta na <i>Condição 2: 150-0,25-0,5 (PVD a seco) – Replica..</i>	66

Figura 42 - EDS com mapa de cores da ferramenta na <i>Condição 2: 150-0,25-0,5</i> (PVD a seco) – Replica	67
Figura 43 - MEV da ferramenta na <i>Condição 4: 150-0,25-0,5 (PVD com MQL)</i> – Replica.....	68
Figura 44 - EDS com mapa de cores da ferramenta na <i>Condição 4: 150-0,25-0,5</i> (PVD com MQL) – Replica.....	69
Figura 45 - Desgaste de flanco por comprimento usinado para ferramenta PVD.....	70
Figura 46 - Rugosidade por comprimento usinado para ferramenta PVD.....	71
Figura 47 - Desgaste de flanco por comprimento usinado para ferramenta CVD.....	78
Figura 48 - Rugosidade média por comprimento usinado para ferramenta CVD.....	79
Figura 49 - Desgaste de flanco para ferramenta PVD e CVD na $v_c = 125$ m/min.....	80
Figura 50 - Desgaste de flanco para ferramenta PVD e CVD na $v_c = 150$ m/min.....	81
Figura 51 - Rugosidade para ferramenta PVD e CVD na $v_c = 125$ m/min.....	82
Figura 52 - Rugosidade para ferramenta PVD e CVD na $v_c = 150$ m/min.....	83

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 -	Designações, composições, propriedades mecânicas para aços inoxidáveis.....	5
Quadro 2 -	Principais grupos de materiais para ferramentas de corte.....	20
Quadro 3 -	Imagens das formas dos cavacos na Condição 1 para ferramenta PVD.....	58
Quadro 4 -	Imagens das formas dos cavacos na Condição 2 para ferramenta PVD.....	59
Quadro 5 -	Imagens das formas dos cavacos na Condição 3 para ferramenta PVD.....	60
Quadro 6 -	Imagens das formas dos cavacos na Condição 4 para ferramenta PVD.....	61
Quadro 7 -	Imagens dos desgastes das ferramentas na Condição 1 para ferramenta PVD...	62
Quadro 8 -	Imagens dos desgastes das ferramentas na Condição 2 para ferramenta PVD....	63
Quadro 9 -	Imagens dos desgastes das ferramentas na Condição 3 para ferramenta PVD....	64
Quadro 10 -	Imagens dos desgastes das ferramentas na condição 4 para ferramenta PVD.....	65
Quadro 11 -	Imagens das formas dos cavacos na Condição 1 para ferramenta CVD.....	72
Quadro 12 -	Imagens das formas dos cavacos na Condição 2 para ferramenta CVD.....	73
Quadro 13 -	Imagens das formas dos cavacos na Condição 3 para ferramenta CVD.....	74
Quadro 14 -	Imagens das formas dos cavacos na Condição 4 para ferramenta CVD.....	74
Quadro 15 -	Imagens dos desgastes da ferramenta na Condição 1 para ferramenta CVD.....	75
Quadro 16 -	Imagens dos desgastes da ferramenta na Condição 2 para ferramenta CVD.....	76
Quadro 17 -	Imagens dos desgastes da ferramenta na Condição 3 para ferramenta CVD.....	76
Quadro 18 -	Imagens dos desgastes da ferramenta na Condição 4 para ferramenta CVD.....	77

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Composição química do aço inoxidável martensítico AISI 410.....	45
Tabela 2 - Dados das amostras.....	46
Tabela 3 - Matriz de experimento dos ensaios para ferramenta de PVD.....	54
Tabela 4 - Matriz de experimento dos ensaios para ferramenta de CVD.....	54

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	1
2	OBJETIVOS.....	2
3	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	3
3.1	AÇOS INOXIDÁVEIS.....	3
3.1.1	Aço inoxidável martensítico AISI 410.....	6
3.2	TRATAMENTOS TÉRMICOS.....	6
3.2.1	Operações de tratamento térmico.....	7
3.3	PROCESSO DE USINAGEM.....	8
3.4	PROCESSO DE TORNEAMENTO.....	9
3.4.1	Superfícies definidas sobre a peça.....	11
3.4.2	Partes construtivas de uma ferramenta de corte.....	12
3.5	ASPECTOS TRIBOLÓGICOS QUE INFLUENCIAM NA USINAGEM....	13
3.5.1	Formação dos cavacos.....	13
3.5.2	Tipos de cavacos.....	15
3.5.3	Forma dos cavacos.....	15
3.5.4	Interface cavaco/ferramenta.....	17
3.5.5	Influência da temperatura na usinagem.....	18
3.6	FERRAMENTAS DE CORTE.....	19
3.6.1	Ferramenta de metal duro.....	21
3.6.2	Revestimentos das ferramentas.....	21

3.6.3	Desgastes das ferramentas de corte na usinagem.....	26
3.6.4	Mecanismos causadores do desgaste da ferramenta.....	30
3.6.5	Medição dos desgastes das ferramentas.....	31
3.7	USINABILIDADE DOS METAIS.....	33
3.7.1	Medição do índice de usinabilidade.....	33
3.7.2	Principais fatores que influenciam na determinação do índice de usinabilidade.....	34
3.7.3	Usinabilidade dos aços inoxidáveis martensíticos.....	34
3.8	FLUIDOS DE CORTE.....	35
3.8.1	Classificação dos fluidos de corte.....	37
3.8.2	Mínima quantidade de lubrificante (MQL).....	38
3.9	INTEGRIDADE SUPERFICIAL.....	40
3.9.1	Rugosidade.....	42
3.9.2	Critérios para avaliar a rugosidade.....	43
3.9.3	Parâmetros de rugosidade.....	43
4	MATERIAIS E MÉTODOS.....	45
4.1	MATERIAL.....	45
4.2	CORPOS DE PROVA.....	46
4.3	FERRAMENTAS DE CORTE UTILIZADAS NO TORNEAMENTO.....	46
4.4	EQUIPAMENTOS UTILIZADOS.....	49
4.4.1	Torno CNC.....	49
4.4.2	Equipamento para técnica MQL.....	50

4.4.3	Rugosímetro.....	52
4.4.4	Microscópios.....	52
4.5	METODOLOGIA APLICADA.....	54
4.5.1	Procedimento do ensaio de usinagem por torneamento.....	54
4.5.2	Análise da superfície usinada.....	55
4.5.3	Análise dos desgastes das ferramentas de corte.....	55
4.5.4	Análise dos cavacos.....	56
5	RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	57
5.1	FERRAMENTA DE METAL DURO COM REVESTIMENTO PVD.....	57
5.1.1	Análise das formas dos cavacos para ferramenta PVD.....	57
5.1.2	Análise das imagens dos desgastes das ferramentas PVD.....	62
5.1.3	Análise das imagens de MEV e EDS com mapa de cores para para ferramenta PVD.....	66
5.1.4	Análise dos desgastes de flanco ($V_{Bmáx}$) para ferramenta PVD.....	70
5.1.5	Rugosidade média (R_a).....	71
5.2	FERRAMENTA DE METAL DURO COM REVESTIMENTO CVD.....	72
5.2.1	Análise da forma dos cavacos para ferramenta CVD.....	72
5.2.2	Análise das imagens dos desgastes das ferramentas CVD.....	75
5.2.3	Análise dos desgastes de flanco ($V_{Bmáx}$) para ferramenta CVD.....	78
5.2.4	Análise da rugosidade média (R_a) para ferramenta CVD.....	79
5.3	COMPARAÇÃO DA FERRAMENTA COM REVESTIMENTO PVD E CVD.....	80

5.3.1	Desgaste de flanco ($V_{Bm\acute{a}x}$) para as ferramentas PVD e CVD com $v_c = 125$ m/min.....	80
5.3.2	Desgaste de flanco ($V_{Bm\acute{a}x}$) para as ferramentas PVD E CVD com $v_c = 150$ m/min.....	81
5.3.3	Rugosidade R_a para as ferramentas PVD e CVD na $v_c = 125$ m/min.....	82
5.3.4	Rugosidade R_a para as ferramentas PVD e CVD na $v_c = 150$ m/min.....	83
6	CONCLUSÕES.....	85
7	REFERÊNCIAS.....	86
8	REFERÊNCIAS CONSULTADAS.....	91

1. INTRODUÇÃO

A seleção de materiais para fabricar produtos que atendam às expectativas dos clientes é uma das tarefas mais complexas da engenharia atualmente. Os avanços tecnológicos influenciaram significativamente os processos de fabricação e também os materiais utilizados. Esses materiais devem possuir algumas propriedades mecânicas, tais como: resistência mecânica, à corrosão e oxidação, tenacidade, dureza, ductilidade, etc. Entre esses diversos materiais destacam-se os aços inoxidáveis que possuem adições de cromo que aumentam sua resistência mecânica e à oxidação/corrosão. São aplicados na fabricação de válvulas, bombas de equipamentos, ferramentas de cutelaria, eixos acionadores, hastes de pistão, componentes construtivos de turbinas hidrelétricas e instrumentação cirúrgica.

A usinabilidade dos aços inoxidáveis é difícil devido a sua alta resistência à tração, alta taxa de encruamento e caráter abrasivo. Esta combinação de propriedades frequentemente resulta em elevadas forças de corte, temperaturas, taxas de desgaste da ferramenta.

Segundo Stephenson e Agapiou (2006) as ligas de aço inoxidável martensítico podem conter carbono, molibdênio, e níquel para aumentar a resistência. Assim como em outros materiais, o aumento da dureza tipicamente reduz a vida da ferramenta e a usinabilidade. O aumento do teor de carbono aumenta a proporção de carbeto de cromo abrasivos na matriz e diminui a vida da ferramenta. O aumento do teor de níquel aumenta a dureza recozida e diminui a usinabilidade. O fator metalúrgico que tem uma forte influência na usinabilidade é a proporção de ferrita livre na matriz; geralmente a usinabilidade aumenta com o teor de ferrita livre.

No processo de usinagem desse material é necessário utilizar ferramentas de corte que possuam dureza e tenacidade adequadas para resistir aos desgastes e avarias inerentes ao processo. Dessa forma, o conhecimento das características do material e a escolha adequada das ferramentas de corte influenciam diretamente.

Esse trabalho tem como proposta verificar as melhores condições de usinagem do aço inoxidável martensítico AISI 410 tratado termicamente utilizando ferramentas de corte de metal duro revestidas com PVD e CVD nas condições de usinagem a seco e Mínima Quantidade de Lubrificante (MQL).

2. OBJETIVOS

Esse trabalho tem como objetivos:

- Estudar a melhor condição no processo de usinagem para aços inoxidáveis martensíticos tratados termicamente utilizando ferramenta de metal duro com revestimentos PVD e CVD nas condições a seco e com MQL.
- Analisar o desempenho e as condições das ferramentas de corte submetidas à variação dos parâmetros de corte, tais como: velocidade de corte, avanço e profundidade de usinagem.
- Avaliar a forma dos cavacos gerados no processo e o acabamento superficial das peças.

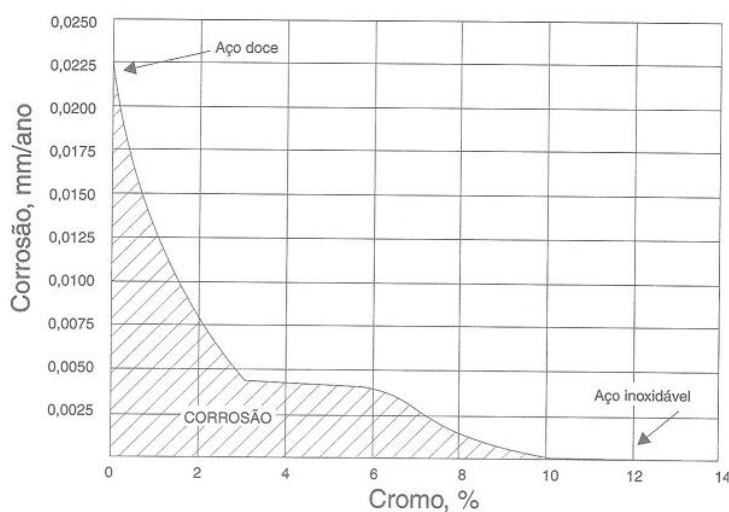
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Esse capítulo tem como objetivo abordar os tópicos que tem significativa relação com a proposta da dissertação e dessa forma, proporcionar conhecimento para uma melhor compreensão dos assuntos relacionados com o tema do trabalho.

3.1 AÇOS INOXIDÁVEIS

Três milênios entre a descoberta do ferro e o desenvolvimento de um meio para impedir a sua corrosão, os primeiros aços inoxidáveis foram introduzidos apenas no início do século 20. Estes materiais são protegidos pela formação espontânea de uma camada passiva (DURAND-CHARRE, 2004). Os aços inoxidáveis são um grande grupo de ligas especiais desenvolvidas principalmente para resistir à corrosão. Outras características desejáveis podem incluir excelente formabilidade, alta resistência criogênica, e boa resistência à descamação, oxidação e resistência à deformação a elevadas temperaturas. O cromo é o elemento de liga que confere resistência à corrosão para os aços inoxidáveis, mas muitos outros elementos podem ser adicionados para estabilizar outras fases, proporcionar resistência à corrosão, ou produzir propriedades mecânicas melhoradas (KRAUSS, 2005), conforme Figura 1.

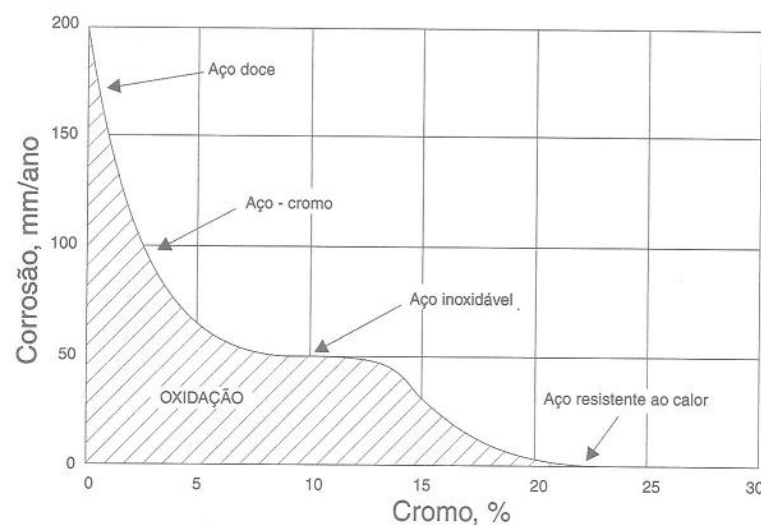
Figura 1 – Passividade dos aços-cromo expostos durante 10 anos na atmosfera industrial.



Fonte: (CHIAVERINI, 1998)

Aços inoxidáveis são ligas à base de ferro contendo pelo menos 10,5% de Cr. Poucos aços inoxidáveis contêm mais do que 30% de Cr e menos do que 50% de Fe. Estes obtêm suas características inoxidáveis através de uma invisível e aderente camada superficial de óxido de cromo. Outros elementos adicionados para melhorar características particulares incluem níquel, molibdênio, cobre, titânio, alumínio, etc. A seleção dos aços inoxidáveis pode ser baseada na resistência à corrosão, características de fabricação, propriedades mecânicas em específicos intervalos de temperaturas e custo de produto. Entretanto, resistência à corrosão e propriedades mecânicas são usualmente os mais importantes fatores na seleção de uma classe para uma determinada aplicação (ASM METALS HANDBOOK, 1985). Na Figura 2, verifica-se o efeito do cromo na resistência do aço à oxidação a altas temperaturas. O efeito mais positivo do cromo, neste caso, só se desenvolve quando o seu teor está acima de 20%.

Figura 2 – Efeito do cromo na resistência dos aços à oxidação a altas temperaturas.



Fonte: (CHIAVERINI, 1986)

Os aços inoxidáveis de acordo com sua microestrutura são geralmente divididos em cinco grupos: aços inoxidáveis martensíticos, aços inoxidáveis ferríticos, aços inoxidáveis austeníticos, aços inoxidáveis duplex (austenítico-ferrítico) e aços inoxidáveis endurecíveis por precipitação (ASM METALS HANDBOOK, 1985).

Aços inoxidáveis martensíticos: são ligas de ferro e cromo (11-18%) com teor de carbono, em geral, acima de 0,1%. Estas composições interceptam o campo austenítico no diagrama de

fases sendo, portanto, endurecíveis por tratamento térmico de têmpera. São magnéticos. Incluem-se nesta família os aços: (AISI) 403, 410, 414, 416, 420, 431, 440A, 440B, 440C e 501 (SILVA; MEI, 2010). No Quadro 1 são apresentadas algumas propriedades mecânicas dos aços inoxidáveis.

Quadro 1 – Designações, composições, propriedades mecânicas para aços inoxidáveis.

Número AISI	Número UNS	Composição (%p) ^a	Condição	Propriedades Mecânicas		
				Limite de Resistência à Tração [MPa (ksi)]	Limite de Escoamento [MPa (ksi)]	Ductilidade [%AL em 50 mm (2 pol.)]
Ferrítico						
409	S40900	0,80 C, 11,0 Cr, 1,0 Mn, 0,50 Ni, 0,75 Ti	Recozido	380 (55)	205 (30)	20
446	S44600	0,20 C, 25 Cr, 1,5 Mn	Recozido	515 (75)	275 (40)	20
Austenítico						
304	S30400	0,08 C, 19 Cr, 9 Ni, 2,0 Mn	Recozido	515 (75)	205 (30)	40
316L	S31603	0,03 C, 17 Cr, 12 Ni, 2,5 Mo, 2,0 Mn	Recozido	485 (70)	170 (25)	40
Martensítico						
410	S41000	0,15 C, 12,5 Cr, 1,0 Mn	Recozido	485 (70)	275 (40)	20
			T & R	825 (120)	620 (90)	12
440A	S44002	0,70 C, 17 Cr, 0,75 Mo, 1,0 Mn	Recozido	725 (105)	415 (60)	20
			T & R	1790 (260)	1650 (240)	5
Endurecível por Precipitação						
17-7PH	S17700	0,09 C, 17 Cr, 7 Ni, 1,0 Al, 1,0 Mn	Endurecido por precipitação	1450 (210)	1310 (190)	1-6

^a Restante da composição é constituída por ferro

T e R significa temperado e revenido

Fonte: (CALLISTER, 2002)

3.1.1 Aço inoxidável martensítico AISI 410

Segundo Tsai, Chiou e Yang (2002) o aço inoxidável martensítico AISI 410 é o progenitor nos aços inoxidáveis martensíticos de baixo carbono, e é amplamente utilizado em muitas indústrias para partes essenciais de muitos produtos. O estudo da austenita retida e a estrutura martensítica desse tipo de aço assumiu grande importância, devido à sua influência sobre as propriedades mecânicas.

Segundo Krauss (2005) esses aços inoxidáveis martensíticos podem ser forjados e em seguida tratados termicamente por austenitização, formação de martensita, e têmpera para muitas aplicações que requerem não só a resistência à corrosão, de alta resistência, alta dureza e resistência ao desgaste. Ainda segundo Krauss (2005), a martensita é uma fase metaestável, resultante da transformação da austenita. É uma solução sólida supersaturada de carbono, de estrutura tetragonal de corpo centrado (TCC), que é uma forma distorcida do ferro α (ferrita). No entanto, aços com teores de carbono menores que 0,2% C, que é o caso do aço AISI 410 em estudo ($<0,1\%C$), não obedece à relação de que quanto maior o teor de carbono, maior é a tetragonalidade da martensita, tendo este aço uma estrutura cristalina CCC.

As aplicações típicas para o aço AISI 410 são: palhetas para turbinas a vapor, eixo e rotores de bombas, pistões de motores marítimos; componentes para indústria petroquímica, alimentícia e farmacêutica (MEI; SILVA, 2010).

3.2 TRATAMENTOS TÉRMICOS

Segundo Chiaverini (1998) a construção mecânica exige peças metálicas com determinados requisitos, de modo a torná-las aptas a suportar satisfatoriamente as condições de serviço a que estarão sujeitas. Esses requisitos relacionam-se principalmente com a completa isenção de tensões internas e propriedades mecânicas compatíveis com as cargas previstas. Os processos de produção nem sempre fornecem os materiais de construção nas condições desejadas: as tensões que se originam no processo de fundição, conformação mecânica e mesmo na usinagem criam sérios problemas de distorções e empenamentos, e as estruturas resultantes não são, frequentemente, as mais adequadas, afetando no sentido negativo as propriedades mecânicas dos materiais.

Ainda segundo Chiaverini (1998) os objetivos dos tratamentos térmicos podem ser resumidos da seguinte maneira: remoção de tensões internas, aumento/diminuição da dureza, aumento da resistência mecânica, melhora da ductilidade, usinabilidade, resistência ao desgaste, resistência à corrosão, resistência ao calor. Como o tratamento térmico envolve ciclo de aquecimento-temperatura, os fatores a considerar são os seguintes: aquecimento, tempo de permanência à temperatura, ambiente do aquecimento e resfriamento.

3.2.1 Operações de tratamento térmico

Segundo Silva e Mei (2010) operações de aquecimento e resfriamento controlados, que visam a afetar as características de aços e ligas especiais, são denominadas tratamentos térmicos. Os principais tratamentos térmicos são: recozimento, normalização, têmpera e revenimento.

Recozimento: esse processo visa a reduzir a dureza do aço, aumentar a usinabilidade, facilitar o trabalho a frio ou atingir a microestrutura ou as propriedades desejadas.

Normalização: esse processo consiste na austenitização completa do aço, seguida de resfriamento ao ar parado ou agitado. É indicada normalmente para homogeneização da estrutura após o forjamento e antes da têmpera ou revenimento.

Têmpera: esse processo consiste em resfriar o aço, após austenitização, a uma velocidade suficientemente rápida para evitar transformações perlíticas e bainíticas na peça em questão. Deste modo, obtém-se uma estrutura metaestável martensítica. Alguns meios de têmpera são: água (pura, com adição de sal ou com adição de polímeros), óleo e ar, embora outros meios gasosos possam se empregados (nitrogênio, hélio, argônio etc.).

Revenimento: a martensita como temperada é extremamente dura e frágil. Peças deixadas permanecer nesta condição de alto tensionamento interno pode trincar. Para se atingir valores adequados de resistência mecânica e tenacidade, deve-se logo após a têmpera proceder ao revenimento. Este tratamento consiste em aquecer uniformemente até uma temperatura abaixo daquela de austenitização, mantendo o aço nesta temperatura por tempo suficiente para equalização de temperatura e obtenção das propriedades desejadas.

Segundo Colpaert (2008) quando uma peça é submetida a uma têmpera, dois fatores influenciam a velocidade com a qual as diferentes posições na peça resfriaram:

- a) A velocidade com o qual o calor é extraído na superfície da peça, que é função do meio de têmpera selecionado.
- b) A transmissão de calor, por condução, dentro da peça.

Quanto mais rápido é o resfriamento maior a severidade da têmpera. Entretanto, o potencial de ocorrência de distorção e trincas também cresce com o aumento da severidade de têmpera.

3.3 PROCESSO DE USINAGEM

A usinagem é uma tecnologia envolvida com vários tipos diferentes de processos que removem materiais a fim de fabricar produtos úteis. A aplicação da palavra usinagem tem sido muitas vezes limitada a incluir apenas os métodos mecânicos usados para moldar precisamente uma peça de trabalho através da remoção de parte do material da peça com ferramentas que possuem arestas cortantes afiadas e geometricamente precisas (ASM METALS HANDBOOK, 1985).

Para Ferraresi (1970) como operações de usinagem entendemos aquelas que, ao conferir a forma à peça, ou as dimensões ou o acabamento, ou ainda uma combinação qualquer desses três itens, produzem cavaco.

Segundo Diniz, Marcondes e Coppini (2014), os movimentos entre ferramenta e peça durante a usinagem são aqueles que permitem a ocorrência do processo de usinagem. Por convenção, os movimentos sempre estão ocorrendo supondo-se a peça parada e, portanto, todo o movimento sendo realizado pela ferramenta. Este procedimento permite padronizar sinais algébricos aos movimentos, principalmente quando a usinagem ocorre com ferramentas de geometrias complexas.

3.4 PROCESSO DE TORNEAMENTO

Segundo Trent e Wright (2000) torneamento é a operação de usinagem mais comumente empregada em trabalhos de corte de metal. O material a ser cortado é fixado ao mandril de um torno e rotacionado, enquanto a ferramenta, presa firmemente no porta-ferramenta, move-se em plano que, idealmente, contém o eixo de rotação da peça, conforme Figura 3.

Figura 3 – Processo de torneamento

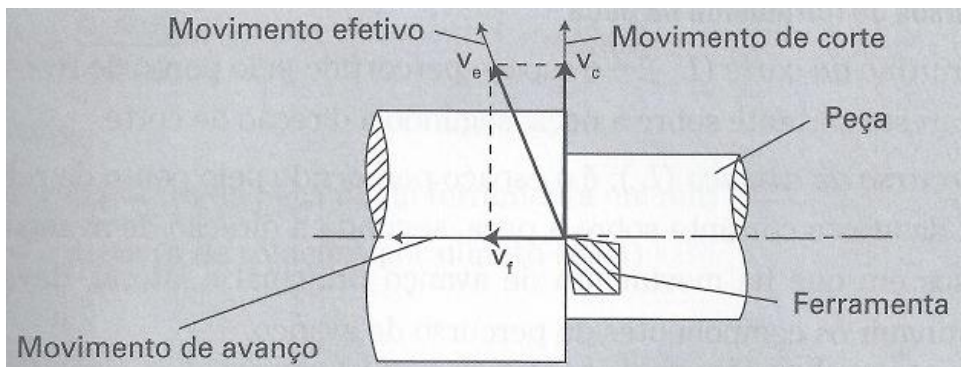


Fonte: (TRENT; WRIGHT, 2000)

Para Machado et al. (2015) a operação de torneamento pode ser subdividida em desbaste e acabamento.

Na Figura 4 são destacados os movimentos, direções, ângulos e plano de trabalho no processo de torneamento.

Figura 4 – Direção dos movimentos de corte, de avanço e efetivo no torneamento



Fonte: (MACHADO et al., 2015)

Segundo Machado et al. (2015) os movimentos de uma operação de torneamento são:

Movimento de corte: é aquele entre a ferramenta e a peça que, sem a ocorrência concomitante do movimento de avanço, provoca remoção de cavaco durante uma única rotação ou um curso da ferramenta.

Movimento de avanço: ocorre entre a ferramenta e a peça e que, com o movimento de corte, possibilita uma remoção contínua ou repetida do cavaco, durante várias rotações ou cursos da ferramenta.

Movimento efetivo de corte: movimento entre a ferramenta e a peça a partir do qual resulta o processo de usinagem. Quando o movimento de avanço é contínuo, o movimento efetivo de corte é o resultado da composição dos movimentos de corte e de avanço.

Os movimentos passivos são aqueles que, apesar de fundamentais para a realização do processo de usinagem, não promovem remoção de material ao ocorrerem. São eles: movimento de ajuste, movimento de correção, movimento de aproximação e movimento de recuo. A todos esses estão associados direções, sentidos, velocidades e percursos. As direções dos movimentos são suas direções instantâneas, os sentidos são aqueles resultantes quando se considera a peça parada e a ferramenta realizando todo movimento e as velocidades dos movimentos são suas velocidades instantâneas.

Torneamento cilíndrico: Processo de torneamento no qual a ferramenta se desloca segundo uma trajetória paralela ao eixo principal de rotação da máquina. Pode ser externo ou interno. Na Figura 5 é apresentado o processo de torneamento cilíndrico externo.

Figura 5 – Processo de torneamento cilíndrico externo



Fonte: Autor

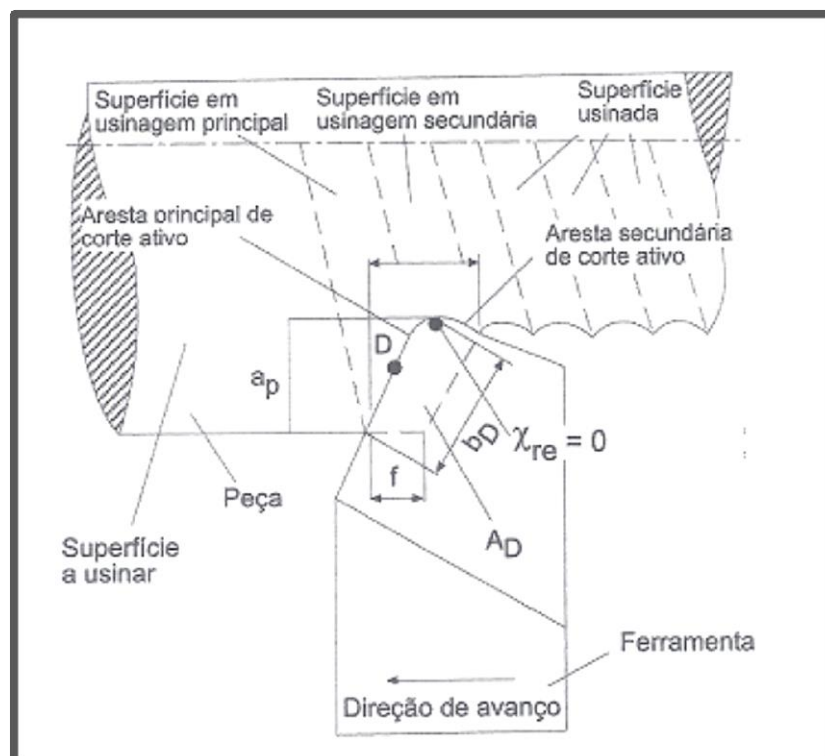
3.4.1 Superfícies definidas sobre a peça

De acordo com Diniz, Marcondes e Coppini (2014) as superfícies definidas sobre a peça são:

- *Superfície a usinar*: superfície da peça antes da operação de usinagem.
- *Superfície em usinagem*: aquela que está sendo gerada pela ferramenta. Ter-se-á a superfície em usinagem principal ou secundária quando a geração da mesma estiver ocorrendo pela ação da aresta principal de corte, ou da aresta secundária de corte, respectivamente.
- *Superfície usinada*: é a que foi gerada pelo processo de usinagem.

Na Figura 6 são mostradas as superfícies definidas sobre a peça durante o processo de usinagem.

Figura 6 – Superfícies definidas sobre a peça usinada



Fonte: (DINIZ; MARCONDES; COPINNI, 2014)

3.4.2 Partes construtivas de uma ferramenta de corte

Segundo Diniz, Marcondes e Coppini (2014), todos os conceitos introduzidos adiante se referem a um ponto de corte escolhido na aresta de corte, para uma determinada situação instantânea de evolução do processo de usinagem. As ferramentas de usinagem apresentam, geralmente, as seguintes partes construtivas:

Parte de corte - parte ativa da ferramenta constituída pelas suas cunhas de corte. A parte ativa da ferramenta é construída ou fixada sobre um suporte ou cabo da ferramenta, através do qual é possível fixar a ferramenta para construção, afiação, reparo, controle e trabalho.

Cunha de corte - é a cunha da ferramenta, formada pela intersecção das superfícies de saída e de folga.

Superfície de saída (A_γ) - é a superfície da cunha de corte sobre a qual o cavaco é formado e escoado durante sua saída da região de corte.

Superfície principal de folga (A_α) - é a superfície da cunha de corte da ferramenta que contém sua aresta principal de corte e que defronta com a superfície em usinagem principal.

Superfície secundária de folga (A'_α) - é a superfície da cunha de corte da ferramenta que contém sua aresta de corte secundária e que defronta com a superfície em usinagem secundária.

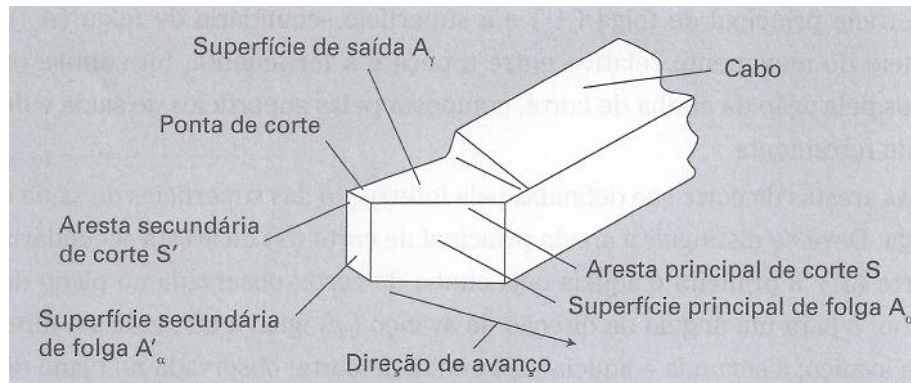
Aresta principal de corte (S) - é a aresta da cunha de corte formada pela intersecção das superfícies de saída e de folga principal. Gera na peça a superfície em usinagem principal.

Aresta secundária de corte (S') - é a aresta da cunha de corte formada pela intersecção das superfícies de saída e de folga secundária. Gera na peça a superfície em usinagem secundária.

Ponta de corte - é a parte da cunha de corte onde se encontram as arestas principal e secundária de corte. A ponta de corte pode ser a intersecção das arestas, ou a concordância das duas arestas através de um arredondamento, ou o encontro destas através de um chanfro.

Na Figura 7 são destacadas as arestas de cortes e superfícies de corte de uma ferramenta de torneamento.

Figura 7 – Arestas de corte e superfícies de uma ferramenta de torneamento



Fonte: (MACHADO et al., 2015)

3.5 ASPECTOS TRIBOLÓGICOS QUE INFLUENCIAM NA USINAGEM

Segundo Santos e Sales (2007) tribologia é a ciência que estuda aspectos relativos ao contato entre as superfícies, e seus efeitos como atrito, desgaste e lubrificação. As superfícies em contato e o meio no qual estão inseridas são denominadas sistemas tribológicos. Assim o par ferramenta/peça e o ambiente constituem um sistema tribológico e os fenômenos relacionados ao movimento entre a ferramenta e a peça são avaliados.

Quando um metal é cortado, a força de corte atua principalmente em uma pequena área da face inclinada, que está em contato com o cavaco e, assim, é conhecida como a interface cavaco-ferramenta. Portanto, é de interesse na determinação da força de corte, no desenvolvimento da teoria de desgaste da ferramenta e na compreensão dos mecanismos de formação dos cavacos para estabelecer as características tribológicas da interface ferramenta-cavaco (ASTAKHOV, 2006).

3.5.1 Formação dos cavacos

Segundo Trent e Wright (2000) o cavaco é extremamente variável em forma e tamanho nas operações de usinagem industrial. A formação de todos os tipos de cavacos envolve um cisalhamento do material na região de trabalho de um plano que se estende a partir da borda da ferramenta para a posição onde a superfície superior do cavaco deixa a superfície de trabalho.

Segundo Ferraresi (1970) em geral, a formação de cavaco, nas condições normais de usinagem com ferramenta de metal duro ou de aço rápido, se processa da seguinte forma:

- a) Durante a usinagem, devido à penetração da ferramenta na peça, uma pequena porção de material (ainda solidária à peça) é recalcada contra a superfície de saída da ferramenta.
- b) O material recalcado sofre uma deformação plástica, a qual aumenta progressivamente, até que as tensões de cisalhamento se tornem suficientemente grandes, de modo a se iniciar um *deslizamento* (sem que haja com isto uma perda de coesão) entre a porção de material recalcado e a peça. Este deslizamento se realiza segundo os *planos de cisalhamento dos cristais* da porção de material recalcada.
- c) Continuando a penetração da ferramenta em relação à peça, haverá uma *ruptura parcial* ou *completa* na região de cisalhamento, dependendo naturalmente da ductilidade do material e das condições de usinagem. Para os *materiais altamente deformáveis*, a ruptura se realiza somente nas imediações da aresta cortante, o cavaco originado é denominado *cavaco contínuo*. Para os *materiais frágeis*, se origina o *cavaco de cisalhamento ou de ruptura*.
- d) Prosseguindo, devido ao movimento relativo entre a ferramenta e a peça, inicia-se um escorregamento da porção de material deformada e cisalhada (cavaco) sobre a superfície de saída da ferramenta. Enquanto isso ocorre, uma nova porção de material (imediatamente adjacente à porção anterior) está se formando e cisalhando. Esta nova porção de material irá também escorregar sobre a superfície de saída da ferramenta, repetindo novamente o fenômeno.

Dessa forma, conclui-se que o *fenômeno da formação do cavaco*, nas condições normais de trabalho com ferramenta de metal duro ou de aço rápido é um *fenômeno periódico*, inclusive a formação do cavaco contínuo. Tem-se alternadamente uma fase de recalque e uma fase de escorregamento, para cada pequena porção de material removido. Esta afirmação da periodicidade do fenômeno foi comprovada experimentalmente por meio de filmagem e por meio da medida da frequência e da amplitude da variação da intensidade da força de usinagem.

Importante também no estudo da formação dos cavacos é a divisão que é feita nos tipos de cavacos e nas formas de cavacos, definições estas que serão esclarecidas a seguir.

3.5.2 Tipos de cavacos

Para Trent e Wright (2000), o cavaco é extremamente variável na forma e tamanho nas operações de usinagem industrial. A formação de todos os tipos de cavacos envolve um cisalhamento do material de trabalho, na região de um plano que se estende a partir da extremidade da ferramenta para a posição onde a superfície superior do cavaco deixa a superfície de trabalho. Uma grande quantidade de tensão ocorre nessa região em um curto intervalo de tempo, e nem todos os metais e ligas podem resistir a esta condição sem cisalhar. Cavacos de ferro fundido cinzento, por exemplo, são sempre fragmentados, e os cavacos de materiais mais dúcteis podem ser produzidos como contínuos, particularmente a uma velocidade de corte muito baixa. O cavaco descontínuo é um dos principais tipos de cavacos, e tem a vantagem prática que é facilmente afastado da área de corte. Sob a maioria das condições de corte, no entanto, metal dúctil e ligas não cisalham no plano de cisalhamento e um cavaco contínuo é produzido.

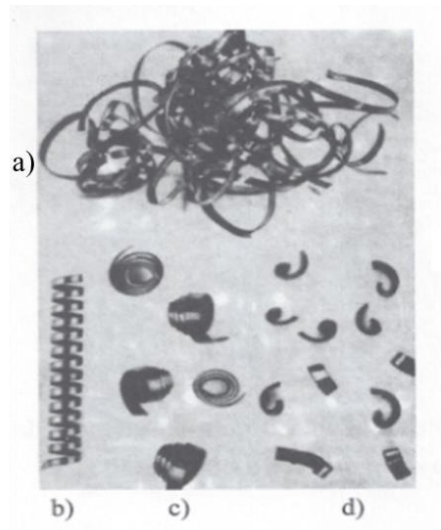
3.5.3 Forma dos cavacos

Além da classificação quanto ao tipo de cavaco, ocorre também à classificação dos cavacos contínuos e descontínuos quanto a sua forma.

Ainda segundo Trent e Wright (2000) antes de discutir a formação dos cavacos, são descritos os métodos experimentais utilizados para a coleta de informação. As condições simplificadas usadas nas primeiras fases das investigações laboratoriais são conhecidas como corte ortogonal. No corte ortogonal a aresta da ferramenta é linear, e é perpendicular à direção de corte, e, portanto, perpendicular à direção de avanço. Num torno, essas condições são asseguradas pelo uso de uma ferramenta com a aresta de corte horizontal, na linha de centro, e em ângulos retos em relação ao eixo de rotação da peça de trabalho.

Existem quatro formas de cavacos: cavacos em fita, helicoidal, espiral e lascas, conforme Figura 8.

Figura 8 – Formas do cavaco: a) em fita; b) helicoidal; c) espiral; d) em lascas



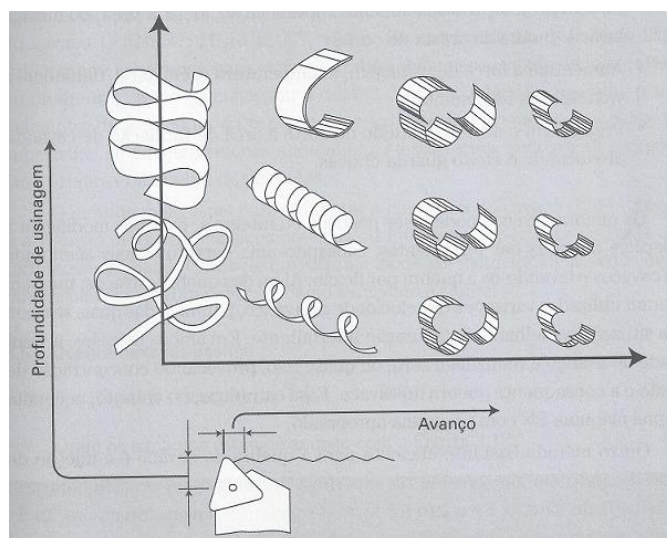
Fonte: (DINIZ; MARCONDES; COPPINI, 2014)

A forma do cavaco pode ser alterada das seguintes formas:

- Alterando os parâmetros de corte.
- Alterando a superfície de saída da pastilha.
- Usando elementos especiais (quebra-cavaco) na superfície de saída.

Na Figura 9 é mostrada a variação na forma dos cavacos em função do avanço e da profundidade de corte.

Figura 9 – Efeito da profundidade e avanço na forma dos cavacos



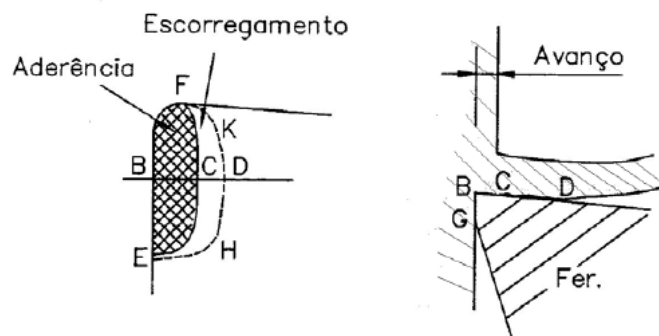
Fonte: (MACHADO et al., 2015)

3.5.4 Interface cavaco-ferramenta

Para Trent (1991) as condições em que o escorregamento do cavaco sobre a superfície de saída ocorre influenciam significativamente em todo o processo, principalmente, no mecanismo de formação do cavaco, força de usinagem, calor gerado durante o corte, e consequentemente na temperatura de corte; mecanismos e taxa de desgaste das ferramentas de corte.

Atualmente uma das teorias mais aceitas nos meios científicos é a da existência de uma região delimitada entre o cavaco e a ferramenta denominada zona de aderência. Nas proximidades da zona de aderência existe uma região chamada zona de escorregamento, ambas as zonas são indicadas na Figura 10 sendo que a linha BC representa a zona de aderência e a linha CD representa a zona de escorregamento (TRENT, 1991).

Figura 10 - Área de contato cavaco-ferramenta

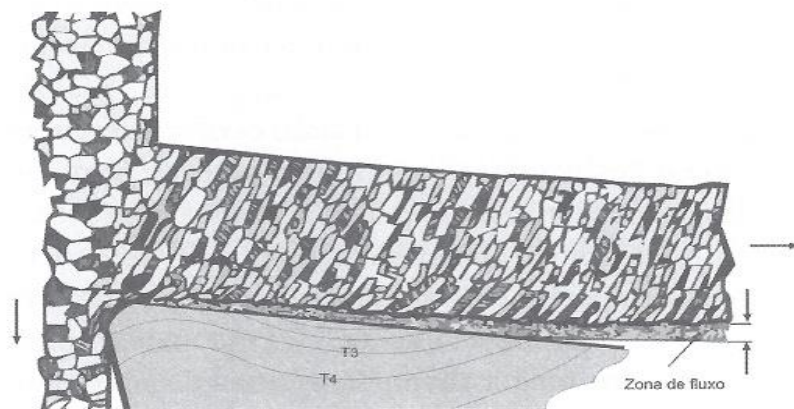


Fonte: Adaptado de (TRENT, 1991)

Segundo Trent e Wright (2000) as condições na interface, de escorregamento ou aderência, dependem do par ferramenta-peça, do tempo de usinagem e da velocidade de corte. As condições de aderência são favorecidas por altas velocidades de corte, longos tempos de usinagem e pequenas diferenças entre o material da peça e a ferramenta. Quanto menor o ângulo de saída da ferramenta maior a zona de aderência.

Nestas condições, o movimento do cavaco na zona de aderência logo acima da interface ocorre por cisalhamento intenso, criando a chamada zona de fluxo no cavaco. Assim na interface cavaco-ferramenta existe uma camada de material em que a velocidade de saída do cavaco aumenta gradualmente à medida que se percorre sua espessura. Esta camada é a chamada zona de fluxo. Terminada esta zona de fluxo, acaba o cisalhamento e a velocidade de saída do cavaco se torna constante. A zona de fluxo pode ser verificada na Figura 11.

Figura 11 – Zona de fluxo dentro do cavaco



Fonte: (DINIZ; MARCONDES; COPPINI, 2014)

3.5.5 Influência da temperatura na usinagem

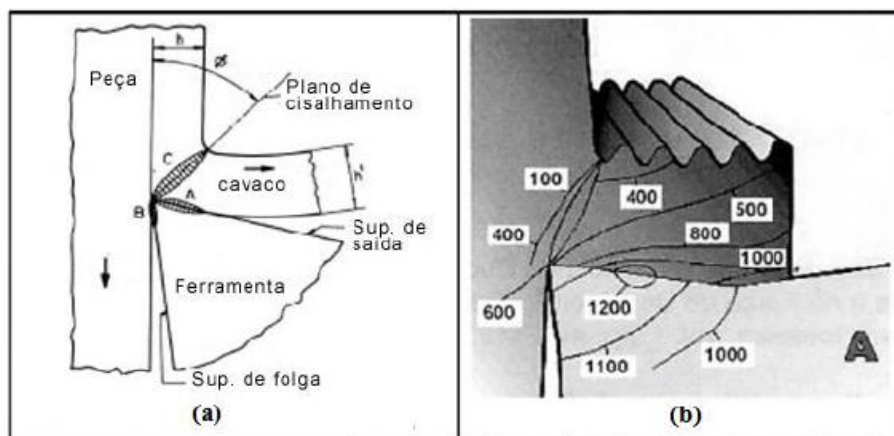
A maior parte da potência consumida na usinagem dos metais é convertida em calor próximo à aresta cortante da ferramenta e muitos problemas técnicos e econômicos são causados direta ou indiretamente por conta desse aquecimento (TRENT, 1988a).

Segundo Machado et al. (2015) o custo da usinagem depende da quantidade de remoção de metal e pode ser reduzido quando se aumenta a velocidade de corte e/ou a velocidade de avanço, porém há limites para essas velocidades, acima dos quais a vida da ferramenta é drasticamente diminuída e o custo, elevado.

Em 1798, foi apresentado pela primeira vez na Academia Real de Londres, pelo conde Rumford (Benjamim Thonson), o registro de experiências em usinagem, realçando o seu aspecto térmico (FERRARESI, 1970). Os resultados mostraram que, praticamente, toda a energia mecânica envolvida na usinagem se transforma em energia térmica. Do ponto de vista econômico, a vida da ferramenta é um item de grande importância, pois depende mais da temperatura atingida na interface ferramenta/cavaco que da quantidade total de calor liberada durante a operação. O calor liberado na interface ferramenta/cavaco que vai para ferramenta provoca um aumento da temperatura nas vizinhanças da ponta. Com esse aumento, a dureza, ou resistência ao cisalhamento do material da ferramenta, decresce. Em casos extremos, a aresta cortante chega a fundir-se.

Fontes geradoras de calor no processo de usinagem são mostradas na Figura 12, tais como: a deformação e o cisalhamento do cavaco no plano de cisalhamento primário (região C), o atrito do cavaco com a ferramenta (região A) e o atrito da ferramenta com a peça (região B) de acordo com Diniz; Marcondes e Copinni (2010).

Figura 12 – (a) Fontes de geração de calor na formação dos cavacos e (b) distribuição de temperatura em uma ferramenta



Fonte: (adaptado de Bahia, 2010)

O calor é dissipado através dos cavacos, da peça, da ferramenta e do fluido de corte. O percentual do calor gerado que é dissipado por cada um dos meios citados varia com os diversos parâmetros de usinagem e materiais envolvidos.

As altas temperaturas na superfície de saída permitem a ativação dos mecanismos de desgaste da ferramenta como difusão e abrasão. A temperatura na superfície de folga causa mudanças na microestrutura, tensões residuais e nas propriedades do material da peça, afetando também o desgaste de flanco e falha da ferramenta, mesmo que prematuramente.

3.6 FERRAMENTAS DE CORTE

Para Stephenson e Agapiou (2006) o projeto da ferramenta de corte tem um forte impacto no desempenho da usinagem. Uma ferramenta projetada inadequadamente pode desgastar ou lascrar rapidamente ou de forma imprevisível, reduzindo a produtividade, aumentando os custos e produzindo peças com qualidade deterioradas. Qualquer avanço tecnológico da ferramenta de corte tem uma grande influência sobre a produtividade e economia de um processo.

Para Shaw (2005) existem três requisitos importantes que diferenciam um material para ferramenta de corte, tais como: estabilidade física e química à alta temperatura, resistência ao desgaste abrasivo e resistência à ruptura frágil. Um dado material de ferramenta não é geralmente excelente com relação a todos esses três requisitos.

Segundo Machado et al. (2015) os principais grupos de materiais de ferramentas são apresentados a seguir, conforme Quadro 2.

Quadro 2 – Principais grupos de materiais para ferramentas de corte

1. Aço-carbono	 Aumento de dureza e resistência ao desgaste	 Aumento de tenacidade
• Comum		
• Com elementos de liga (V, Cr)		
2. Aço semirrápido (baixo W)		
3. Aço rápido (pode ser fundido ou fabricado pela metalurgia do pó)		
• Sem revestimento		
• Com revestimento		
4. Aço super-rápido (elevado teor de V)		
5. Ligas fundidas		
6. Metal duro (pode ser com ou sem revestimento)		
Classes:		
• P		
• M		
• K		
• N		
• S		
• H		
7. Cermets (podem ser com ou sem revestimento)		
8. Cerâmicas		
• Com e sem revestimento		
• À base de Si_3N_4		
• À base de Al_2O_3		
• Pura		
• Com adições		
• ZrO_2 (branca)		
• TiC (preta ou mista)		
• SiC (<i>whiskers</i>)		
9. Ultraduros		
• CBN – PCBN		
• PCD		
10. Diamante natural		

Fonte: (MACHADO et al., 2015)

3.6.1 Ferramenta de Metal Duro

Segundo Shaw (2005) as ferramentas de carbeto de tungstênio foram desenvolvidas pela primeira vez na Alemanha em 1927 e produzidas pela Widia Corporation. As primeiras ferramentas de carbeto de tungstênio de sucesso foram trazidas da Alemanha em 1928 para os Estados Unidos. Estas ferramentas consistiam de partículas de carbeto de tungstênio finamente moídas e sinterizadas em conjunto com o ligante (cobalto).

Segundo Trent e Wright (2000) as matérias-primas utilizadas nas ferramentas de Metal Duro são feitas por fusão e subsequente redução de tamanho de partículas por moagem em moinho de bola a um pó fino. O cobalto é o metal mais eficiente para ligação com o carbeto de tungstênio. Os pós são prensados, compactados e sinterizados por meio de aquecimento em atmosfera de hidrogênio acima de 1.300 °C. Esses carbetos são fortemente metálicos, tem boa condutividade elétrica, térmica e aparência metálica. Apesar de terem apenas uma ligeira capacidade de se deformar plasticamente sem fraturar à temperatura ambiente, também são deformados pelo mesmo mecanismo que ocorre nos metais, por movimentos de deslocamento.

3.6.2 Revestimentos das ferramentas

Segundo Diniz e Oliveira (2004 apud CHINCHANIKAR e CHOUDHURY, 2015, p. 95), a fabricação está mudando rapidamente em todo o mundo com o presente contexto de manufatura sustentável, as exigências de processos de fabricação mais econômicos e ecologicamente corretos estão aumentando e provocaram o crescimento comercial rápido de revestimentos, destaca-se por ser uma das melhores soluções para resolver os problemas ambientais que ocorrerem devido à usinagem com fluido.

Para Grzesik (2008 apud CHINCHANIKAR e CHOUDHURY, 2015, p. 95), à luz das grandes variedades de influências de revestimentos no contato e fenômenos tribológicos, a escolha do composto de revestimento e sua estrutura devem ser voltadas para as condições específicas de combinação ferramenta/peça e processo.

Para Thamizhmanii, Nagib e Sulaiman (2011) a tecnologia das ferramentas de corte é rapidamente melhorada e este desenvolvimento é necessário para melhorar a resistência ao desgaste e desempenho de usinagem em materiais de difícil corte. A melhora do desempenho

pode ser conseguida aumentando a resistência das ferramentas de corte em termos de resistência ao desgaste.

Nos últimos anos, a tendência de utilização da tecnologia de revestimento foi fomentada pela necessidade do aumento da velocidade de corte e de avanço. Ferramentas de corte de Metal Duro são revestidas usando dois métodos diferentes: a deposição física a vapor (PVD) e deposição química a vapor (CVD). Nos últimos anos, a comparação de revestimentos PVD e CVD a partir do desempenho de usinagem tem sido objeto de muita pesquisa (SADIK, MYRTVEIT, 2011; NIU et al., 2013).

a) Physical Vapor Deposition (PVD)

Para Shaw (2005) o processo PDV é realizado por evaporação, deposição catódica ou revestimento iônico. A evaporação é efetuada sob vácuo. Os átomos ou moléculas a partir de uma fonte aquecida vaporizam e atingem o substrato sem risco de colisão com as moléculas residuais na câmara de vácuo. Para evitar tal colisão e para evitar que as moléculas residuais contaminem o substrato, um alto vácuo é necessário. Deposição por evaporação é o mais eficiente dos processos PVD em termos energéticos e é a opção mais escolhida.

Segundo Fernández-Abia et al. (2013) atualmente os revestimentos PVD representam uma área muito importante de estudo no âmbito da nanotecnologia e micro-tribologia. Algumas aplicações de torneamento requerem ferramentas específicas com geometrias e revestimentos aperfeiçoados. A disponibilidade de ferramentas com arestas de corte afiadas é essencial no torneamento leve de pequenas peças; de modo que, a operação suave é favorecida com forças de corte mínima, evitando deformações de peças e, conseqüentemente, erros dimensionais. Neste caso, o processo de PVD é ótimo para a obtenção de arestas afiadas, desde as camadas de revestimento pode se aplicar uma espessura de alguns micrometros sobre um substrato resistente, o que ajuda a manter a integridade da aresta.

Para Demircioglu (2014) este processo realiza-se a cerca de 500 °C e, em seguida, a ferramenta de corte é recoberta sob vácuo.

Segundo Shaw (2005) uma série de fatores que influenciam a qualidade de um revestimento de PVD são:

- Limpeza inicial da superfície do substrato.
- Acabamento e solidez (ausência de defeitos) na superfície do substrato inicial.
- Geometria da superfície do substrato.

- Procedimentos de pós-processamento (por exemplo, polimento, tratamento térmico).

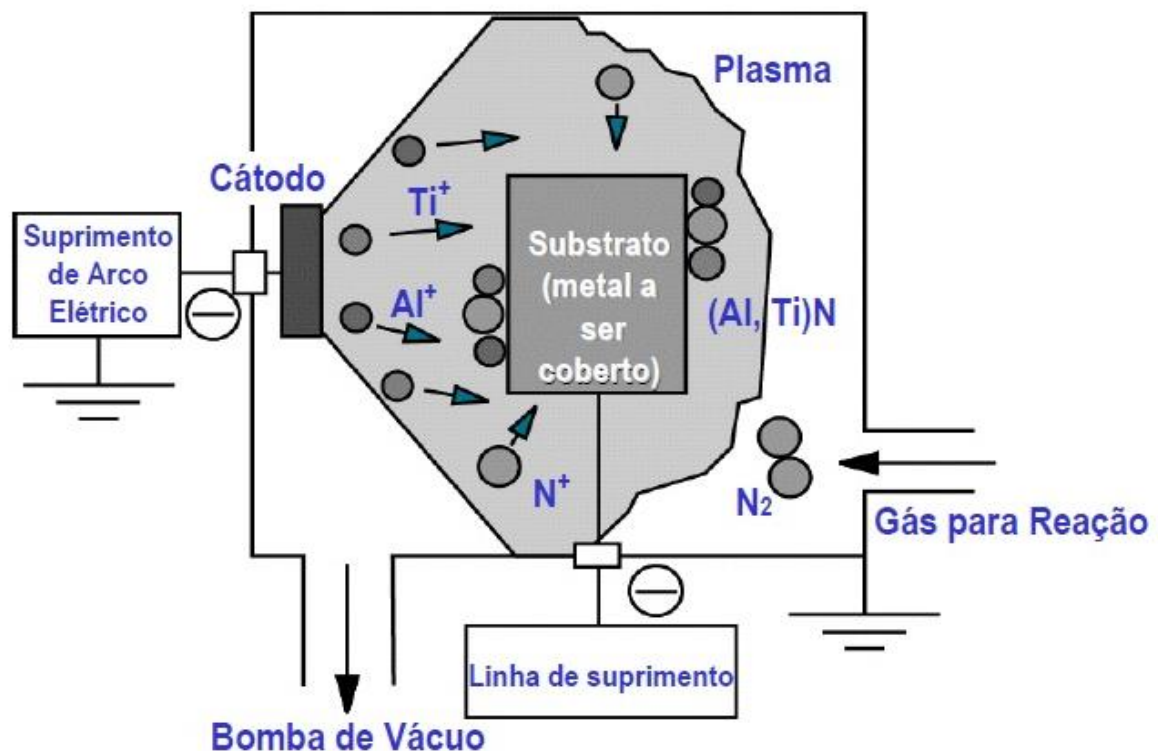
Os três revestimentos básicos que representam aproximadamente 92% dos revestimentos utilizados em 2001 foram:

- TiAlN, para usinagem a seco em alta velocidade.
- TiCN, para o corte interrompido.
- TiN, para o uso em geral.

Ainda segundo Fernández-Abia et al. (2013) revestimentos de PVD fornecem resistência ao desgaste devido à sua elevada dureza. Esses revestimentos são caracterizados por tensões de compressão que proporcionam tenacidade para melhorar a aresta e também a confiabilidade da ferramenta, e são recomendados quando tenacidade e aresta afiada são necessárias simultaneamente.

Na Figura 13 verifica-se o processo de PVD por implantação iônica.

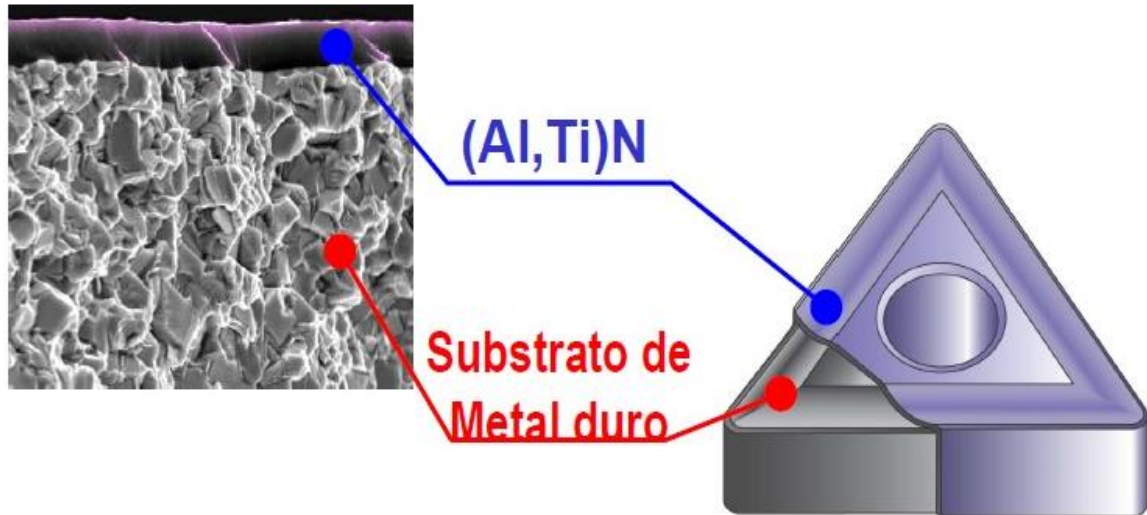
Figura 13 – Processo de PVD por implantação iônica



Fonte: Adaptado de (MACHADO et al., 2015)

O revestimento PVD de camada simples pode ser verificado na Figura 14.

Figura 14 – Revestimento de camada simples no processo PVD



Fonte: (MITSUBISHI, 2005)

b) Chemical Vapor Deposition (CVD)

Segundo Shaw (2005) revestimento CVD envolve a aplicação de material sólido a partir de uma fase gasosa por meio de reação química que ocorre perto de um substrato aquecido para formar uma película fina. Tais revestimentos podem ser aplicados a superfícies com formas complicadas que não são planas. CVD é aplicável apenas quando a temperatura do substrato requerido é aceitável.

Embora outros carbetos e nitretos (por exemplo, carbeto e nitreto de háfnio) têm sido utilizados como revestimentos de forma limitada apenas três materiais de revestimento estão atualmente amplamente em uso comercial (TiC, TiN, Al_2O_3). Embora TiC e Al_2O_3 parecem fornecer a seleção de camada mais quimicamente estável entre cavaco e ferramenta, TiN parece oferecer o menor atrito para ferramenta.

Ainda segundo Shaw (2005) revestimentos de CVD envolvem normalmente uma temperatura de 1000 °C. Revestimentos de CVD são aplicados isoladamente, em combinação, ou em várias camadas para aumentar a tenacidade e com uma espessura total de 5-20µm.

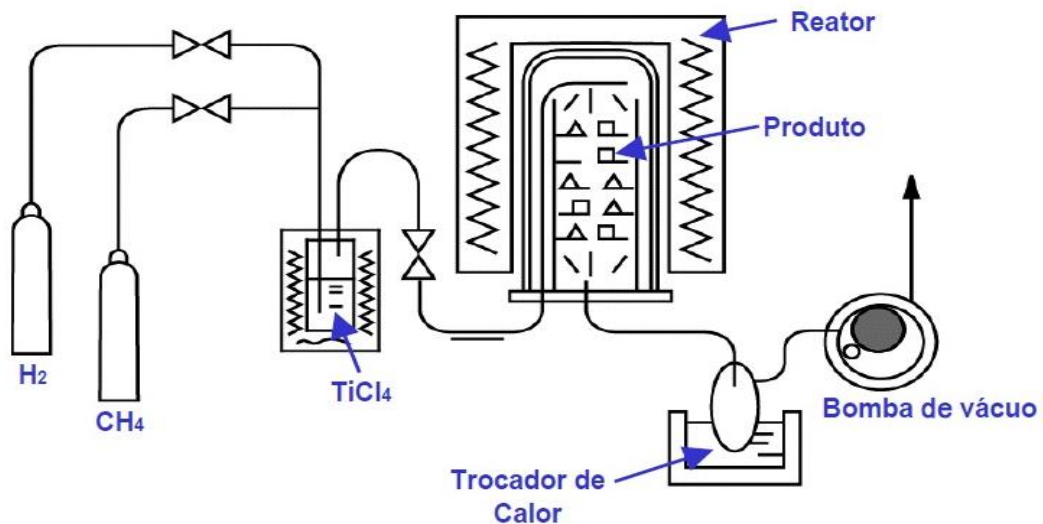
Os principais materiais de revestimentos e as razões para o seu uso são:

- TiN, para diminuir atrito e aresta postiça.

- TiC, aumento de dureza.
- Al_2O_3 , para melhora da barreira térmica.

Na Figura 15 pode-se verificar o processo CVD.

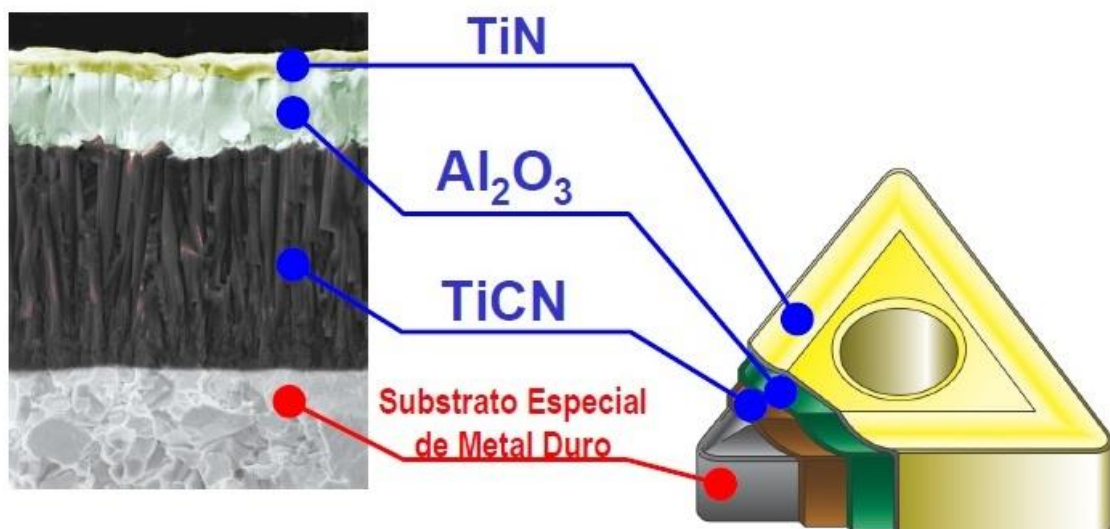
Figura 15 – Processo CVD



Fonte: Adaptado de (MACHADO et al., 2015)

O revestimento CVD do tipo multicamadas é apresentado na Figura 16.

Figura 16 – Revestimento de multicamadas no processo CVD



Fonte: (MITSUBISHI, 2005)

3.6.3 Desgastes das ferramentas de corte na usinagem

Segundo Stephenson e Agapiou (2006) a vida da ferramenta é muitas vezes a consideração prática mais importante na escolha de ferramentas de corte e condições de corte. Ferramentas as quais desgastam ou caso contrário falham lentamente têm vida relativamente mais longa. Por estas razões, a vida da ferramenta é o critério mais utilizado para avaliar o desempenho de corte da ferramenta e a usinabilidade de materiais.

Para Diniz, Marcondes e Coppini (2014) diversos são os tipos de desgastes e avarias que acontecem em uma ferramenta de usinagem. Antes de defini-los é importante diferenciá-los. Desgaste é a perda contínua e microscópica de partículas da ferramenta devido à ação do corte. As demais ocorrências são denominadas avarias. Tipos de desgastes e avarias:

Desgaste frontal (ou de flanco): ocorre na superfície de folga da ferramenta causado pelo contato entre ferramenta e peça. É o mais comum dos tipos de desgaste. Todo processo de usinagem causa desgaste frontal. Na Figura 17 é apresentado um exemplo de desgaste frontal.

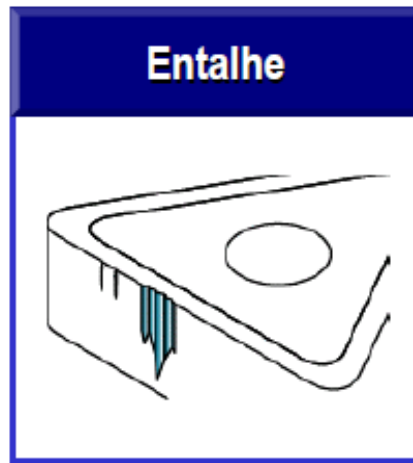
Figura 17 – Desgaste frontal da ferramenta de corte de Metal Duro revestida com PVD



Fonte: Autor

Desgaste de entalhe: a formação desse desgaste ocorre nos dois extremos de contato entre a superfície de folga e a peça. Este tipo de desgaste muda a forma da ponta da ferramenta e, com isso, influencia no acabamento da superfície usinada, conforme Figura 18.

Figura 18 – Desgaste de entalhe



Fonte: (MITISUBISHI, 2005)

Desgaste de cratera: é o que ocorre na superfície de saída da ferramenta, causado pela difusão entre a ferramenta e cavaco. Na Figura 19 é apresentado um exemplo de desgaste de cratera.

Figura 19 – Desgaste de cratera na ferramenta de Metal Duro revestida com PVD



Fonte: Autor

Deformação plástica da aresta de corte: é um tipo de avaria da ferramenta. Muitas vezes a pressão aplicada à ponta da ferramenta, somada à alta temperatura, gera a deformação da aresta de corte, que toma uma forma bem típica, conforme Figura 20.

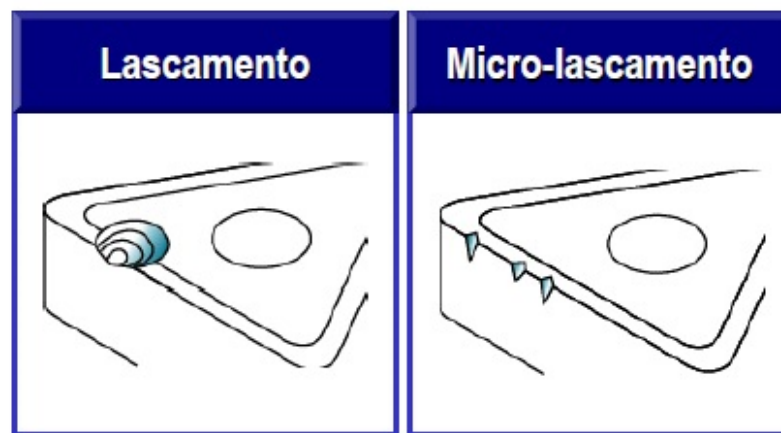
Figura 20 – Deformação plástica da aresta de corte



Fonte: (MITISUBISHI, 2005)

Lascamento/micro-lascamento: é um tipo de avaria da ferramenta. Ao contrário do desgaste frontal e de cratera, que retiram continuamente partículas muito pequenas da ferramenta, no lascamento partículas maiores são retiradas subitamente, conforme Figura 21.

Figura 21 – Lascamento e micro-lascamento



Fonte: (MITISUBISHI, 2005)

Trincas: são avarias provocadas pela variação da temperatura e/ou dos esforços mecânicos. Quando as trincas têm origem térmica (variação da temperatura), ocorrem perpendicularmente à aresta de corte e quando têm origem mecânica são paralelas à aresta, na Figura 22 são demonstradas as trincas de origem térmica.

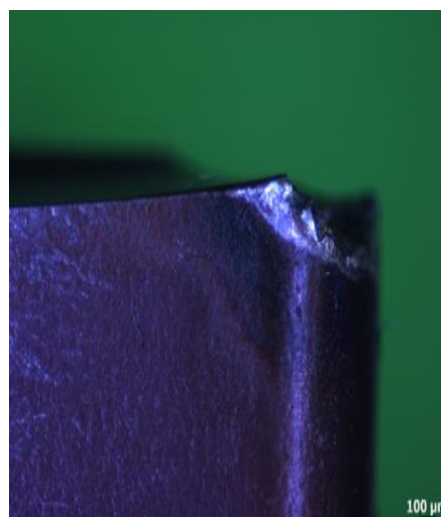
Figura 22 – Trincas de origem térmicas



Fonte: (MITISUBISHI, 2005)

Quebra: quando os desgastes e as avarias da ferramenta crescem, podem causar a quebra da aresta. Algumas vezes, porém, a quebra pode ocorrer inesperadamente devido a alguns fatores, como: ferramenta muito dura, carga excessiva sobre a ferramenta, raio de ponta, ângulo de ponta ou ângulo de cunha pequeno. Na Figura 23 é apresentado um exemplo de quebra de ferramenta.

Figura 23 – Quebra da ferramenta de Metal Duro revestida com PVD



Fonte: Autor

3.6.4 Mecanismos causadores do desgaste da ferramenta

Segundo Stephenson e Agapiou (2006) os mecanismos que produzem os vários tipos de desgaste descritos anteriormente dependem dos materiais envolvidos, da geometria da ferramenta, e das condições de corte, principalmente relacionado com a velocidade de corte (temperatura de corte).

Para Ferraresi (1970) o desgaste de uma ferramenta de metal duro é o resultado da ação de vários fenômenos distintos, denominados *componentes do desgaste*. Dependendo da natureza do material usinado e das condições de usinagem, predominará uma ou outra das componentes dos desgastes sobre as demais. Em velocidades de corte baixas, o desgaste das ferramentas de Metal Duro é relativamente elevado por causa *da aresta postiça de corte*.

Segundo Diniz, Marcondes e Coppini (2014) vários são os fenômenos causadores dos desgastes da ferramenta. Os principais são: aresta postiça de corte, abrasão mecânica, aderência (*attrition*), difusão e oxidação.

Segundo Stephenson e Agapiou (2006) a aresta postiça de corte pode ser definida como material da peça acumulada na aresta de corte da ferramenta. Devido à sua natureza instável, a aresta postiça quebra periodicamente.

- a) *Abrasão mecânica*: a abrasão é umas das principais causas de desgaste da ferramenta. Tanto o desgaste frontal quanto o desgaste de cratera podem ser gerados pela abrasão, porém é mais proeminente no desgaste frontal, já que a superfície de folga atrita com um elemento rígido, que é a peça, enquanto a superfície de saída atrita com um elemento flexível, que é o cavaco (DINIZ; MARCONDES; COPPINI, 2014).
- b) *Aderência (attrition)*: se duas superfícies metálicas são postas em contato submetidas a cargas moderadas, altas temperaturas e baixas velocidades de corte possibilitam a formação entre elas de um extrato metálico que provoca aderência. A resistência desse extrato é elevada a tal ponto que, na tentativa de separar as superfícies, ocorre ruptura em um dos metais e não na superfície de contato. Assim, partículas da superfície de um metal migram para a superfície do outro material (DINIZ; MARCONDES; COPPINI, 2014).
- c) *Difusão*: a difusão entre o cavaco é um fenômeno microscópico ativado pela temperatura na zona de corte. A difusão no estado sólido consiste na transferência de

um metal a outro. Depende da temperatura, da duração do contato, da afinidade físico-química e da intensidade do contato entre os metais envolvidos.

- d) Oxidação: altas temperaturas e presença de ar e água (contida nos fluidos de corte) geram oxidação para a maioria dos metais. A maioria dos fluidos de corte contém elementos anti-oxidantes e, por isso, o fluido propriamente não causa oxidação. Porém, quando não se toma os cuidados necessários para a conservação do fluido na máquina, ele pode se tornar ácido e provocar corrosão/oxidação na ferramenta.

3.6.5 Medição dos desgastes da ferramenta

Segundo Machado et al. (2015) convencionou-se medir os desgastes no plano ortogonal da ferramenta. Distinguem-se os desgastes na superfície de saída e na superfície de folga da ferramenta. Assim temos:

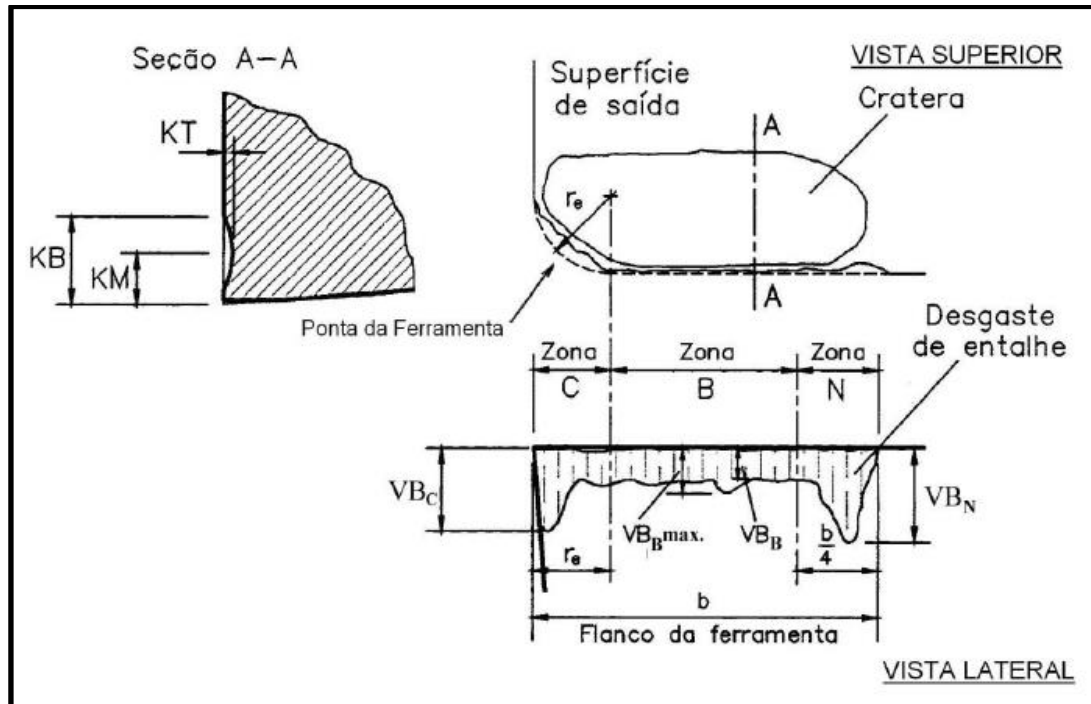
- Profundidade de cratera (K_T).
- Desgaste de flanco médio (V_{BB}).
- Desgaste de flanco máximo ($V_{Bmáx}$).

O critério para o fim de vida recomendado pela Norma ISO 3685 (1993) para ferramentas Metal Duro é:

- Desgaste de flanco máximo, $V_{Bmáx} = 0,3\text{mm}$.
- Profundidade da cratera, $K_T = 0,06 + 0,3f$ onde f é avanço em mm/rot.
- Falha catastrófica (quebra da ferramenta).

Na Figura 24 são apresentados os parâmetros para medir os desgastes das ferramentas de corte.

Figura 24 – Parâmetros para medir os desgastes das ferramentas



Fonte: (NORMA ISO 3685, 1993)

A progressão do desgaste de flanco (V_{Bmax}), e as rugosidades, serão correlacionados com o comprimento de corte usinado (L_c). A seguir será apresentada a equação anteriormente citada:

$$L_c = \frac{L_f \cdot \pi \cdot d}{1000 \cdot f} (m) \quad (3.1)$$

Fonte: (FERRARESI, 1970)

Onde:

L_f = comprimento de avanço da operação [mm]

d = diâmetro da peça usinada [mm]

f = avanço [mm/rev]

3.7 USINABILIDADE DOS METAIS

“A usinabilidade de uma liga é semelhante ao sabor do vinho - facilmente apreciado, mas não é facilmente medido em termos quantitativos” (Adaptado de TRENT; WRIGHT, 2000).

Segundo Trent e Wright (2000) o termo usinabilidade é usado em inúmeros livros, “papers” e discussões. Ele pode ser tomado como uma propriedade ou uma qualidade de um material que pode ser claramente definida. Para experiências de algumas pessoas em particular, a usinabilidade de um material de trabalho pode muitas vezes ser medida em termos do número de componentes produzidos por hora; o custo de usinagem do componente; ou a qualidade do acabamento sobre uma superfície crítica.

3.7.1 Medição do índice de usinabilidade

Para Diniz, Marcondes e Coppini (2014) o método mais aceito para medição do índice de usinabilidade é um ensaio chamado de ensaio de longa duração, no qual o material ensaiado e o material definido como padrão são usinados até o fim da vida da ferramenta, ou até um determinado valor de desgaste da ferramenta (V_B ou K_T), em diversas velocidades de corte diferentes. O ensaio permite a obtenção da velocidade de corte para uma vida determinada da ferramenta (20 minutos V_{C20} ou 60 minutos V_{C60}). Dessa forma, o índice de usinabilidade (I.U) é então dado pela relação entre V_{C20} (ou V_{C60}) do material ensaiado e aquela correspondente ao material tomado como padrão, ao qual se dá o índice 100%.

$$I.U = V_{C20} (\text{material ensaiado}) / V_{C20} (\text{material padrão})$$

O material padrão mais utilizado quando se trata de ensaios de aços é o aço AISI B1112. Este ensaio de longa duração leva em conta a propriedade de usinagem (como critério de usinabilidade) vida da ferramenta. Existem outros ensaios chamados de curta duração, além do critério de vida da ferramenta, tais como: a força de usinagem, acabamento superficial, etc.

3.7.2 Principais fatores que influenciam na determinação do índice de usinabilidade

Segundo Ferraresi (1970) o índice de usinabilidade dos metais deve ser analisado através da influência das variáveis dos seguintes componentes, intimamente relacionados:

- Material da peça.
- Processo mecânico e condições de usinagem.
- Critério empregado na avaliação.

Com relação ao material da peça os fatores que mais influem sobre a usinabilidade são:

- Composição química.
- Microestrutura.
- Dureza.
- Propriedades das tensões e deformações.
- Rigidez da peça.

Em relação aos processos de fabricação e as condições de usinagem os aspectos que mais influenciam na usinabilidade são:

- Material da ferramenta.
- Condições de usinagem (velocidade, avanço, profundidade, geometria da ferramenta, etc.).
- Fluidos de corte.
- Rigidez da máquina, ferramenta e do sistema de fixação da peça.
- Tipos de trabalhos executados pela ferramenta (operação empregada corte contínuo ou intermitente, condições de entrada e saída da ferramenta).

3.7.3 Usinabilidade dos aços inoxidáveis martensíticos

Segundo Tessler e Barbosa (2002) a melhora da usinabilidade dos aços inoxidáveis geralmente está acompanhada de uma queda na resistência à corrosão. Nos últimos anos, tem-se utilizado a técnica de controle das inclusões óxidas para melhorar a usinabilidade, sem

deterioração das outras propriedades. Isto é alcançado através de tratamento especial durante a fabricação do aço líquido. Além disso, a melhoria na usinabilidade tem apresentado ainda algumas interferências nas propriedades mecânicas do aço.

Segundo Stephenson e Agapiou (2006) os aços inoxidáveis contêm uma alta proporção de cromo, geralmente acima de 11%. Estes são geralmente difíceis para se usinar por sua alta resistência à tração, alta ductilidade, alto encruamento, baixa condutividade térmica e caráter abrasivo. Esta combinação de propriedades frequentemente resulta em altas forças de corte, altas temperaturas e altas taxas de desgaste da ferramenta, assim como uma susceptibilidade ao desgaste tipo entalhe, dificuldades na quebra de cavacos, formação de aresta postiça e um acabamento ruim da superfície usinada. Como a maioria dos materiais, aumentando a dureza tipicamente reduz a vida da ferramenta e a usinabilidade. Aumentando o teor de carbono aumenta a proporção de carbeto de cromo abrasivos na matriz e reduz a vida da ferramenta e a usinabilidade. O fator metalúrgico que tem forte influência na usinabilidade é a proporção de ferrita livre na matriz; geralmente a usinabilidade aumenta com o teor de ferrita livre. Orientações gerais para usinagem de aços inoxidáveis incluem:

- Usar baixas velocidades de corte e taxas de remoção de material dos aços carbono;
- Usar ferramentas rígidas para evitar vibração;
- Manter avanço acima de um nível mínimo para evitar integridade superficial inferior;
- Usar ferramentas afiadas com um acabamento fino para evitar a formação de aresta postiça;
- Usar fluidos de corte adequado com as taxas de fluxo suficiente para remoção de calor.

3.8 FLUIDOS DE CORTE

Segundo Shaw (2005) as duas principais funções dos fluidos de corte são lubrificação a velocidades relativamente baixas e de refrigeração a velocidades relativamente elevadas. Em altas velocidades de corte não há tempo para o fluido penetrar na interface cavaco-ferramenta ou microfissuras na parte de trás do cavaco para fornecer lubrificação; em velocidades de

corte baixas é relativamente sem importância. Torneamento e fresamento são as operações típicas de usinagem de alta velocidade onde a refrigeração é importante.

Estes fluidos de corte desempenham um papel muito importante e muitas operações não podem ser eficazmente executadas sem o fluido correto. Eles são usados para uma série de objetivos:

- Evitar que a ferramenta, peça e máquina sofram sobreaquecimento e empenamento.
- Aumentar a vida da ferramenta.
- Melhorar o acabamento superficial.
- Ajudar a limpar os cavacos da área de corte.

Fluido com ação refrigerante: relacionado com a usinagem de aço e outros metais de elevado ponto de fusão em que a utilização de agentes de refrigeração torna-se essencial. Sua utilização é mais importante para cortar com ferramentas de aço rápido em altas velocidades, mas em muitas vezes é empregado também com ferramentas de metal duro.

Fluido com ação lubrificante: O termo lubrificação em relação aos fluidos de corte é utilizado para descrever a ação através do fluido na interface (TRENT; WRIGHT, 2000).

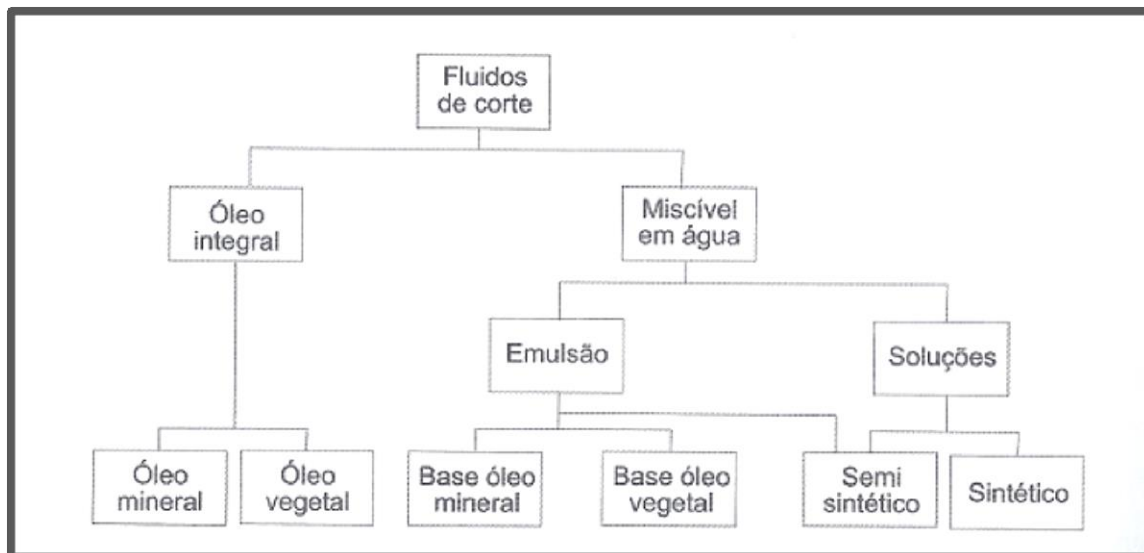
Os principais objetivos da utilização de lubrificante são os seguintes (TRENT; WRIGHT, 2000):

- Melhorar o acabamento superficial (modificando o padrão de fluxo em torno da borda de corte). Nesse aspecto, eles são particularmente eficazes e bastante efetivos a baixas velocidades de corte e taxas de avanço na presença de uma aresta postiça.
- Reduzir as forças nas ferramentas e a quantidade de calor gerado.
- Melhorar a vida da ferramenta de corte (mas em algumas circunstâncias lubrificantes podem causar um aumento na taxa de desgaste).

3.8.1 Classificação dos fluidos de corte

Segundo Diniz, Marcondes e Coppini (2014) os fluidos de corte se classificam conforme a Figura 25.

Figura 25 – Tipos de fluidos de corte



Fonte: (DINIZ; MARCONDES; COPPINI, 2014)

Tipos aquosos

Emulsões: São emulsões de óleo em água. Compõem-se de pequena porcentagem de um concentrado de óleo emulsionável, usualmente composto por óleo mineral ou vegetal, emulsificadores e outros ingredientes, dispersos em pequenas gotículas na água.

Microemulsões (fluidos semi-sintéticos): Os fluidos semi-sintéticos são também formadores de emulsões e se caracterizam por apresentarem de 5% a 50%, de óleo mineral no fluido concentrado, aditivos e compostos químicos que, verdadeiramente, dissolvem-se na água formando moléculas individuais.

Soluções químicas (fluidos sintéticos): As soluções são compostos monofásicos de substâncias químicas dissolvidas completamente em água. Esses compostos, também chamados de fluidos sintéticos, caracterizam-se por serem livres de óleo mineral em suas composições.

Óleos integrais

Em operações de usinagem em que o calor gerado por atrito é muito grande, principalmente operações de desbaste pesado, dá-se preferência ao uso de óleos puros (integrais) minerais ou vegetais ao invés de fluidos aquosos. Suas qualidades lubrificantes são bem melhores, o que resulta em menor quantidade de calor gerado. Quanto mais baixa a viscosidade desses óleos, maior é seu poder de refrigeração, por isso, os óleos leves são indicados para operações de usinagem a altas velocidades, nas quais o calor deve ser rapidamente dissipado.

Os principais fatores de escolha do fluido adequado são: material da peça, a severidade da operação (condições de usinagem), o material da ferramenta e a operação de usinagem (DINIZ; MARCONDES; COPPINI, 2014).

3.8.2 Mínima quantidade de lubrificante (MQL)

Segundo Shashidhara e Jayaram (2010) lubrificantes são amplamente utilizados em todos os setores da indústria para refrigeração e lubrificação da ferramenta e peça de trabalho. Em 2005, a quantidade de lubrificantes utilizados na usinagem foi relatada como quase 38 Mt, com um aumento estimado de 1,2% ao longo da próxima década. Aproximadamente 85% dos fluidos de corte utilizados em todo o mundo são de base mineral. O aumento da utilização de fluidos de corte provoca vários impactos negativos sobre o meio ambiente e apresenta riscos significativos para a saúde. Relata-se que cerca de 80% de todas as infecções dos operadores são devido ao contato da pele com fluidos de corte.

Weinert et al. (2004) observou que o uso de fluidos de corte afeta o meio ambiente e a saúde humana durante a sua utilização, como também durante a eliminação do fluido de corte.

A crescente consciência para a fabricação ecológica global e foco no consumidor em produtos ecologicamente corretos, colocou maior pressão sobre fábricas e pesquisadores para eliminar ou minimizar o uso de fluidos de corte. Existem várias tecnologias alternativas, tais como: mínima quantidade de lubrificação (MQL), resfriamento criogênico e lubrificante sólido, essas alternativas têm sido desenvolvidas nos últimos anos (SHARMA, DOGRA e SURI, 2009; DA SILVA et al., 2009).

Para Oliveira et al. (2012) a mínima quantidade de lubrificação (MQL) é uma técnica que utiliza um spray de pequenas gotículas de óleo em um jato de ar comprimido. O

lubrificante é pulverizado diretamente na zona de corte, evitando os enormes fluxos de água de inundação dos métodos convencionais.

Segundo Obikawa et al. (2006) uma vez que o jato de ar transporta as gotas de óleo diretamente na área de corte, ele fornece lubrificação eficiente. Quando o líquido de refrigeração utilizado é de inundação convencional existem procedimentos específicos a adotar a fim de permitir que o fluido penetre na zona de corte eficientemente.

Brinksmeier e Brockhoff (1996) afirmaram que um grande desafio na técnica MQL é a refrigeração, principalmente quando é necessária alta remoção de calor. Além disso, o menor fluxo de fluido implica em menor remoção de cavacos da zona de corte.

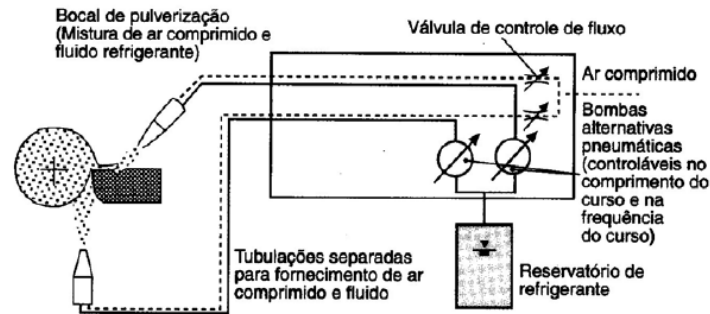
A estabilidade do jato, que significa a convergência da mistura ar-fluido, é muito importante para a aplicação, pois determina a distância até a superfície, portanto, evita o perigo de colisões entre o sistema de refrigeração e ferramenta, máquina ou peça.

Ainda de acordo com Heisel et al. (1998), a distância entre o bocal e a área de corte, ângulo de pulverização ou ajuste relativo à superfície de saída e flanco da ferramenta parecem ser parâmetros de menor importância. Isto torna mais fácil o uso da refrigeração de mínima quantidade de lubrificação nas máquinas de produção. O tipo de sistema de mínima quantidade de lubrificação mais utilizado é o de pressão, em que o fluido de corte é bombeado para o local através de uma tubulação de suprimento em separado. Neste bocal o fluido é misturado com o ar comprimido que é fornecido separadamente, de forma que as quantidades de ar e fluido podem ser ajustadas independentemente.

Heisel et al. (1998) apresentou um diagrama esquemático de um sistema de refrigeração de MQL com o princípio de pressão descrito e os seus componentes ilustrados na Figura 26. O conhecimento desta tecnologia consiste no aperfeiçoamento do projeto do bocal.

De acordo com Dhar et al. (2005) a técnica MQL refere-se ao uso de fluidos de corte em um montante tipicamente de 50-500 ml/h, que é cerca de três a quatro ordens de magnitude mais baixa do que a quantidade utilizada em condições de refrigeração por inundação .

Figura 26 - Diagrama esquemático da técnica MQL



Fonte: (Heisel et al., 1998)

3.9 INTEGRIDADE SUPERFICIAL

As superfícies produzidas por usinagem geralmente são irregulares e complexas. Apesar disso, a maioria das peças usinadas podem satisfatoriamente desempenhar suas funções gerais, especificações de textura da superfície sem complicações. A textura da superfície são desvios aleatórios ou repetitivos a partir da superfície nominal, que formam a topografia da superfície tridimensional. Uma variedade de dispositivos mecânicos, eletrônicos e ópticos está disponível para medir os desvios do perfil da peça de trabalho (ASM METALS HANDBOOK, 1985).

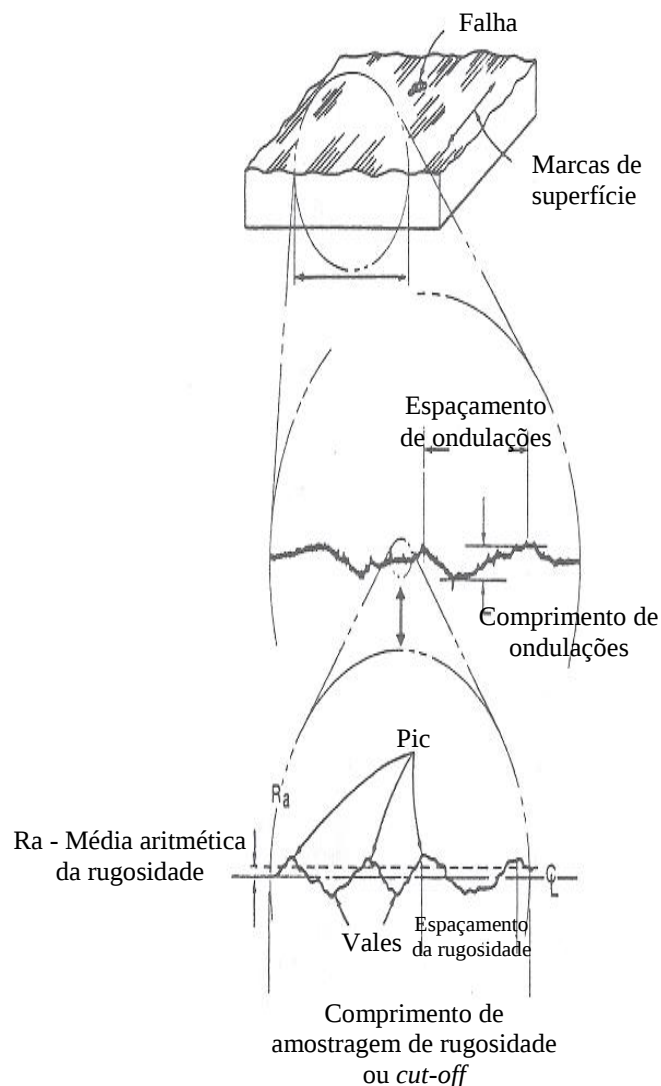
Definições para os quatro elementos da textura da superfície são as seguintes:

- *Rugosidade*: consiste das irregularidades mais finas que geralmente resultam da ação inerente do processo de produção. Estas incluem marcas de alimentação transversais e outras irregularidades dentro dos limites do comprimento de amostragem.
- *Ondulações*: inclui todas as irregularidades cujo espaçamento é maior do que o comprimento de amostragem da rugosidade e menor do que o comprimento de amostragem da ondulação.
- *Marcas na superfície*: é a direção do padrão de superfície predominante, normalmente determinado pelo método de produção utilizado.

- *Falhas*: são irregularidades acidentais, as quais ocorrem em um lugar ou relativamente pouco frequente ou em diferentes intervalos na superfície. Falhas incluem rachaduras, buracos de sopro, inclusões, fissuras, sulcos, arranhões, etc.

Acabamento de superfície: é um termo coloquial amplamente utilizado para denotar a qualidade geral de uma superfície. Acabamento de superfície não está especificamente ligada à textura ou padrão característico da superfície, nem é amarrado aos valores específicos de rugosidade. Na Figura 27 são apresentadas às características da textura da superfície (ASM METALS HANDBOOK, 1985).

Figura 27 – Características da textura superficial



Fonte: Adaptado de (ASM METALS HANDBOOK, 1985)

3.9.1 Rugosidade

Segundo Qehaja et al. (2015) o acabamento da superfície no torneamento é influenciada em quantidades variáveis por um número de fatores como velocidade de corte, avanço, profundidade de corte, características do material, a geometria da ferramenta, deflexão da peça, a estabilidade e a rigidez da máquina ferramenta-sistema ferramenta de corte/peça, fluido de corte, etc..

Segundo Horváth e Drégelyi-Kiss (2015) a rugosidade da superfície de peças usinadas é um critério importante em termos da qualidade de um produto, tais como: dimensional e tolerância geométrica. Os dois mais importantes parâmetros de rugosidade preferidos em indústrias são a média aritmética do perfil de rugosidade superficial (R_a) e altura máxima do perfil de rugosidade (R_y).

De acordo com Silva Neto (2012) a rugosidade desempenha um papel importante no comportamento dos componentes mecânicos.

São eles:

- Qualidade de deslizamento.
- Resistência ao desgaste.
- Possibilidade de ajuste do acoplamento forçado.
- Resistência oferecida pela superfície ao escoamento de fluidos e lubrificantes.
- Qualidade de aderência que a estrutura oferece às camadas protetoras.
- Resistência à corrosão e à fadiga.

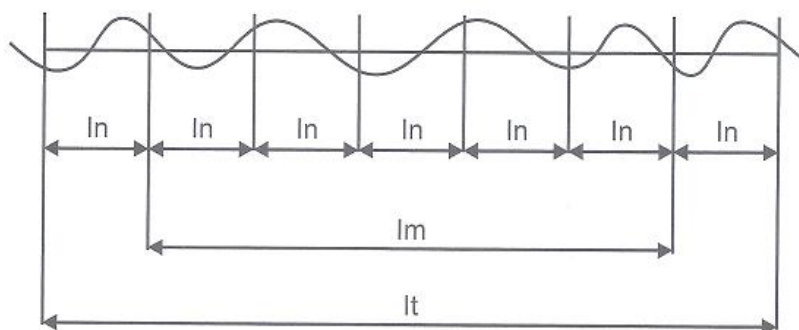
A grandeza, a orientação e o grau de irregularidade da rugosidade podem indicar suas causas, que, entre outras, são:

- Imperfeições nos mecanismos das máquinas-ferramenta.
- Vibrações no sistema peça-ferramenta.
- Desgaste das ferramentas.
- O próprio método de conformação da peça.

3.9.2 Critérios para avaliar a rugosidade

Chama-se comprimento l_e de comprimento de amostragem (*cut-off*). Como o perfil efetivo apresenta rugosidade e ondulação, o l_e filtra a ondulação. É recomendado pela norma ISO que os rugosímetros meçam 5 comprimentos de amostragem (l_m : comprimento de medição) e indiquem o valor médio (l_t : comprimento total da medição el_n : comprimento para parada do apalpador). Na Figura 28 é apresentado o comprimento para avaliação da rugosidade.

Figura 28 – Comprimento para avaliação da rugosidade



Fonte: (SILVA NETO, 2012)

3.9.3 Parâmetros de rugosidade

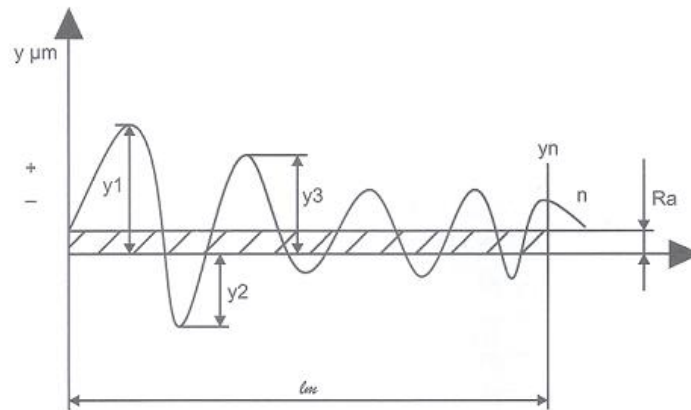
Os parâmetros de rugosidade são baseados na NORMA ABNT NBR ISO 4287:2002, que define os termos e conceitos indispensáveis para a compreensão desses parâmetros e os procedimentos de avaliação.

Rugosidade média (R_a): rugosidade média é o parâmetro mais utilizado pela indústria. É a média aritmética dos valores absolutos das ordenadas de afastamento (y_i), dos pontos do perfil de rugosidade em relação à linha média, dentro do percurso de medição (l_m).

Rugosidade máxima (R_y): Esta definida como o maior valor das rugosidades parciais (Z_i) que se apresenta no percurso de medição (l_m).

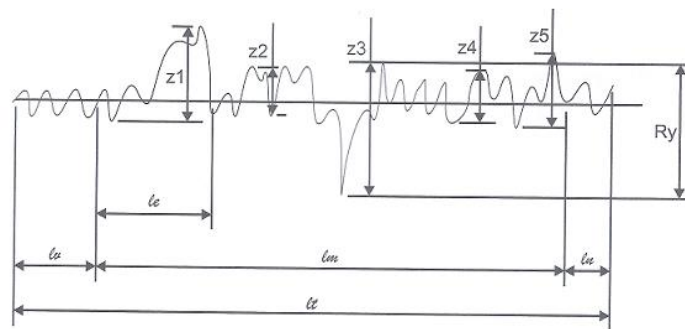
Esses parâmetros citados anteriormente são apresentados conforme Figuras 29 e 30.

Figura 29 – Rugosidade média (R_a)



Fonte: (SILVA NETO, 2012)

Figura 30 – Rugosidade máxima (R_y)



Fonte: (SILVA NETO, 2012)

4 MATERIAIS E MÉTODOS

4.1 MATERIAL

O material utilizado foi o aço inoxidável martensítico AISI 410 e possui composição química conforme Tabela 1.

Tabela 1 - Composição química do aço inoxidável martensítico AISI 410

C	Cr	S	Mo	Si	Cu	Sn	Mn	Ni	Al	N	P	Outros
0,12	12,8	0,006	0,02	0,33	0,04	0,01	0,44	0,12	0,01	0,031	0,023	...

Fonte: Adaptado de (ASM METALS HANDBOOK, 1985)

Esse material foi submetido à austenitização e em seguida a processo de têmpera e revenimento. As etapas são descritas assim:

a) Têmpera:

- *Temperatura = 1.010 °C.*
- *Tempo de patamar = 70 min.*
- *Taxa da têmpera = 24°C/min.*
- *Foi utilizado óleo como meio de resfriamento.*

b) Revenimento:

- *Temperatura = 290 °C.*
- *Tempo de patamar = 120 min.*
- *Taxa de revenimento = 6,5°C/min.*

Na Tabela 2 são apresentados os valores médios de dureza obtidos para cada amostra depois do tratamento térmico realizado.

Tabela 2 – Dados das amostras

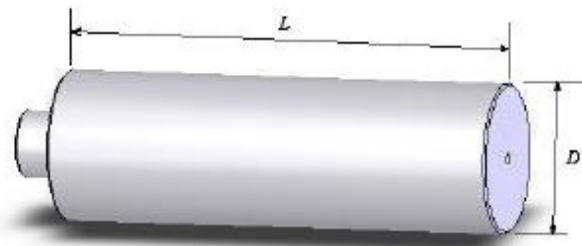
Amostras	Diâmetro (mm)	L (mm)	Tratamento Térmico	Dureza (HR _C)
1	34	175	Têmpera e Revenimento	51
2	41	210		52
3	37	265		52
4	40	208		48

Fonte: Autor

4.2 CORPOS DE PROVA

Os corpos de prova foram usinados em uma das extremidades para reduzir o diâmetro e facilitar o encaixe nas castanhas do torno, conforme a Figura 31.

Figura 31 – Representação esquemática do corpo de prova



Fonte: (Adaptado de GAMA, 2014)

4.3 FERRAMENTAS DE CORTE

Para realização dos ensaios foram utilizadas duas ferramentas de corte de Metal Duro:

- **Ferramenta 1: TH1000 com revestimento PVD (Código: CNMG 120408)**

Valores de avanço, profundidade de corte e raio de ponta para uma boa usinagem indicados pelo fabricante: $f = 0,08$ a $0,4$ mm/rev, $a_p = 0,2$ a $2,5$ mm.

- **Ferramenta 2: TH1500 com revestimento CVD (Código: CNMG 120408)**

Valores de avanço, profundidade de corte e raio de ponta para uma boa usinagem indicados pelo fornecedor: $f = 0,08$ a $0,4$ mm/rev, $a_p = 0,2$ a $2,5$ mm.

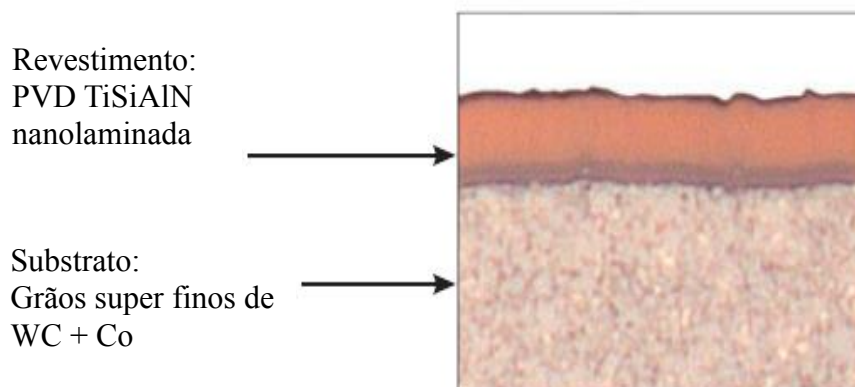
As duas ferramentas possuem o mesmo tipo de quebra-cavaco MF2, geometria e dimensional idênticos.

Quebra-cavacos MF2: É um quebra-cavaco positivo indicado para acabamento e semi-acabamento com ação de corte suave. Recomendado para uma ampla gama de cortes em acabamento de aços e aços inoxidáveis (Catálogo Torneamento SECO, 2012).

a) Revestimento TH-1000 PVD

A ferramenta TH1000 é uma classe ISO H05-H10 com cobertura PVD nanolaminada (TiSiN-TiAlN) indicada para a usinagem dos aços de elevada dureza, superligas e de ligas duras depositadas. Ela oferece resistência e durabilidade confiáveis para aplicações envolvendo esses tipos de materiais, onde as variações de dureza e os cortes interrompidos são frequentemente encontrados (Catálogo Torneamento SECO, 2012), conforme Figura 32.

Figura 32 – Substrato e revestimento PVD



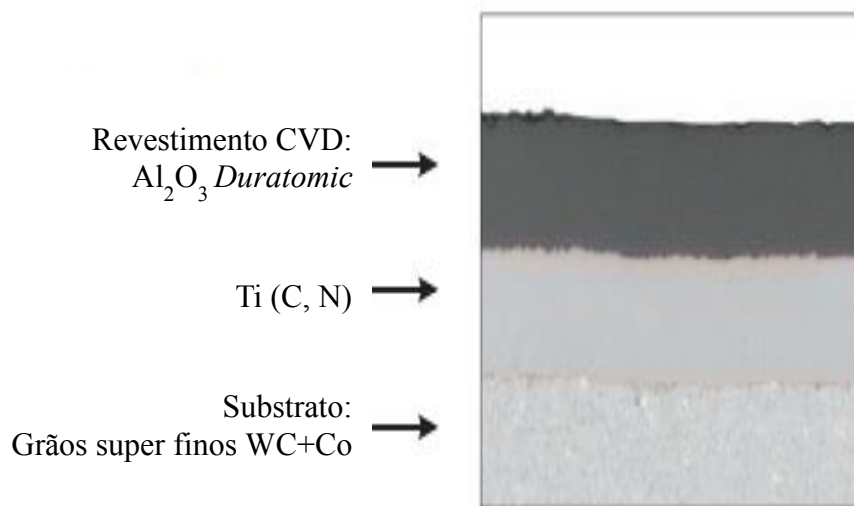
Fonte: (Catálogo Torneamento SECO, 2012)

b) Revestimento TH-1500 CVD (*Duratomic*)

A ferramenta TH1500 é uma classe ISO H10-H15 com cobertura CVD denominada pelo fabricante como *Duratomic*, oferece excelente resistência ao desgaste, permitindo ótima produtividade em operações de corte contínuo que envolva componentes em aço moderadamente endurecido (HRC 40-55). Essa ferramenta oferece resistência superior ao desgaste no acabamento de ferros fundidos dentre as opções do fabricante (Catálogo Torneamento SECO, 2012).

Na Figura 33 é apresentado o substrato e o revestimento da ferramenta.

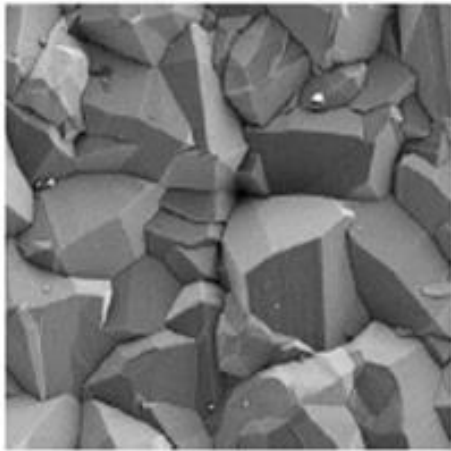
Figura 33 – Substrato e revestimento CVD



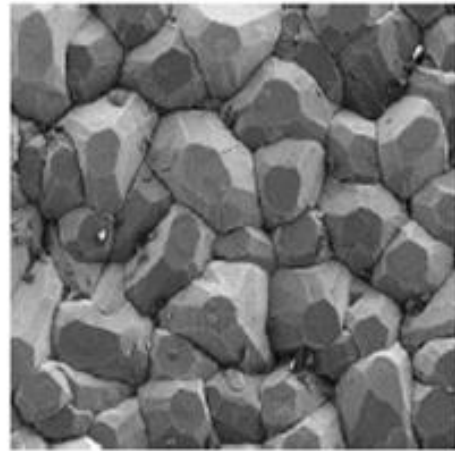
Fonte: (Catálogo Torneamento SECO, 2012)

Nessa classe existe um controle do revestimento a um nível atômico, o qual pode produzir um aumento na durabilidade da ferramenta. O realinhamento da direção cristalográfica do revestimento pode resultar num aumento da vida da ferramenta e tende a ser mais resistente, porém é um revestimento que é mais resistente do que os obtidos utilizando técnicas convencionais. Na Figura 34 é apresentada a microestrutura dos grãos para essa classe e também para uma classe de revestimento convencional.

Figura 34 – Comparação da microestrutura para as duas classes



Revestimento convencional



Revestimento *Duratonic*

Fonte: (Catálogo Torneamento SECO, 2012)

4.4 EQUIPAMENTOS UTILIZADOS

Nesse item, serão descritos os equipamentos utilizados para execução dos ensaios no laboratório, tais como: análise da rugosidade, desgastes das ferramentas, aquisição de imagens e realização de MEV e EDS.

4.4.1 Torno CNC

No processo de torneamento foi utilizado um torno CNC da marca ROMI modelo GL 240M, a rotação máxima do eixo árvore é de 4500 rpm e com potência de 18 kW, conforme Figura 35. Os ensaios foram realizados no Laboratório de Estudo da Usinagem no Departamento de Materiais e Tecnologia, Faculdade de Engenharia, Campus de Guaratinguetá, UNESP.

Figura 35 – Torno da marca ROMI modelo GL 240M



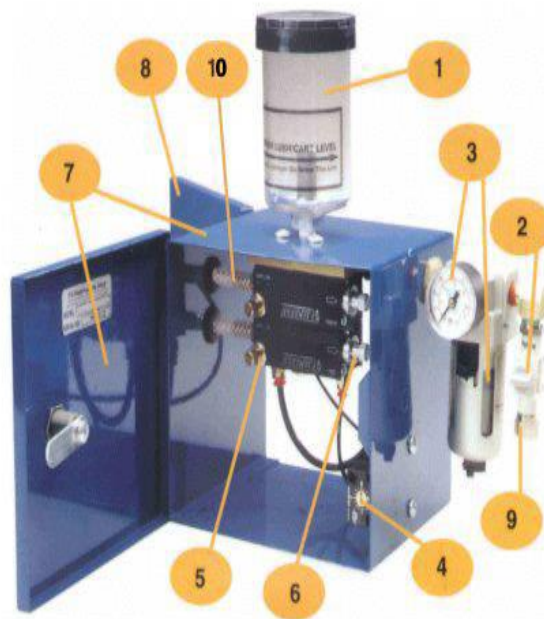
Fonte: Autor

4.4.2 Equipamento para técnica MQL

Para aplicar a técnica da Mínima Quantidade de Lubrificante (MQL) foi utilizado o equipamento *Accu-lube*, da empresa ITW, o qual permite regulação independente da vazão do ar comprimido e lubrificante, além de usar um sistema pulsante de fornecimento de óleo. Foi utilizado o lubrificante LB-1100 da empresa ITW. A vazão e pressão foram ajustadas e aferidas para 188 ml/h e 5 bar, respectivamente.

O equipamento que permite a utilização do MQL pode ser descrito como tendo basicamente: compressor, regulador de pressão, rotâmetro, dosador e bico aspersor. O equipamento de MQL permite uma fina regulação do volume de lubrificante/ar separadamente, por meio de um registro tipo agulha, sem atomizá-lo em um fluxo de ar à pressão constante de 5,0 bar (kgf/cm^2), evitando vapores e dispersão de partículas no ar. É apresentada na Figura 36 a unidade de controle do equipamento de MQL.

Figura 36 - Equipamento para técnica MQL da marca Accu-lube



Fonte: (Catálogo ITW)

Os componentes do equipamento para a aplicação da técnica de MQL são detalhados da seguinte forma:

1. Reservatório 300 ml
2. Registro de acionamento
3. Manômetro e filtro de ar
4. Gerador de frequência (sentido horário aumenta frequência)
5. Bomba pneumática de ajuste individual
6. Ajuste do fluxo de lubrificante
7. Caixa metálica
8. Furos de montagem ou bases magnéticas para fixação rápida
9. Entrada de ar
10. Saída para o bocal aplicador

4.4.3 Rugosímetro

A medição da rugosidade foi realizada em um rugosímetro da marca Mahr modelo MarSurf M300 e MarSurf RD, conforme a Figura 37.

Figura 37–Rugosímetro Mahr modelo MarSurf M300/MahrSurf RD 18



Fonte: Autor

4.4.4 Microscópios

A análise dos desgastes das ferramentas de corte foi realizada com auxílio de dois microscópios, o primeiro da marca Mahr modelo MahrVision MM 200, conforme a Figura 38 e o segundo da marca Zeiss, modelo Stemi 2000, conforme a Figura 39.

Figura 38- Microscópio da marca Mahr modelo MahrVision MM 200



Fonte: Autor

Figura 39 - Microscópio da marca Zeiss, modelo Stemi2000



Fonte: Autor

As ferramentas que apresentaram adesão de material da peça podendo evidenciar a ocorrência de cavaco aderido à ferramenta, tiveram imagens realizadas em um Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV) da marca Zeiss, modelo EVO LS15, conforme Figura 40.

Figura 40 - Microscópio eletrônico de varredura da marca Zeiss, modelo EVO LS15



Fonte: Autor

4.5 METODOLOGIA APLICADA

A metodologia aplicada tem como finalidade uma melhor execução dos ensaios, uma lógica nos procedimentos e leituras de dados a serem obtidos. A seguir serão apresentadas as etapas que foram executadas durante os ensaios no laboratório.

4.5.1 Procedimento do ensaio de usinagem por torneamento

Para o processo de usinagem por torneamento foram utilizadas duas ferramentas de Metal Duro com revestimentos diferentes, uma delas com revestimento PVD e a outra CVD. As duas ferramentas foram submetidas às condições de usinagem a seco e com MQL.

Durante os ensaios foram variados os parâmetros de corte, tais como: velocidade de corte (v_c) e avanço (f). O parâmetro de profundidade de corte foi mantido constante ($a_p = 0,5$ mm). Na Tabela 3 e Tabela 4 são apresentadas as matrizes de experimento.

Tabela 3 – Matriz de experimento dos ensaios para ferramenta de PVD

Matriz de Experimento – Ferramenta PVD ($a_p = 0,5$ mm)				
Condição	Ensaio/Replica	v_c (m/min)	f (mm/rev)	Condição de Usinagem
Condição 1	Ensaio1	125	0,25	A SECO
	Replica	125	0,25	
Condição 2	Ensaio 1	150	0,25	A SECO
	Replica	150	0,25	
Condição 3	Ensaio 1	150	0,10	A SECO
Condição 4	Ensaio 1	150	0,25	MQL
	Replica	150	0,25	

Fonte: Autor

Tabela 4 – Matriz de experimento dos ensaios para ferramenta de CVD

Matriz de Experimento - Ferramenta CVD ($a_p = 0,5$ mm)				
Ensaio		v_c (m/min)	f (mm/rev)	Condição de Usinagem
Condição 1	Ensaio 1	125	0,25	A SECO
Condição 2	Ensaio 1	150	0,25	A SECO
Condição 3	Ensaio 1	175	0,25	A SECO
Condição 4	Ensaio 1	175	0,25	MQL

Fonte: Autor

Após cada passe executado pela ferramenta de corte foram retirados do torno à amostra e a ferramenta de corte para medir a rugosidade e as condições de desgaste da ferramenta, respectivamente. Importante destacar que foi retirada uma amostra do cavaco após o primeiro e último passe de usinagem para cada amostra, e os mesmos foram analisados quanto a sua forma. O critério de fim de vida da ferramenta de corte foi o desgaste de flanco (V_{Bmax}) igual a 0,3 mm de acordo com o recomendado pela Norma ISO 3685 (1993) para ferramentas de Metal Duro, dessa forma, o uso da ferramenta de corte foi interrompido quando foi atingido o valor de $V_{Bmax} = 0,3\text{mm}$ ou quando a mesma apresentou falha catastrófica.

4.5.2 Análise da superfície usinada

Para análise da superfície usinada foi utilizado o parâmetro de rugosidade média R_a , o qual foi relacionado com o *cut-off*. O valor de *cut-off* depende da distância entre os sulcos deixados pelo avanço (f) da ferramenta no processo de usinagem, sendo que, para os avanços de 0,1 a 0,25mm/rev. aplicados nos ensaios de torneamento (perfil periódico), foi utilizado um *cut-off* de 0,8mm, de acordo com a Norma NBR 6405/1988 que recomenda este valor para distância entre sulcos de 0,1mm a 0,32mm.

A medição da rugosidade da amostra foi realizada, com a mesma fixada na placa do torno, com auxílio do rugosímetro portátil, foram realizadas três medições em ângulos de aproximadamente de 120° em torno de sua circunferência, ao longo do comprimento da amostra.

4.5.3 Análise dos desgastes das ferramentas de corte

Para cada passe de usinagem realizado pela ferramenta de corte a mesma foi retirada do suporte e levada ao microscópio para que fosse realizada uma medição do desgaste. Os valores medidos foram transcritos para a folha de coleta de dados e verificada sua evolução até o instante em que o desgaste atingisse o limite pré-determinado para o fim de vida da ferramenta ($V_{Bmax} = 0,3\text{ mm}$). Após o fim de vida das ferramentas de corte, as mesmas foram identificadas e em seguida encaminhadas para a aquisição definitiva das imagens dos desgastes observados. Nos casos em que ocorreu a presença de cavaco aderido à superfície da

ferramenta, as ferramentas de corte seguiram para análise no Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV).

4.5.4 Análise dos cavacos

A análise das formas dos cavacos foi realizada através da identificação das amostras dos cavacos, de acordo com cada ferramenta e condição de corte executado, com auxílio de microscopia óptica para aquisição das imagens das amostras de cavacos no primeiro e último passe realizado em cada amostra.

5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Nos subitens a seguir, serão apresentadas as formas dos cavacos, as imagens dos desgastes das ferramentas, o desgaste de flanco ($V_{Bmáx}$) e a rugosidade média (R_a) nas condições de usinagem a seco e com MQL para as ferramentas utilizadas. As condições de corte serão indicadas por meio de uma indicação padronizada na qual o primeiro dígito corresponde à velocidade de corte, o segundo ao avanço e o terceiro à profundidade de corte.

5.1 FERRAMENTA DE METAL DURO COM REVESTIMENTO PVD

Serão apresentados os resultados obtidos para ferramenta de Metal Duro com revestimento PVD.

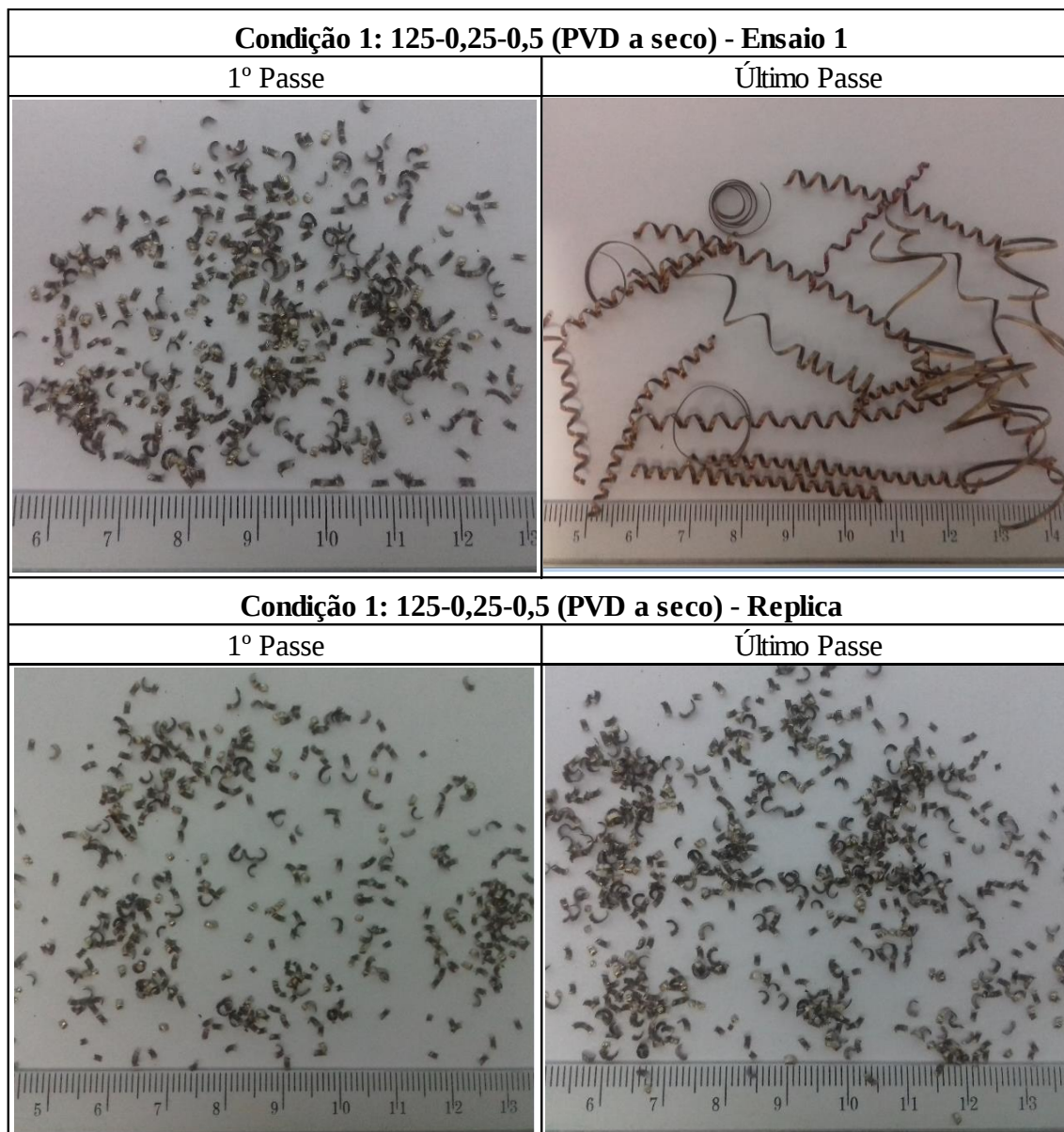
5.1.1 Análise das formas dos cavacos para ferramenta PVD

Na análise do Quadro 3, verificou-se que:

Na *Condição 1: 125-0,25-0,5 (PVD a seco) – Ensaio 1*, no 1º Passe os cavacos obtidos foram na forma de lascas, essa forma de cavaco se deve ao fato de que o material da amostra é um aço inoxidável martensítico e, além disso foi endurecido por tratamento térmico de têmpera e revenimento. Dessa forma, o material teve sua dureza elevada e sua tenacidade reduzida, consequentemente facilitou a quebra dos cavacos durante a usinagem. A quebra dos cavacos também foi facilitada pela atuação do quebra-cavaco. No Último Passe ocorreram cavacos de várias formas, tais como: espiral, helicoidal e fita. Sendo assim, os cavacos não se mantiveram na forma de lascas como havia ocorrido no 1º Passe, e essa mudança na forma dos cavacos foi consequência da quebra da ferramenta durante a usinagem. A quebra da ferramenta alterou o raio de ponta da mesma e isso ocasionou a variação na forma dos cavacos.

Na *Condição 1: 125-0,25-0,5 (PVD a seco) – Replica*, os cavacos obtidos foram na forma de lascas no 1º Passe e também no Último passe. Nessa condição os cavacos não tiveram influência da quebra de ferramenta, pois a mesma não quebrou como no caso anterior, sendo assim, a forma dos cavacos se manteve em ambos os passes.

Quadro 3 – Imagens das formas dos cavacos na Condição 1 para ferramenta PVD a seco



Fonte: Autor

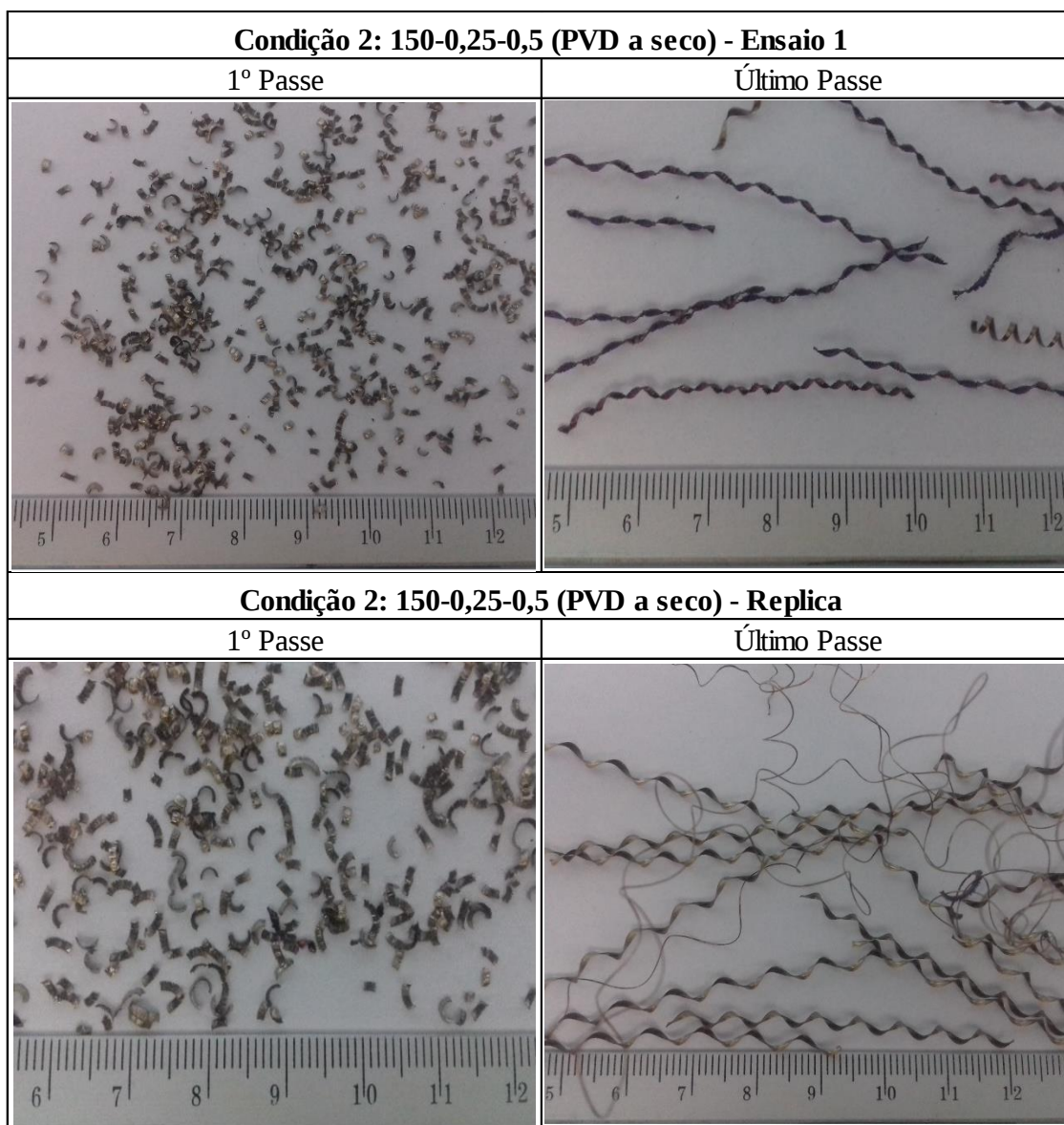
Na análise do Quadro 4, verificou-se que:

Na *Condição 2: 150-0,25-0,5 (PVD a seco) – Ensaio 1*, no 1º Passe os cavacos obtidos foram na forma de lascas, essa forma de cavaco se deve a dureza do material e atuação do quebra-cavaco. No Último Passe ocorreram cavacos na forma helicoidal. Sendo assim, os cavacos não se mantiveram na forma de lascas como havia ocorrido no 1º Passe, e essa mudança na forma dos cavacos foi consequência da quebra da ferramenta durante a usinagem.

Na *Condição 2: 150-0,25-0,5 (PVD a seco) – Replica*, a forma dos cavacos obtidos no 1º Passe foi idêntica à obtida para *Condição 2 – Ensaio 1*. No Último Passe foram na forma helicoidal, também devido à quebra da ferramenta.

A *Condição 2* foi mais severa em relação à *Condição 1*, pois ocorreu a quebra da ferramenta nas duas situações de usinagem para *Condição 2*, provavelmente a quebra das duas ferramentas pode ser devido ao aumento da velocidade de corte de 125 para 150 m/min. Esse aumento de velocidade impactou diretamente no aumento da temperatura de corte, consequentemente a elevação da temperatura foi significativa nos desgastes das ferramentas, sendo assim potencializou a quebra das ferramentas.

Quadro 4 – Imagens das formas dos cavacos na *Condição 2* para ferramenta PVD a seco



Fonte: Autor

Na análise do Quadro 5, verificou-se que:

Na *Condição 3: 150-0,1-0,5 (PVD a seco) – Ensaio 1*, no 1º Passe os cavacos obtidos foram na forma helicoidal, provavelmente se deve a diminuição do avanço de 0,25 para 0,1 mm/rev. No Último passe os cavacos ocorreram da mesma forma, ou seja, em forma helicoidal como havia ocorrido anteriormente no 1º Passe.

Como na Condição 2 havia ocorrido a quebra da ferramenta nas duas situações, o avanço foi diminuído, com essa iniciativa verificou-se que para um melhor desempenho na velocidade de corte de 150 m/min a redução do avanço evitou a quebra da ferramenta.

Quadro 5 – Imagens das formas dos cavacos na Condição 3 para ferramenta PVD a seco



Fonte: Autor

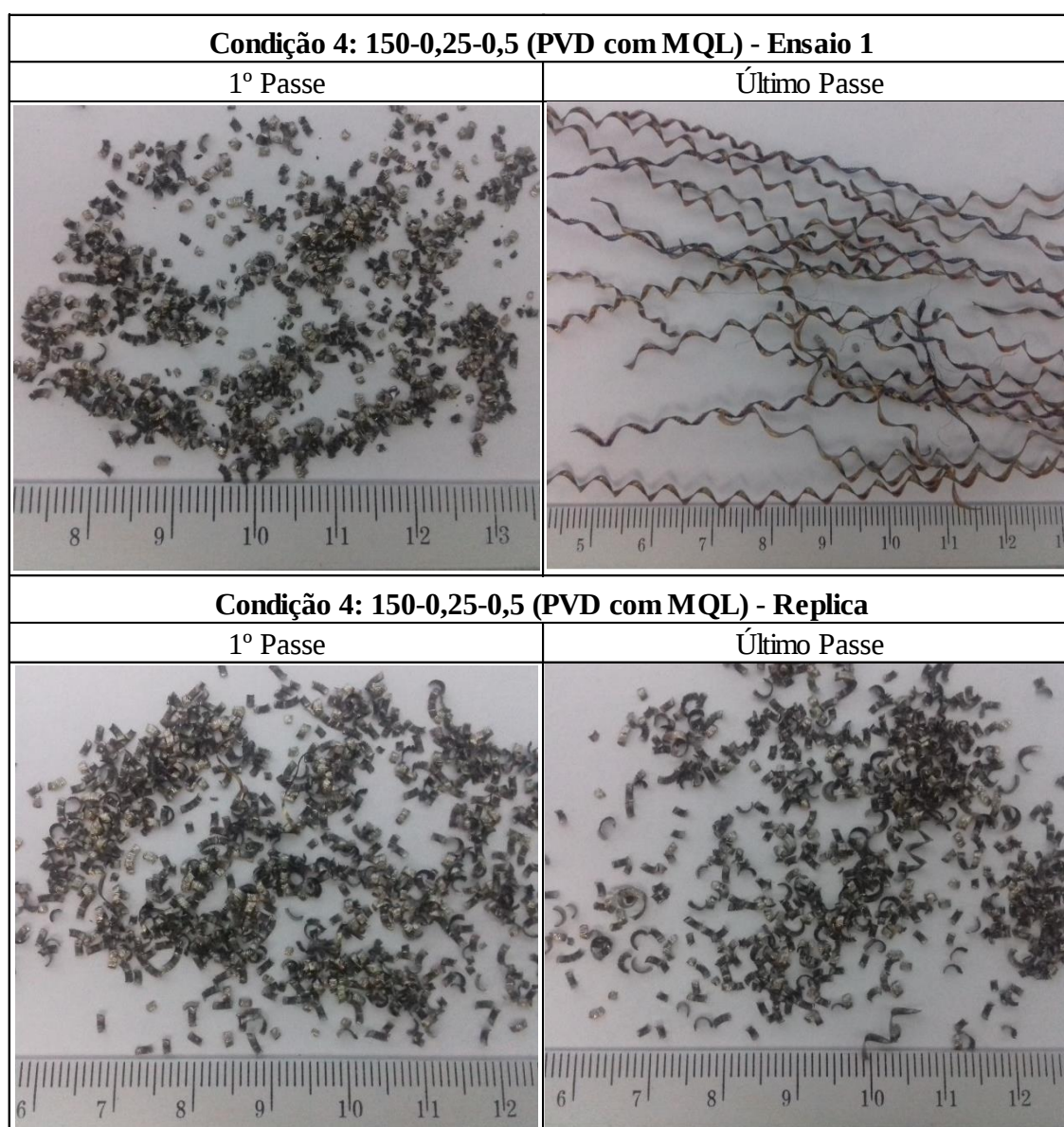
Na análise do Quadro 6, verificou-se que:

Na *Condição 4: 150-0,25-0,5 (PVD com MQL) – Ensaio 1*, no 1º Passe os cavacos obtidos foram na forma de lascas, essa forma de cavaco se deve as mesmas causas citadas anteriormente quando houve a mesma forma de cavacos. No Último Passe ocorreram cavacos na forma helicoidal. Essa mudança na forma dos cavacos foi consequência da quebra da ferramenta durante a usinagem.

Na *Condição 4: 150-0,25-0,5 (PVD com MQL) – Replica*, os cavacos obtidos foram na forma de lascas no 1º Passe como também no Último passe. Nessa condição os cavacos não tiveram influência da quebra da ferramenta, pois a mesma não quebrou como no caso anterior, porém ocorreu desgaste de cratera e o ensaio foi interrompido.

Nos resultados apresentados na Condição 4 verifica-se que a utilização da técnica de MQL não teve influência significativa, pois a ferramenta utilizada na Condição 4 – Ensaio 1 quebrou e a ferramenta utilizada na Condição 4 – Replica apresentou desgaste de cratera e o ensaio foi interrompido para evitar a quebra da ferramenta. Esse desgaste de cratera foi confirmado pelas imagens de MEV que serão apresentadas posteriormente.

Quadro 6 – Imagens das formas dos cavacos na Condição 4 para ferramenta PVD com MQL



Fonte: Autor

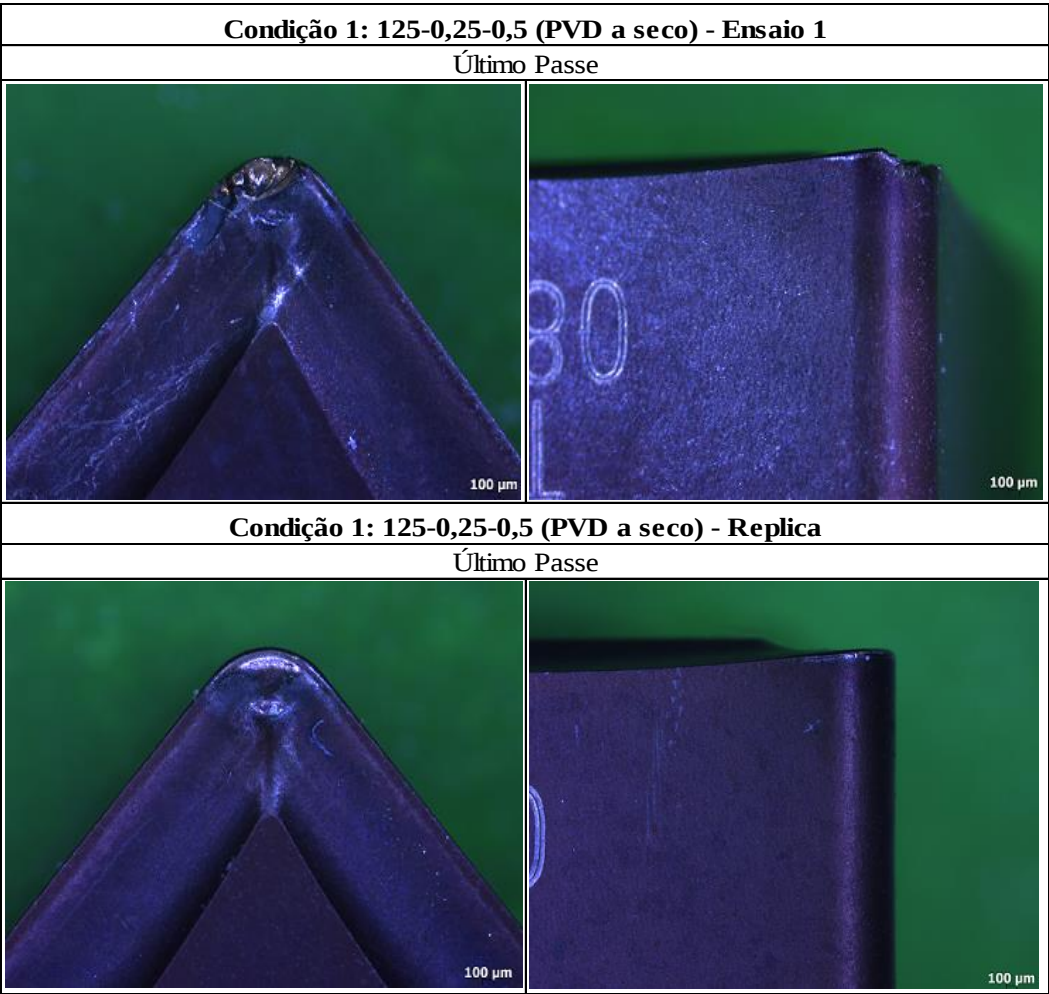
5.1.2 Análise das imagens dos desgastes das ferramentas PVD

Na análise do Quadro 7, verificou-se que:

Na *Condição 1: 125-0,25-0,5 (PVD a seco) – Ensaio 1*, na análise da ferramenta observa-se que ocorreu a quebra da ferramenta. A quebra da ferramenta ocasionou a variação na forma dos cavacos devido à variação no raio de ponta, como citado anteriormente na análise das imagens dos cavacos.

Na *Condição 1: 125-0,25-0,5 (PVD a seco) – Replica*, na análise da ferramenta observa-se que a mesma não quebrou, e que ocorreu um pequeno desgaste de flanco e na superfície de saída.

Quadro 7 – Imagens dos desgastes das ferramentas na Condição 1 ferramenta PVD a seco

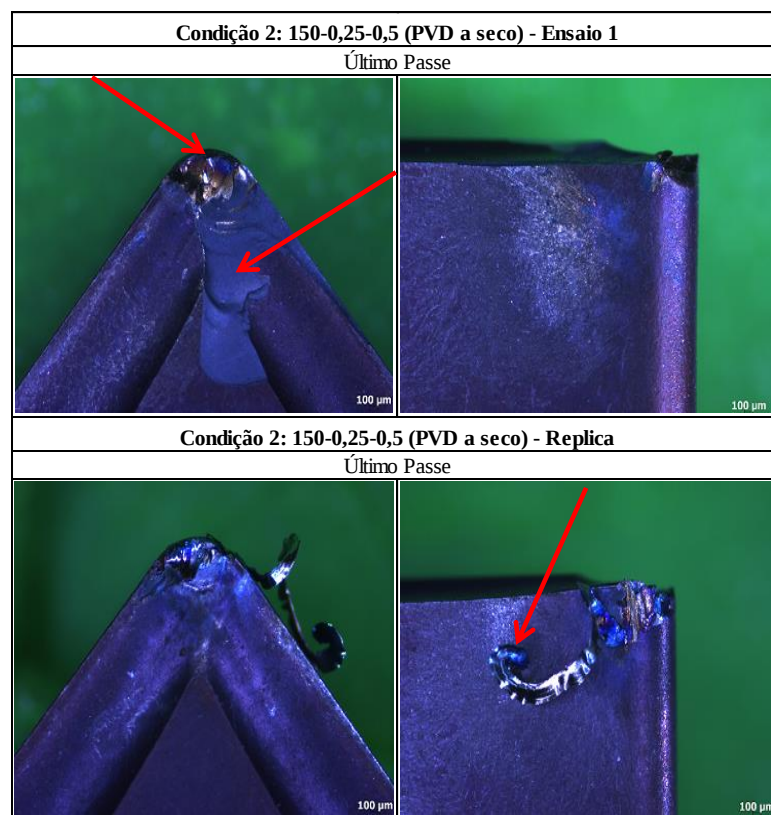


Fonte: Autor

Na análise do Quadro 8, verificou-se que:

Na *Condição 2: 150-0,25-0,5 (PVD a seco) – Ensaio 1*, a ferramenta quebrou durante o processo de torneamento. O aumento da velocidade de corte para 150 m/min impactou significativamente na temperatura de corte em relação à Condição 1 em que a velocidade era de 125 m/min. Na *Condição 2: 150-0,25-0,5 (PVD a seco) – Replica*, nessa condição ocorreu também a quebra da ferramenta e pode-se observar a presença de cavaco aderido a ferramenta. Na Condição 2 ocorreram quebras para as duas ferramentas, sendo assim, verifica-se que essa condição de corte foi muito severa para ferramenta PVD. Sabe-se que o revestimento PVD em relação ao CVD tem uma resistência menor a elevadas temperaturas e essa resistência menor é devido à falta de Al_2O_3 , na camada de revestimento do PVD, que funciona como uma barreira térmica. Na análise das imagens verifica-se que ocorreu um deslocamento do revestimento na superfície de saída da ferramenta PVD, nota-se também que existe uma coloração azulada na superfície de saída da ferramenta, dessa forma caracteriza que provavelmente ocorreu um aumento significativo da temperatura de corte e que por esse motivo, a ferramenta de Metal Duro não suportou essa condição de usinagem.

Quadro 8 – Imagens dos desgastes das ferramentas na Condição2 para ferramenta PVD a seco

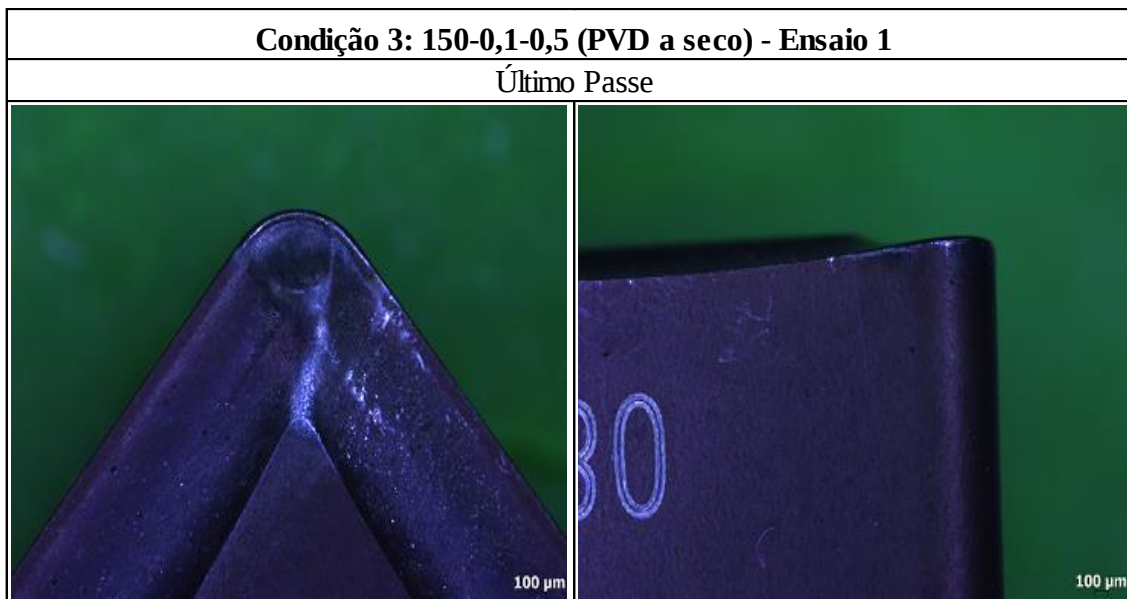


Fonte: Autor

Na análise do Quadro 9, verificou-se que:

Na *Condição 3: 150-0,1-0,5 (PVD a seco) – Ensaio 1*, nessa condição a ferramenta não quebrou. A diminuição do avanço de 0,25 para 0,1 mm/rev provavelmente influenciou no desempenho da ferramenta, pois evitou a quebra da mesma nessa condição de corte.

Quadro 9 – Imagens dos desgastes da ferramenta na Condição 3 para ferramenta PVD a seco



Fonte: Autor

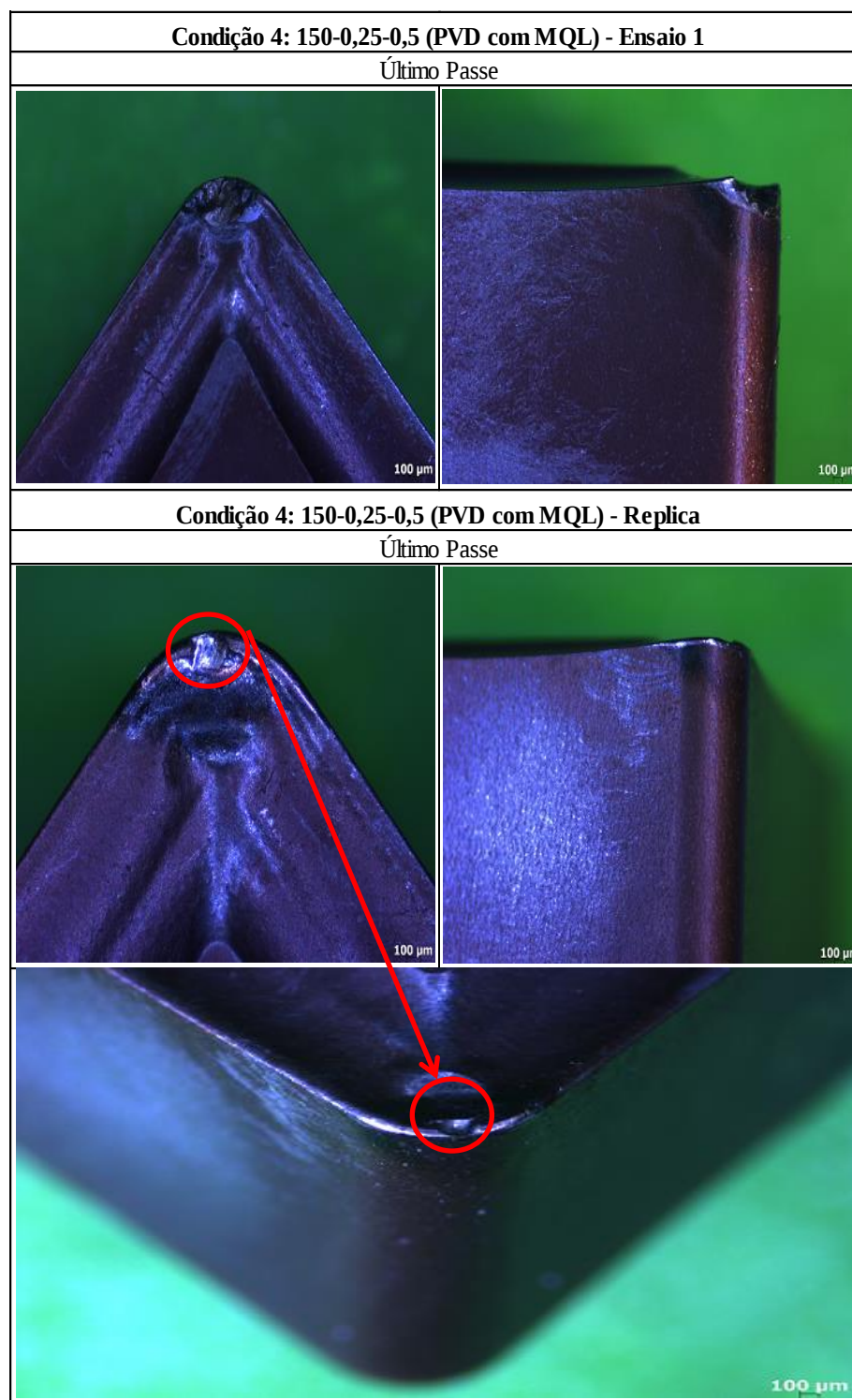
Na análise do Quadro 10, verificou-se que:

Na *Condição 4: 150-0,25-0,5 (PVD com MQL) – Ensaio 1*, observa-se que nessa condição a ferramenta quebrou mesmo com a utilização da técnica com MQL. Como na Condição 2 para velocidade de 150 m/min na usinagem a seco as duas ferramentas quebraram, na Condição 4 decidiu-se fazer a operação de torneamento com a técnica MQL, porém não houve uma melhora no processo e não foi suficiente para evitar a quebra das ferramentas.

Na *Condição 4: 150-0,25-0,5 (PVD com MQL) – Replica*, nessa condição a ferramenta apresentou desgaste de cratera e a mesma não quebrou, pois quando foi identificado o desgaste de cratera o ensaio foi interrompido para evitar a quebra da ferramenta.

De uma forma geral, na Condição 4 a utilização de MQL como meio de lubrificação não foi eficiente e conseqüentemente não melhorou o processo de usinagem para essas condições de corte em relação a Condição 2 a seco, que havia apresentado duas quebras.

Quadro 10 – Imagens dos desgastes das ferramentas na condição 4 ferramenta PVD e MQL

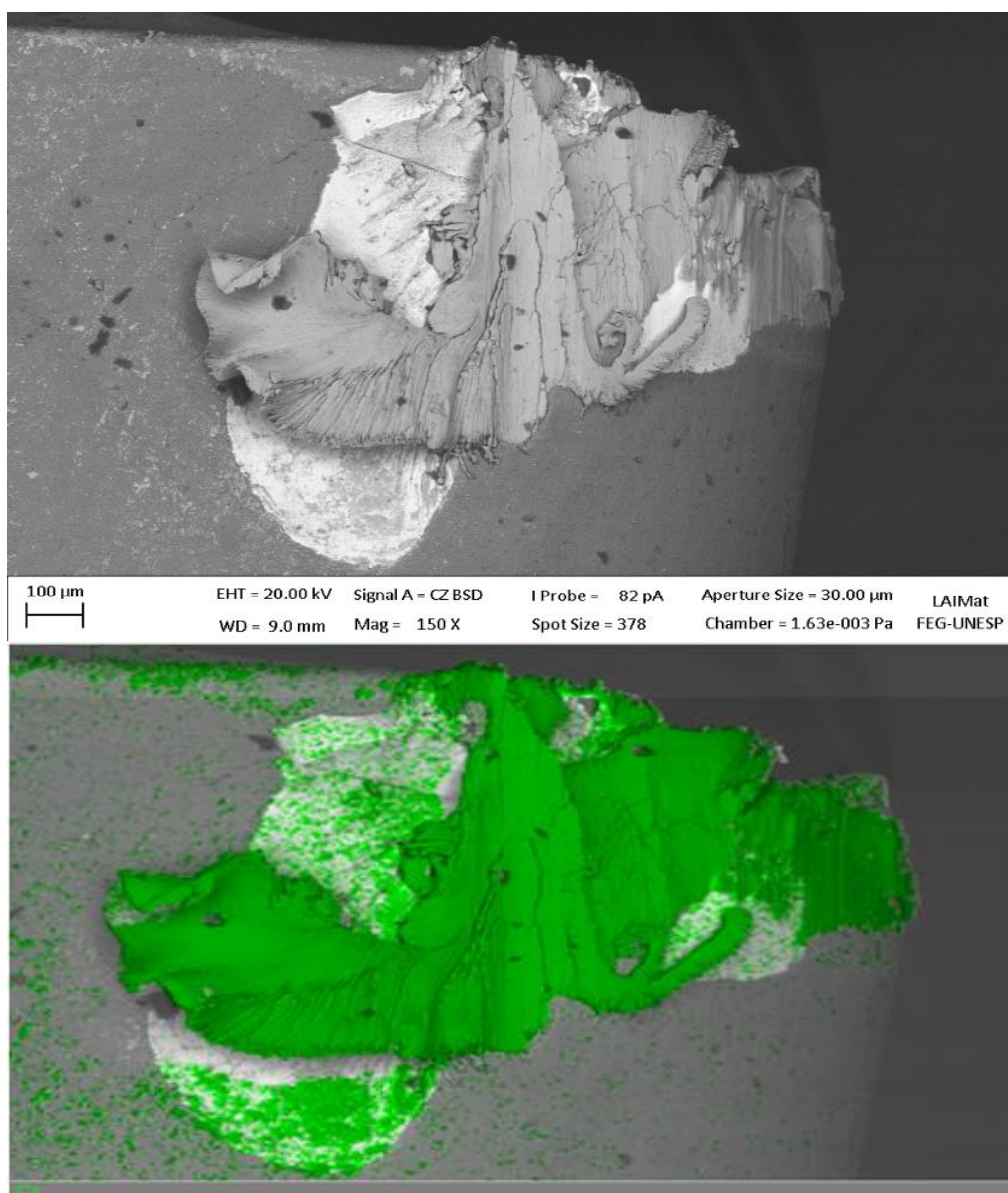


Fonte: Autor

5.1.3 Análise das imagens de MEV e EDS com mapa de cores para ferramenta PVD

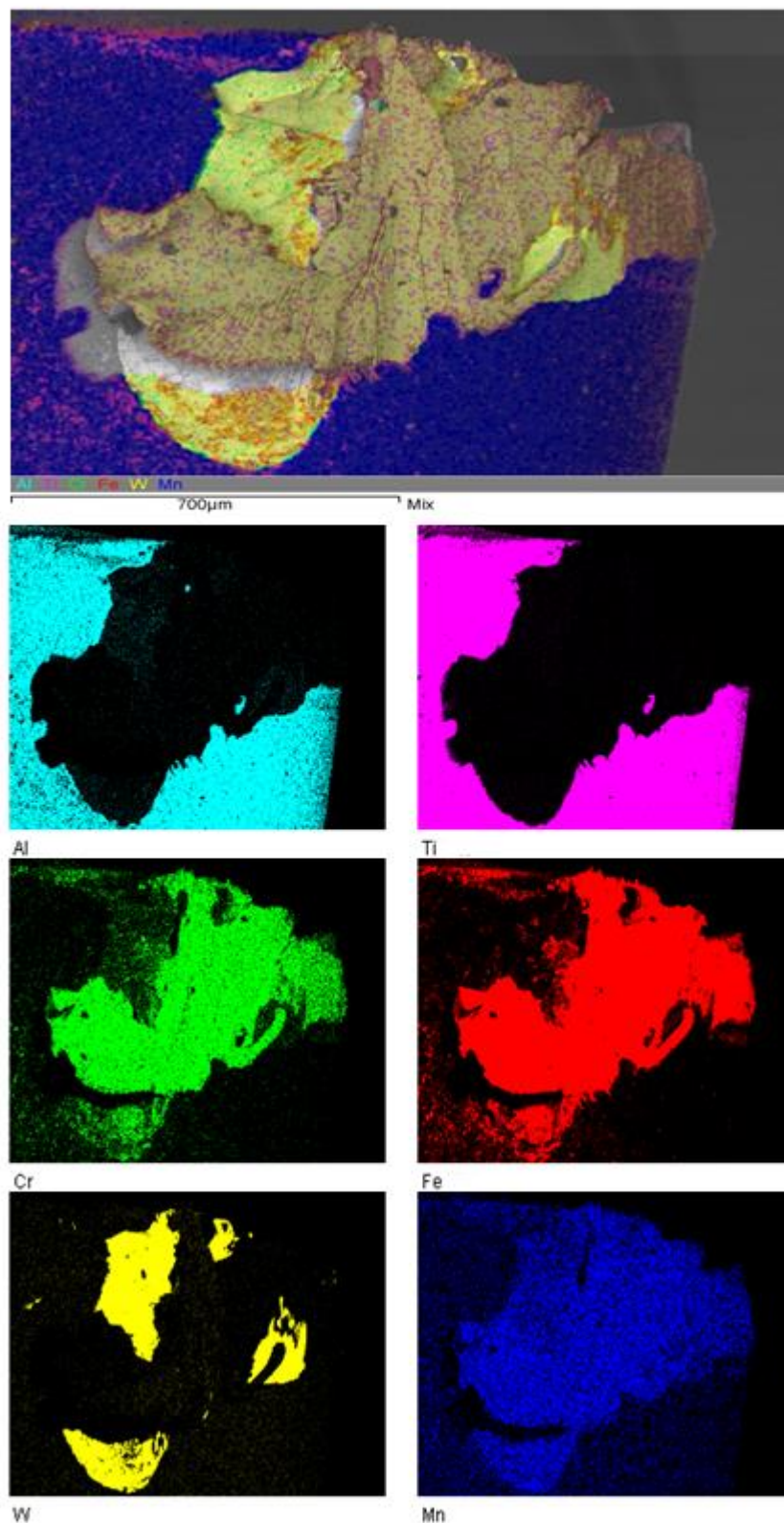
Na *Condição 2: 150-0,25-0,5 (PVD a seco) – Replica*, a ferramenta utilizada apresentou uma evidência de cavaco aderido à ferramenta, e que a mesma foi confirmada após análise de imagem por MEV, conforme Figura 41. Em seguida foi realizada a análise de EDS com mapa de cores, para identificar os elementos químicos presentes na ferramenta de corte. Dessa forma, foram encontrados vários elementos químicos com destaque para presença do elemento químico cromo (Cr) na cor verde, que é o elemento de liga do aço inoxidável que atribui resistência à corrosão/oxidação. Na Figura 42 é apresentado o mapa de cores EDS.

Figura 41 – MEV da ferramenta na *Condição 2: 150-0,25-0,5 (PVD a seco) – Replica*



Fonte: Autor

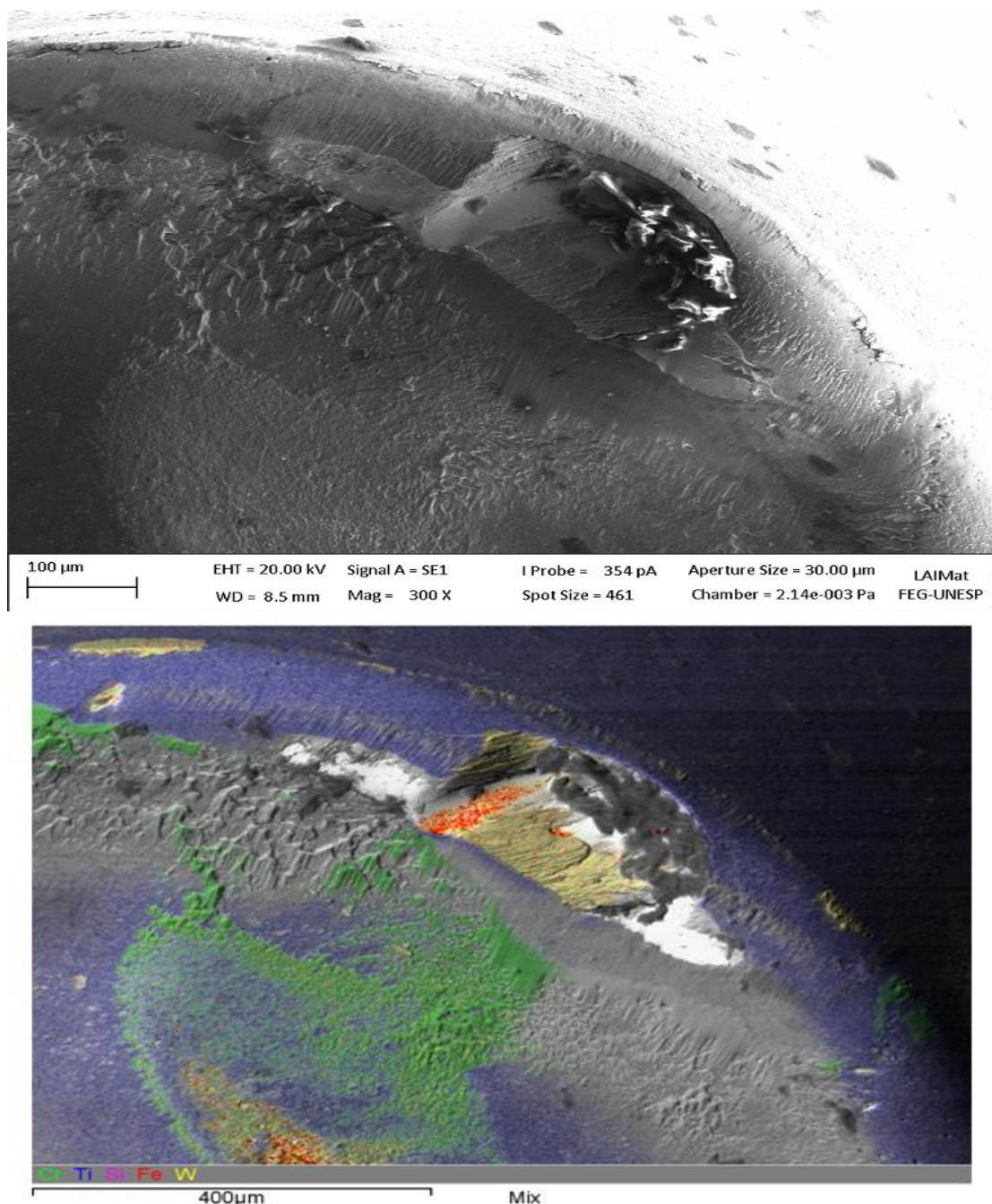
Figura 42 – EDS com mapa de cores da ferramenta na *Condição 2: 150-0,25-0,5 (PVD a seco) – Replica*



Fonte: Autor

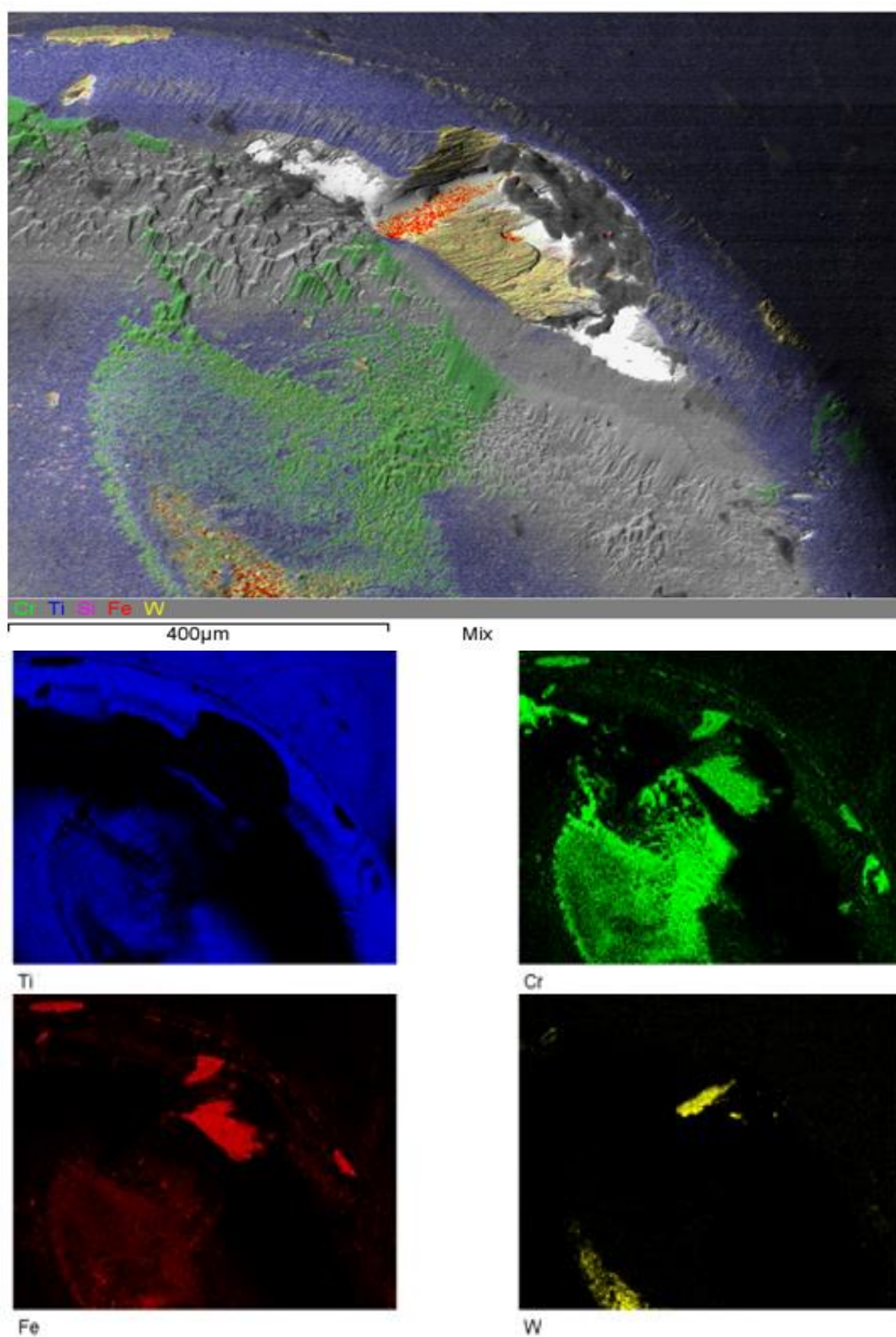
Na *Condição 4: 150-0,25-0,5 (PVD com MQL) – Replica*, a ferramenta utilizada no torneamento apresentou uma evidência de desgaste de cratera, e que a mesma foi confirmada após análise de imagem por MEV, conforme Figura 43. Em seguida foram realizadas imagens de EDS com mapa de cores, para identificar os elementos químicos presentes na ferramenta de corte. Dessa forma, novamente foi encontrado o elemento químico cromo (Cr) que é o elemento de liga do aço inoxidável, conforme Figura 44.

Figura 43 – MEV da ferramenta na *Condição 4: 150-0,25-0,5 (PVD com MQL) – Replica*



Fonte: Autor

Figura 44 – EDS com mapa de cores na *Condição 4: 150-0,25-0,5 (PVD com MQL) – Replica*



Fonte: Autor

5.1.4 Análise dos desgastes de flanco ($V_{B\max}$) para ferramenta PVD

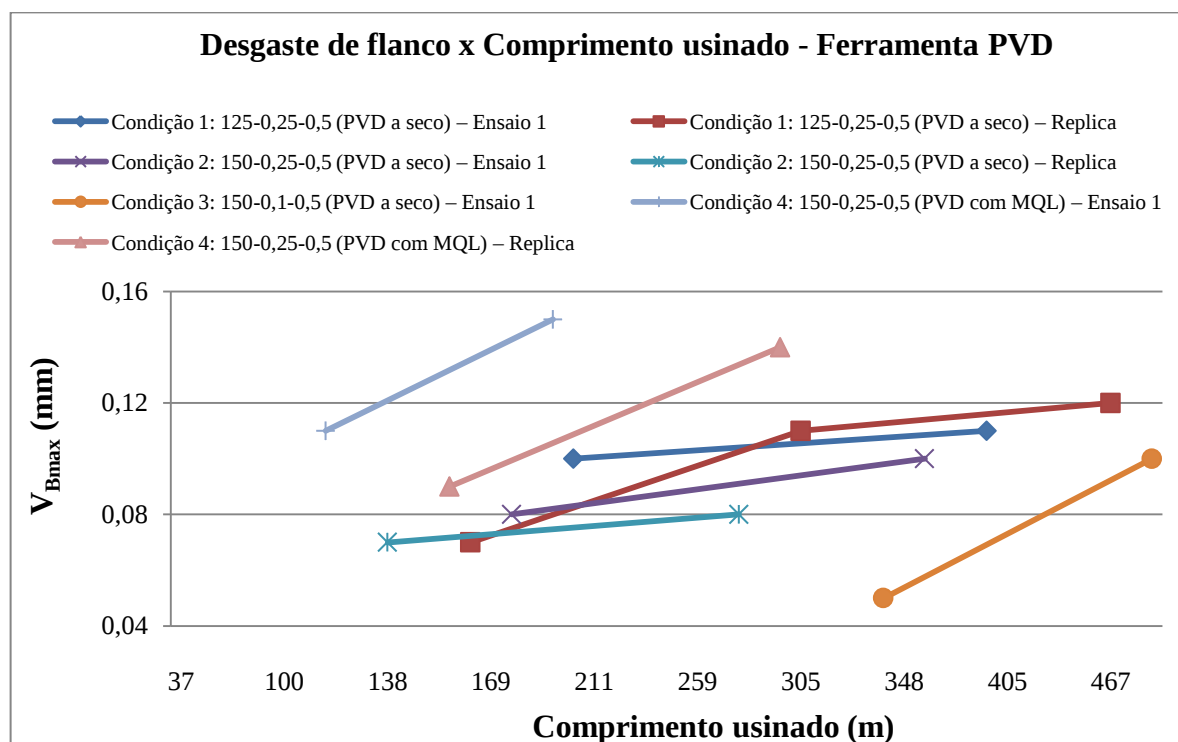
Nessa etapa compara-se o desgaste de flanco com o comprimento usinado para todas as condições ensaiadas com as ferramentas de Metal Duro com revestimento PVD.

Na análise da Figura 45 a *Condição 3: 150-0,1-0,5 (PVD a seco) – Ensaio1* apresentou um desempenho expressivo em relação às outras condições, pois essa condição apresentou um desgaste de flanco abaixo de 0,12 mm e seu comprimento de corte usinado foi maior, provavelmente devido à diminuição do avanço de 0,25 para 0,1 mm/rev.

A Condição 4 com a técnica MQL não apresentou um bom desempenho, pois seu desgaste de flanco ficou maior que para as outras condições e seu comprimento de corte não foi tão significativo.

De uma forma geral, os ensaios realizados a seco apresentaram um desgaste de flanco menor do que na usinagem com MQL, assim, a utilização dessa técnica não melhorou o acabamento superficial da amostra.

Figura 45– Desgaste de flanco por comprimento usinado para ferramenta PVD



Fonte: Autor

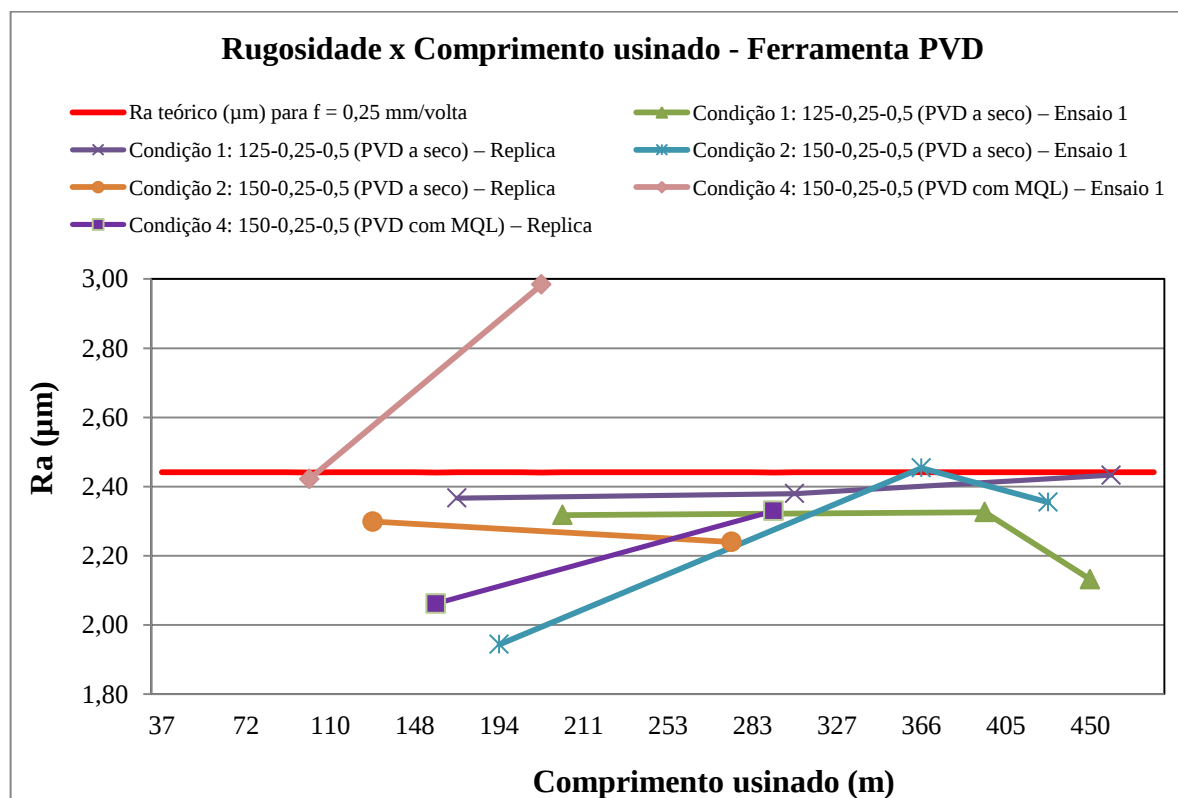
5.1.5 Rugosidade média (R_a)

Nessa etapa compara-se a rugosidade média com o comprimento usinado para todas as condições ensaiadas com as ferramentas de Metal Duro com revestimento PVD.

Na análise da Figura 46 verifica-se que a Condição 1 apresentou um desempenho mais expressivo, pois em ambas as condições seus valores de rugosidade ficaram abaixo da rugosidade teórica e seu comprimento usinado foi maior, e a *Condição 1: 125-0,25-0,5 (PVD a seco) – Ensaio 1* apresentou o menor valor de rugosidade entre todas as condições.

A Condição 2 apresentou valores de rugosidade abaixo da teórica, nota-se que a *Condição 2: 150-0,25-0,5 (PVD a seco) – Ensaio 1* além de apresentar valores de rugosidade abaixo da teórica seu comprimento usinado foi bem expressivo. A *Condição 4: 150-0,25-0,5 (PVD com MQL) – Ensaio 1* apresentou valores acima da rugosidade teórica, porém sabe-se que o valor da rugosidade teórica não leva em consideração os desgastes que ocorrem durante os ensaios.

Figura 46 – Rugosidade por comprimento usinado para ferramenta PVD



Fonte: Autor

5.2 FERRAMENTA DE METAL DURO COM REVESTIMENTO CVD

Serão apresentados os resultados obtidos para ferramenta de Metal Duro com revestimento CVD.

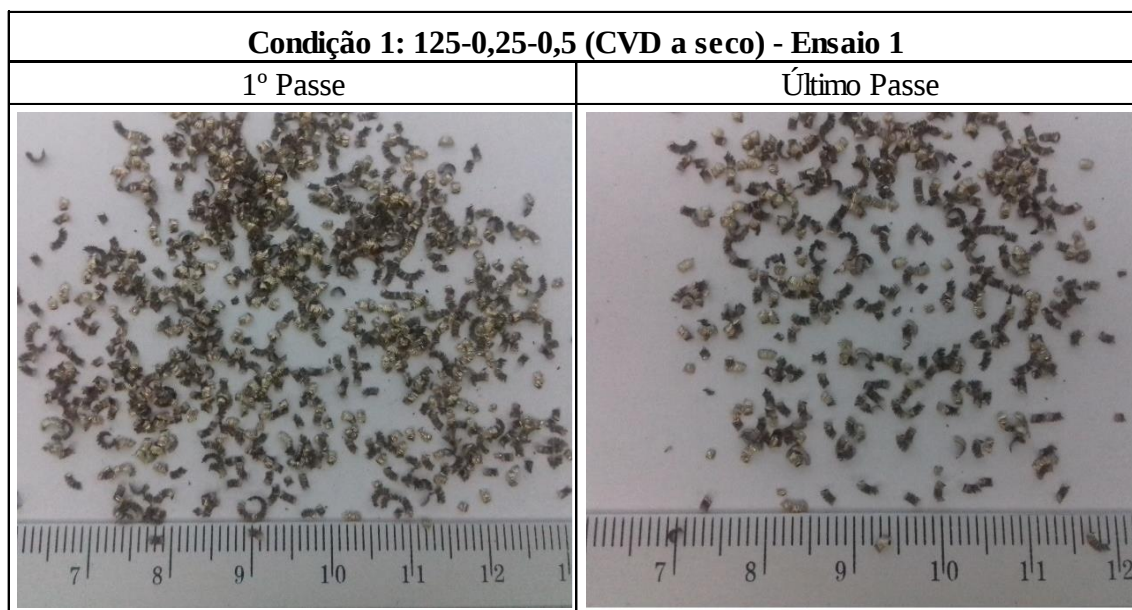
5.2.1 Análise da forma dos cavacos para ferramenta CVD

Em cada etapa dos ensaios os cavacos foram recolhidos e os mesmos foram fotografados.

Na análise do Quadro 11, verificou-se que:

Na *Condição 1: 125-0,25-0,5 (CVD a seco) – Ensaio 1*, a forma dos cavacos para o 1º Passe e Último passe foi na forma de lascas. Essa ocorrência de cavacos na forma de lascas em ambos os passes foi devido às características do material da amostra que tem resistência elevada e ainda foi submetido à têmpera, além do desempenho da ferramenta de corte CVD que não apresentou um desgaste acentuado na ferramenta e nem a quebra da mesma, dessa forma, não houve alteração no raio de ponta da ferramenta e consequentemente a forma dos cavacos se mantiveram iguais.

Quadro 11 – Imagens das formas dos cavacos na Condição 1 para ferramenta CDV a seco

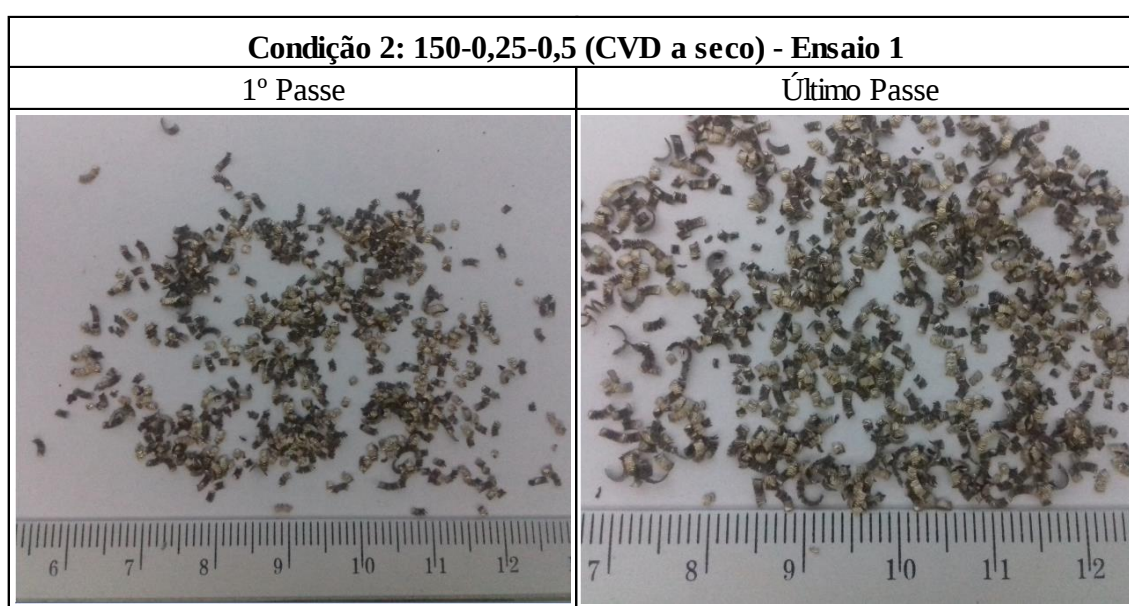


Fonte: Autor

Na análise do Quadro 12, verificou-se que:

Na *Condição 2: 150-0,25-0,5 (CVD a seco) – Ensaio 1*, a forma dos cavacos para o 1º Passe e Último passe foi na forma de lascas. Os motivos dos cavacos obtidos nessa forma foram citados anteriormente. Destaca-se que apesar do aumento da velocidade de corte de 125 para 150 m/min a ferramenta de CVD manteve um bom desempenho, pois não apresentou desgaste elevado e não ocorreu quebra.

Quadro 12 – Imagens das formas dos cavacos na Condição 2 para ferramenta CDV a seco

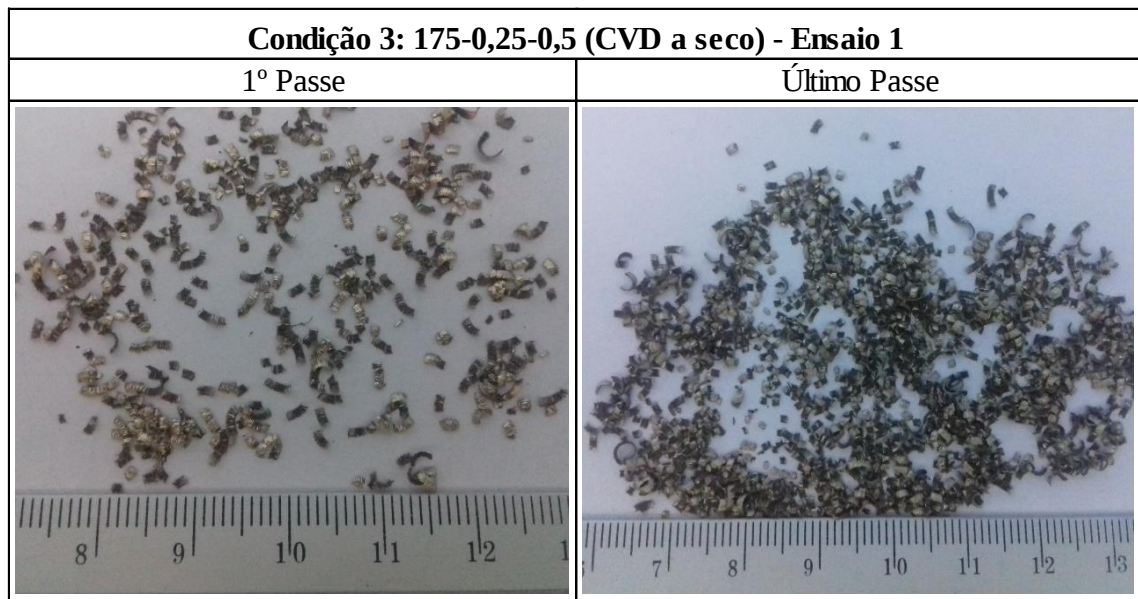


Fonte: Autor

Na análise do Quadro 13, verificou-se que:

Na *Condição 3: 175-0,25-0,5 (CVD a seco) – Ensaio 1*, a forma dos cavacos para o 1º Passe e Último passe foi na forma de lascas. Nesse ensaio a velocidade de 175 m/min não influenciou significativamente nos desgastes da superfície de saída e nem no desgaste de flanco. Nos ensaios realizados nas condições 1, 2 e 3 verifica-se que de uma forma geral a ferramenta CVD apresentou um bom desempenho se comparado à ferramenta com revestimento PVD, pois a ferramenta PVD apresentou várias quebras e desgaste de cratera.

Quadro 13 – Imagens das formas dos cavacos na Condição 3 para ferramenta CVD a seco

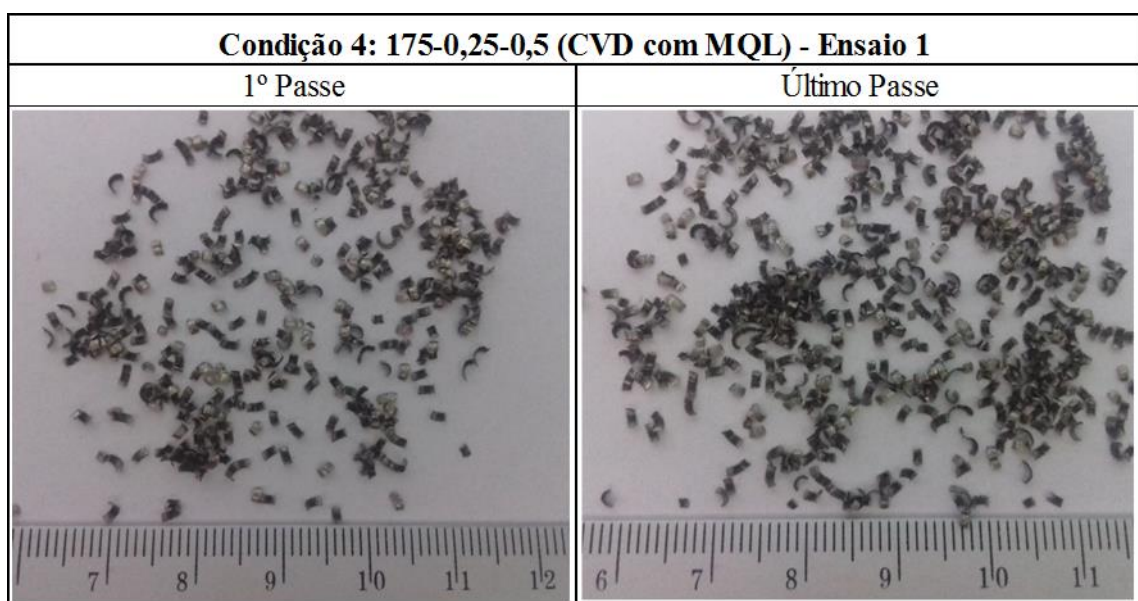


Fonte: Autor

Na análise do Quadro 14, verificou-se que:

Na *Condição 4: 175-0,25-0,5 (CVD com MQL) – Ensaio 1*, a forma dos cavacos para o 1º Passe e Último passe foi na forma de lascas. Observa-se que a ferramenta obteve o mesmo desempenho na condição de 175 m/min a seco e também com a técnica MQL.

Quadro 14 – Imagens das formas dos cavacos na Condição 4 para ferramenta CDV a seco



Fonte: Autor

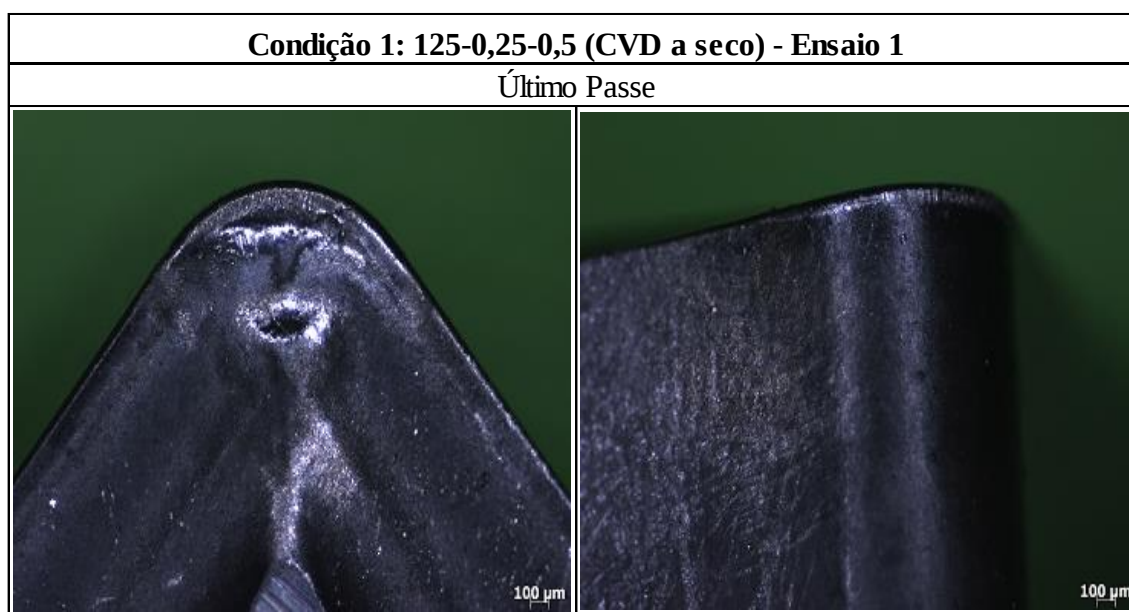
5.2.2 Análise das imagens dos desgastes das ferramentas CVD

As ferramentas utilizadas nos ensaios foram fotografadas digitalmente para análise do desgaste de maneira macroscópica.

Na análise do Quadro 15, verificou-se que:

Na *Condição 1: 125-0,25-0,5 (CVD a seco) – Ensaio 1*, o desgaste de flanco e o desgaste da superfície de saída não foram tão expressivos. A ferramenta CVD possui revestimento com várias camadas, entre essas camadas tem-se a camada Al_2O_3 , essa camada funciona como uma barreira térmica. Essa barreira térmica faz com que a temperatura não cause desgastes excessivos na ferramenta, consequentemente evitando a quebra da mesma ao contrário do que ocorreu com a maioria das ferramentas PVD que não possuem essa camada como barreira térmica.

Quadro 15 – Imagens dos desgastes da ferramenta na Condição 1 para ferramenta CVD

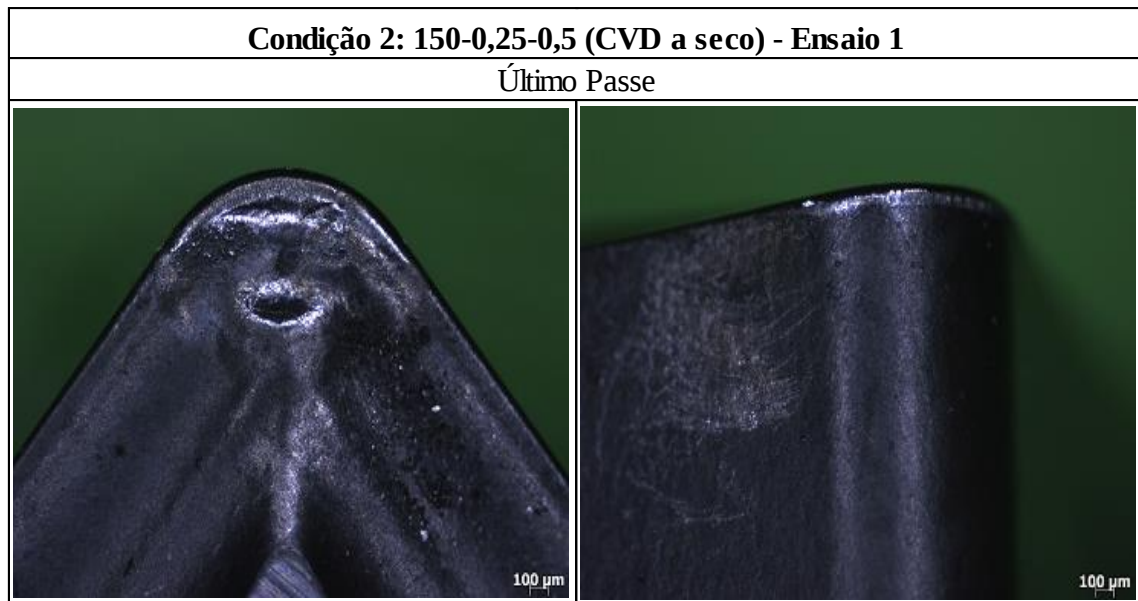


Fonte: Autor

Na análise do Quadro 16, verificou-se que:

Na *Condição 2: 150-0,25-0,5 (CVD a seco) – Ensaio 1*, o desgaste de flanco e o desgaste da superfície de saída também não foram expressivos. Percebe-se que o aumento da velocidade de corte de 125 para 150 m/min não causou desgastes excessivos e nem quebra.

Quadro 16 – Imagens dos desgastes da ferramenta na Condição 2 para ferramenta CVD

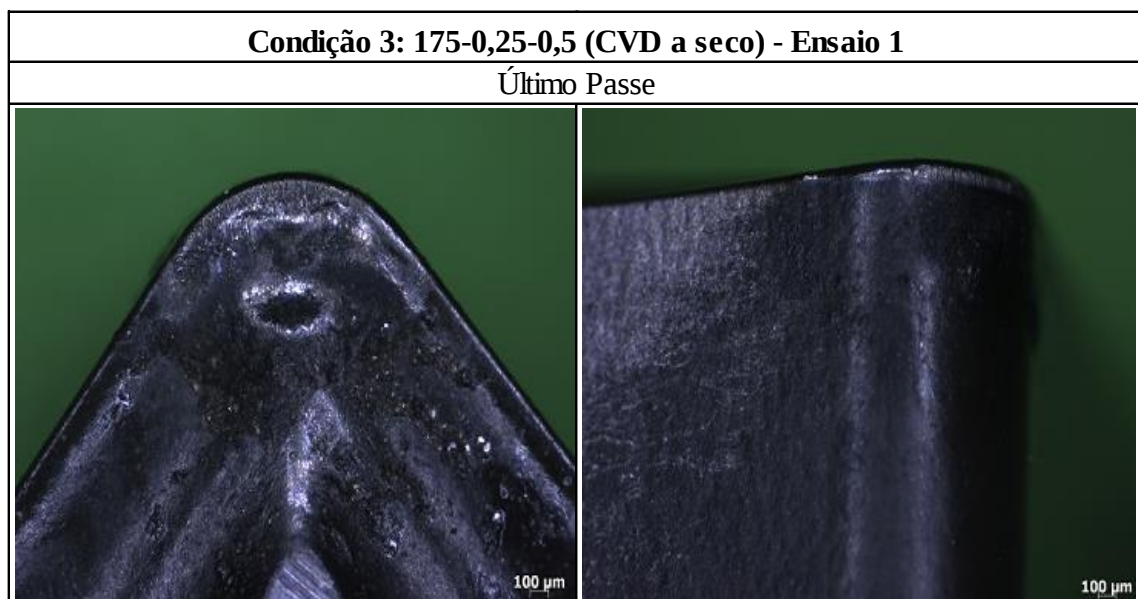


Fonte: Autor

Na análise do Quadro 17, verificou-se que:

Na *Condição 3: 175-0,25-0,5 (CVD a seco) – Ensaio 1*, verifica-se que os desgastes não foram excessivos para essa velocidade de corte. Verificou-se que o aumento da velocidade de corte de 150 para 175 m/min não impactou nos desgastes da ferramenta. Assim o revestimento para ferramenta CVD suportou muito bem a essa condição de corte.

Quadro 17 – Imagens dos desgastes da ferramenta na Condição 3 para ferramenta CVD

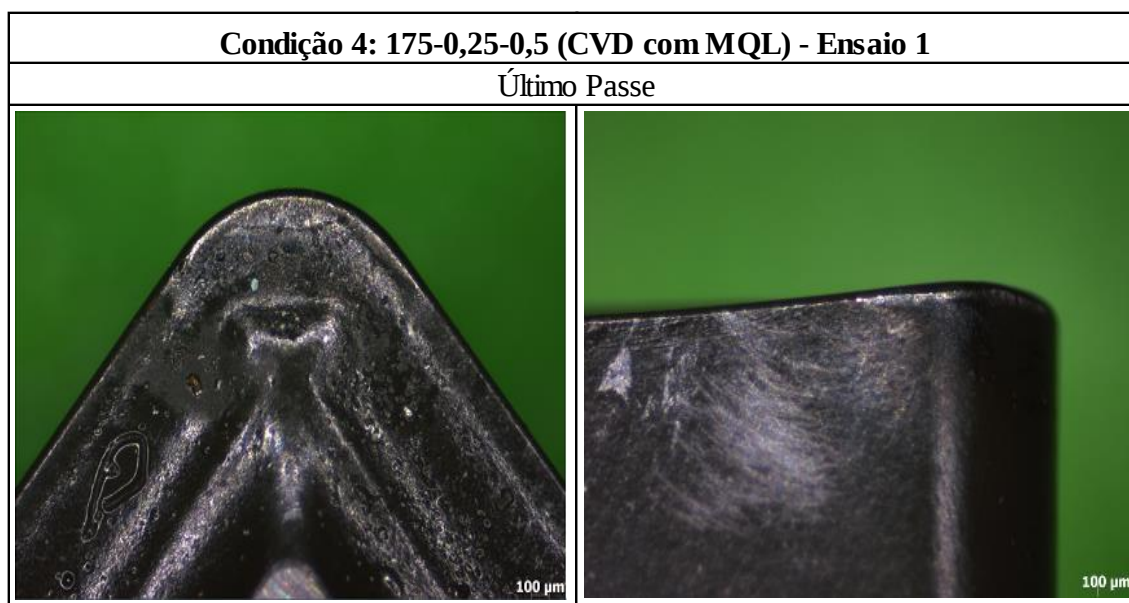


Fonte: Autor

Na análise do Quadro 18, verificou-se que:

Na *Condição 4: 175-0,25-0,5 (CVD com MQL) – Ensaio 1*, verifica-se que não ocorreram desgastes expressivos para essa condição de corte. Para velocidade de corte de 175 m/min na condição de usinagem a seco e com MQL foram parecidas, pois os desgastes não foram elevados, dessa forma, o revestimento suportou bem as duas condições de corte citadas.

Quadro 18 – Imagens dos desgastes da ferramenta na Condição 4 para ferramenta CVD



Fonte: Autor

De uma forma geral, verifica-se que as ferramentas com revestimento CVD apresentaram um desempenho melhor se comparado com as ferramentas PVD para essas condições de corte ensaiadas, provavelmente as características de fabricação da CVD, entre elas ser multicamadas influenciaram nesse desempenho superior.

As ferramentas de PVD utilizadas nesses ensaios são da classe H05-H10 e as ferramentas CVD são da classe H10-H15, sendo assim, as ferramentas de CVD possuem uma tenacidade maior do que as de PVD, consequentemente essa característica influenciou diretamente no bom desempenho das ferramentas de CVD, pois as mesmas não apresentaram quebras nas condições ensaiadas e ainda trabalharam com velocidade de corte de 175 m/min sem apresentar quebras. Outra característica importante das ferramentas CVD é que possuem uma microestrutura com grãos menores e realinhamento da direção cristalográfica, dessa forma, reafirma sua condição de maior tenacidade citada anteriormente.

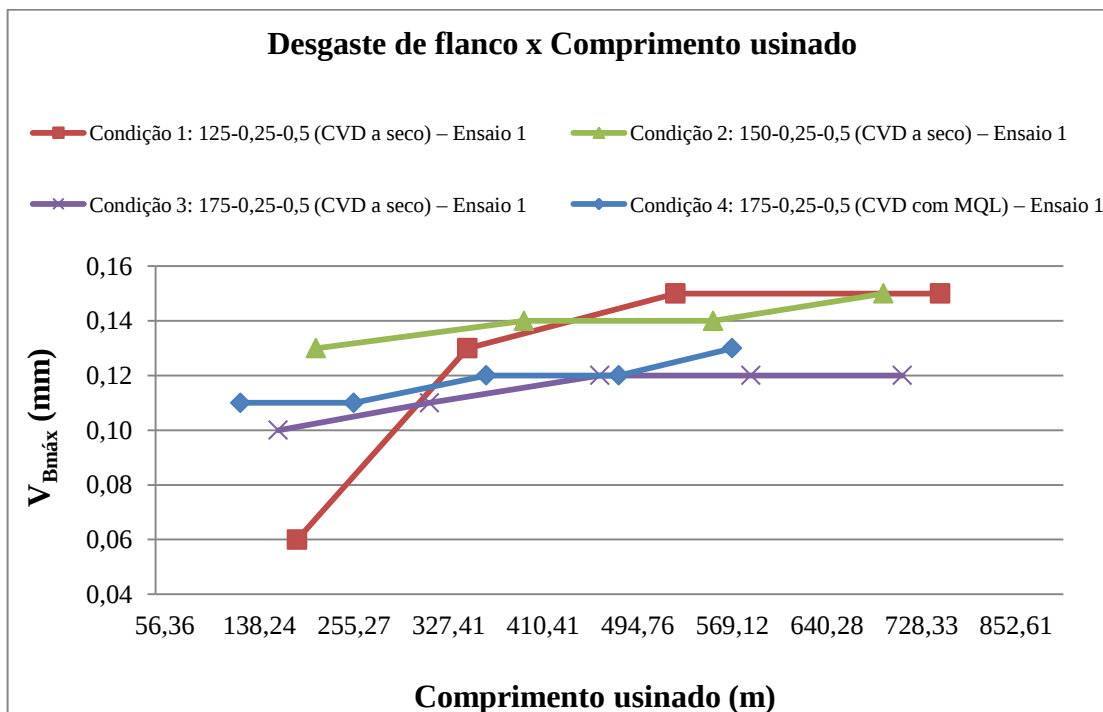
5.2.3 Análise dos desgastes de flanco ($V_{Bmáx}$) para ferramenta CVD

Durante os ensaios foram medidos os desgastes de flanco em relação ao comprimento usinado para todas as condições ensaiadas com as ferramentas de Metal Duro com revestimento CVD.

Na análise da Figura 47, verificou-se que:

A *Condição 3: 175-0,25-0,5 (CVD a seco) – Ensaio 1* apresentou o melhor desempenho, pois observou-se um desgaste de flanco com valores mais baixos comparados as outras condições para um comprimento usinado expressivo. A *Condição 4: 175-0,25-0,5 (CVD com MQL) – Ensaio 1* apresentou um desgaste de flanco maior do que a Condição 3, porém seu desgaste é menor se comparado com as condições 1 e 2, em que as velocidades de corte eram 125 e 150 m/min, respectivamente.

Figura 47 – Desgaste de flanco por comprimento usinado para ferramenta CVD



Fonte: Autor

5.2.4 Análise da rugosidade média (R_a) para ferramenta CVD

Durante os ensaios foram medidas as rugosidades médias em relação ao comprimento usinado para todas as condições ensaiadas com as ferramentas de Metal Duro com revestimento CVD.

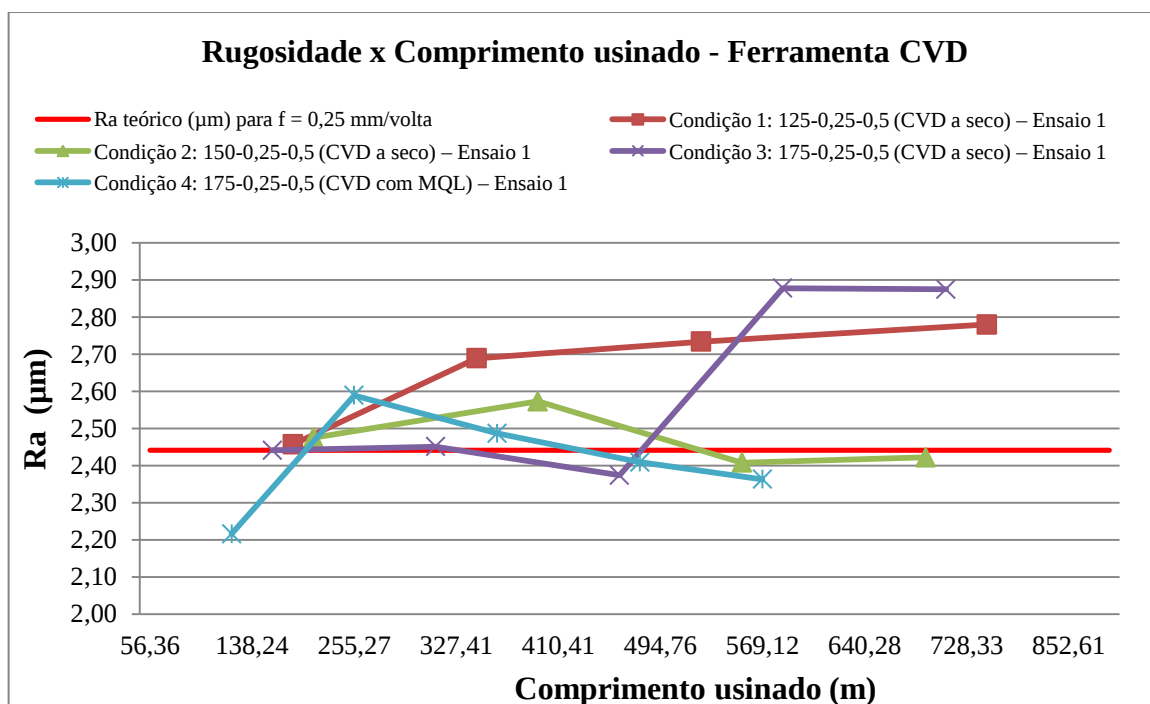
Na análise da Figura 48, verificou-se que:

A *Condição 4: 175-0,25-0,5 (CVD com MQL) – Ensaio 1* apresentou o melhor desempenho, pois observou-se uma rugosidade com valores mais baixos comparados as outras condições para um comprimento usinado significativo.

Condição 2: 150-0,25-0,5 (CVD a seco) – Ensaio 1 apresentou o segundo melhor desempenho em valores de rugosidade, porém para um comprimento usinado maior que a Condição 4, citada anteriormente.

Algumas condições de corte apresentaram valores de rugosidade média acima da teórica, porém destaca-se que os valores de rugosidade teórica não consideram os desgastes que ocorrem durante os ensaios.

Figura 48 – Rugosidade média por comprimento usinado para ferramenta CVD



Fonte: Autor

5.3 COMPARAÇÃO DA FERRAMENTA COM REVESTIMENTO PVDE CVD

Nesse item, foram comparados os resultados das ferramentas de corte com revestimento de PVD e CVD nas condições de 125 e 150 m/min.

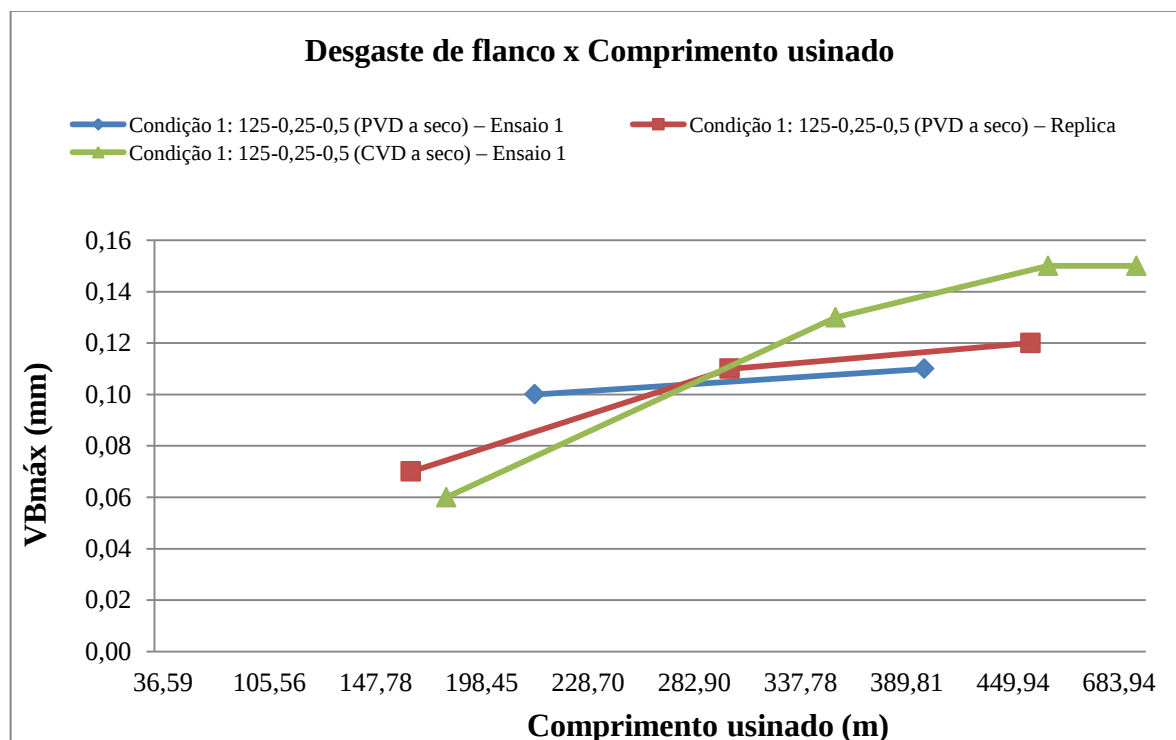
5.3.1 Desgaste de flanco ($V_{Bmáx}$) para as ferramentas PVD e CVD com $v_c = 125\text{m/min}$

Resultados obtidos para o desgaste de flanco das ferramentas de corte com revestimento de PVD e CVD na velocidade de 125 m/min.

Na análise da Figura 49, verificou-se que:

A *Condição 1: 125-0,25-0,5 (CVD a seco) – Ensaio 1* apresentou um desempenho aceitável, pois observou-se um desgaste de flanco com valores próximos ao das outras condições de corte e seu comprimento usinado foi maior.

Figura 49 – Desgaste de flanco para ferramenta PVD e CVD na $v_c = 125\text{ m/min}$



Fonte: Autor

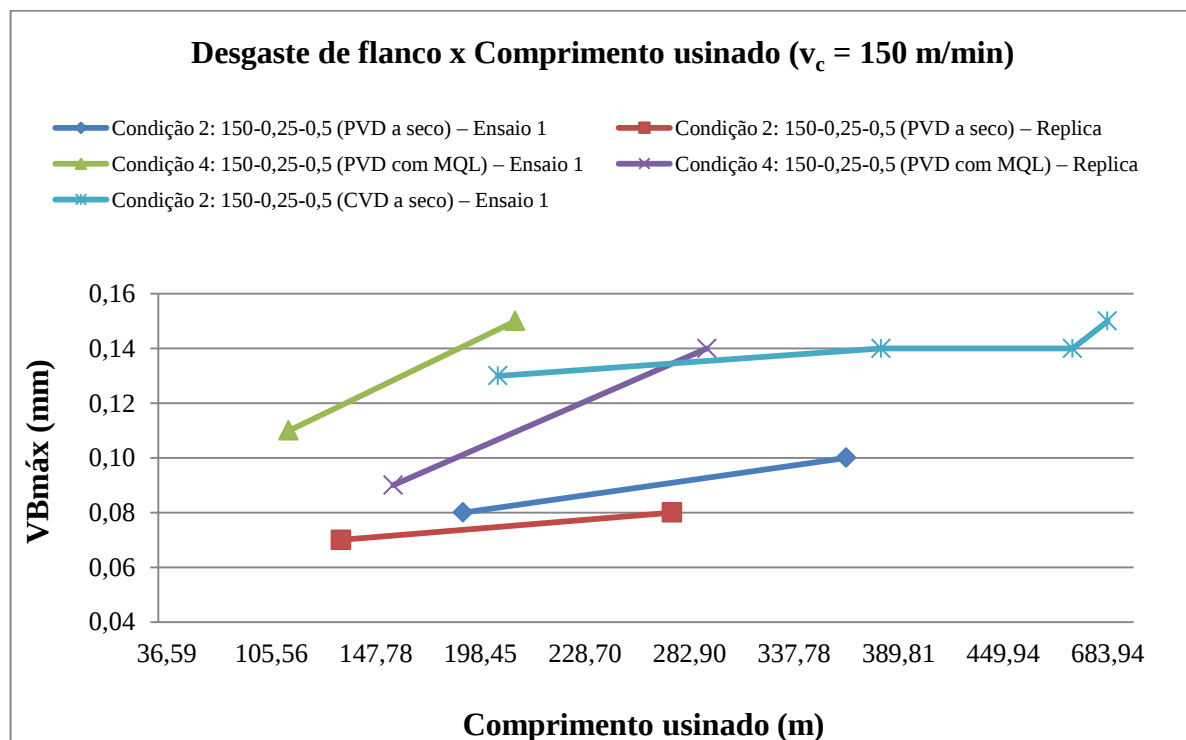
5.3.2 Desgaste de flanco ($V_{Bm\acute{a}x}$) para as ferramentas PVD E CVD com $v_c = 150$ m/min

Resultados obtidos para o desgaste de flanco das ferramentas de corte com revestimento de PVD e CVD na velocidade de 150 m/min.

Na análise da Figura 50, verificou-se que:

A *Condição 2: 150-0,25-0,5 (CVD a seco) – Ensaio1* apresentou um desempenho aceitável, pois se obteve um maior comprimento de corte usinado para valores de desgastes próximos aos obtidos pela ferramenta PVD.

Figura 50 – Desgaste de flanco para ferramenta PVD e CVD na $v_c = 150$ m/min



Fonte: Autor

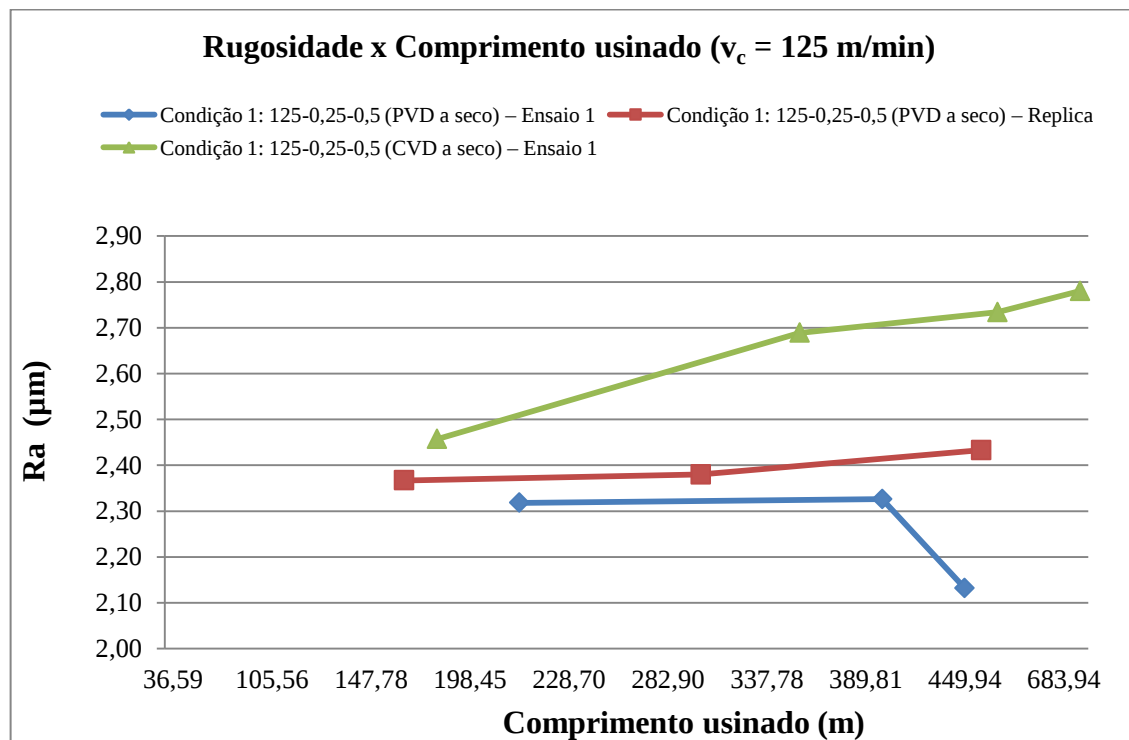
5.3.3 Rugosidade R_a para as ferramentas PVD e CVD na $v_c = 125$ m/min

Resultados obtidos para a rugosidade com ferramentas de corte com revestimento de PVD e CVD na velocidade de 125 m/min.

Na análise da Figura 51, verificou-se que:

A *Condição 1: 125-0,25-0,5 (CVD a seco) – Ensaio1* apresentou um desempenho aceitável, pois seus valores de rugosidade média foram próximos ao das outras condições de corte para um comprimento usinado maior.

Figura 51 – Rugosidade para ferramenta PVD e CVD na $v_c = 125$ m/min



Fonte: Autor

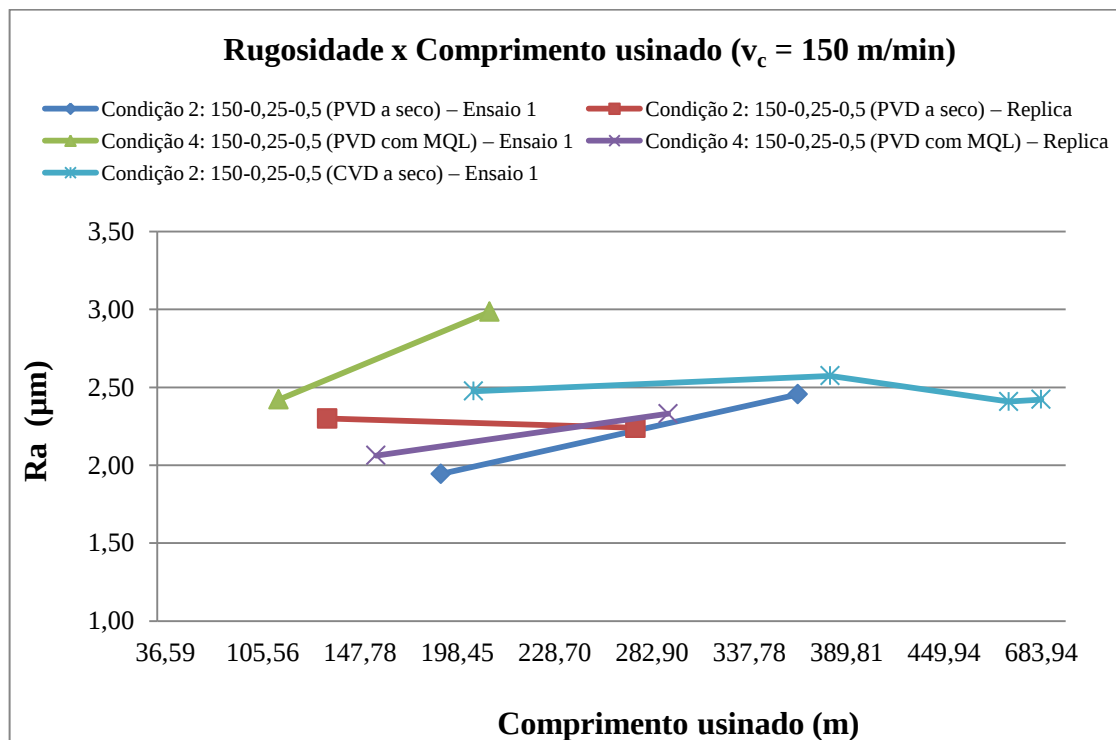
5.3.4 Rugosidade R_a para as ferramentas PVD e CVD na $v_c = 150$ m/min

Resultados obtidos para a rugosidade com ferramentas de corte com revestimento de PVD e CVD na velocidade de 150 m/min.

Na análise da Figura 52, verificou-se que:

A *Condição 2: 150-0,25-0,5 (CVD a seco) – Ensaio1* apresentou um desempenho aceitável, pois seus valores de rugosidade foram próximos das outras condições e seu comprimento usinado foi significativamente maior.

Figura 52 – Rugosidade para ferramenta PVD e CVD na $v_c = 150$ m/min



Fonte: Autor

No estudo da usinagem do aço inoxidável martensítico AISI 410 tratado termicamente realizado por Nascimento e Ribeiro (2008) utilizando a ferramenta de corte CNMG 120408-PM Classe 4225, foram utilizados os parâmetros de corte, tais como: $v_c = 70$ m/min, $f = 0,3$ e $0,4$ mm/rev e $a_p = 0,2$ mm na condição a seco. Para um avanço de $0,3$ mm/rev o desgaste de flanco atingido foi de $0,3$ mm para um comprimento usinado de aproximadamente 400 m e para um avanço de $0,4$ mm/rev o desgaste de flanco atingido foi de $0,3$ mm para um comprimento usinado de aproximadamente 200 m. Uma comparação entre o estudo de Nascimento e Ribeiro (2008) com o presente trabalho verifica-se que os ensaios PVD a 125 - 150 m/min a seco e com MQL não foram satisfatórios, pois a maioria das ferramentas PVD apresentou avarias. Porém se comparado com os ensaios realizados com as ferramentas CVD a 125 - 150 - 175 m/min a seco e com MQL, constata-se que os ensaios foram expressivos, pois apesar de um aumento significativo na velocidade de corte não houve ocorrência de avarias para as ferramentas CVD.

6 CONCLUSÕES

De acordo com os resultados dos ensaios executados para as ferramentas de Metal Duro com dois tipos de revestimento PVD e CVD, nas condições a seco e com MQL e com as variações dos parâmetros de usinagem descritos, conclui-se que:

- O tratamento térmico de têmpera no aço inoxidável martensítico AISI 410 causa um aumento significativo na resistência desse material, dessa forma, após seu endurecimento pode atender muitas aplicações de engenharia em que os requisitos de especificação que exigem elevada resistência.
- As ferramentas com revestimento CVD apresentaram um desempenho superior às ferramentas com revestimento PVD nas condições de corte, pois durante os ensaios com CVD não ocorreram quebras e nem desgaste de cratera. Porém com as ferramentas PVD ocorreram quatro quebras e uma ferramenta apresentou desgaste de cratera mesmo com a utilização da técnica com MQL. A microestrutura da ferramenta CVD e suas multicamadas com presença de Al_2O_3 , que funciona como barreira térmica, influenciaram significativamente no desempenho da ferramenta.
- Na usinagem com ferramentas de CVD os cavacos obtidos na usinagem a seco e com MQL apresentaram a forma de lascas para o 1º Passe e Último passe. Na usinagem com ferramentas PVD os cavacos foram em forma de lascas para o 1º Passe. Para o Último passe quando não houve quebra os cavacos obtidos apresentaram em forma de lascas, porém quando ocorreram quebras houve cavacos de várias formas, devido à alteração do raio de ponta.
- A comparação da usinagem na condição a seco e com a técnica MQL verifica-se que a técnica com MQL não foi tão significativa, pois a ferramenta com revestimento PVD apresentou quebra e desgaste de cratera apesar da utilização de MQL. Para ferramenta com revestimento CVD a usinagem a 125-150 e 175 m/min a seco os resultados foram expressivos.

7 REFERÊNCIAS

- 1) ASM Metals HandBook Desk Edition. ASM, 1985. 1294 p.
- 2) ASTAKHOV, V. P. **Tribology of metal cutting**. London: Elsevier, 2006. 425 p.
- 3) BAHIA, A. L. H. **Torneamento da liga de níquel Pyromet® 31V (N07032) com ferramentas de metal duro**. 2010. 158f. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) – Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2010.
- 4) BRINKSMEIER, E.; BEOCKHOFF, T. **Utilization of grinding heat as a new heat treatment process**. CIRP Annals. Manufacturing Technology 45 (1996) 283-286.
- 5) CALLISTER, W. D. **Ciência e Engenharia de Materiais: Uma Introdução**. 5 ed. Rio de Janeiro: LTC, 2002. 589 p.
- 6) Catálogo Torneamento SECO, 2012. 652 p.
- 7) CHIAVERINI, V. **Aços e ferros fundidos**. 7 ed. São Paulo: ABM, 1998. 599 p.
- 8) CHINCHANIKAR, S.; CHOUDHURY, S. K. **Machining of hardened steel- Experimental investigations, performance modeling and cooling techniques: A review**. International Journal of Machine Tools & Manufacture 89 (2015) 95-109.
- 9) COLPAERT, H. **Metalografia dos produtos siderúrgicos comuns**. 4 ed. São Paulo: Edgard Blücher, 2008. 652 p.
- 10) DINIZ, A. E.; OLIVEIRA, A. J. **Optimizing the use of dry cutting in rough turning steel operations**. Int. J. Mach. Tools Manuf. 44 (2004) 1061-1067.
- 11) DINIZ, A. E.; MARCONDES, F. C.; COPPINI, N. L. **Tecnologia da usinagem dos metais**. 8 ed. São Paulo: Artiliber, 2014. 270 p.
- 12) DEMIRCIOGLU, P. **Surface topographical evaluation of coated cutting tools with different coating technologies**. J. Measurement 47 (2014) 893-902.

- 13) DURAND-CHARE, M. **Microstructure of steels and cast irons**. 4 ed. New York: Springer Science & Business Media, 2004. 404 p.
- 14) FERRARESI, D. **Fundamentos da usinagem dos metais**. São Paulo: Edgard Blücher, 1970. 751 p.
- 15) FERNÁNDEZ-ABIA, A. I.; BARREIRO, J.; FERNÁNDEZ-LARRINOA, J.; LÓPEZ DE LACALLE, L. N.; FERNÁNDEZ-VALDIVIELSO, A.; PEREIRA, O. M. **Behavior of PVD coatings in the turning of austenitic stainless steels**. The Manufacturing Engineering Society International Conference, MESIC 2013. Procedia Engineering 63 (2013) 133-141.
- 16) GAMA, R. P. **Estudo da formação do cavaco no torneamento de superligas de níquel**. 2014. 128f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Faculdade de Engenharia do campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2014.
- 17) GRZESIK, W. **Advanced Machining Processes of Metallic Materials**. Elsevier, Oxford, UK. 2008.
- 18) HEISEL, U.; LUTZ, M.; SPATH, D.; WASSMER, R.; WALTER, U. 1998, “**A técnica de quantidade mínima de fluidos e sua aplicação nos processos de corte**”, Máquinas e Metais, p. 22-38.
- 19) HORVÁTH, R.; DRÉGELYI-KISS, A. **Analysis of surface roughness of aluminum alloys fine turned: United phenomenological models and multi-performance optimization**. Measurement 65 (2015) 181–192.
- 20) ITW Chemical Products LTDA. **Catálogo de Produtos**.
- 21) KRAUSS, G. **Steels: Processing, Structure, and Performance**. Ohio: ASM International, 2005. 613 p.
- 22) MACHADO, A. R.; ABRÃO, A. M.; COELHO, R. T.; SILVA, M. B. **Teoria da usinagem dos materiais**. 3 ed. São Paulo: Edgard Blücher, 2015. 407 p.

- 23) Mitsubishi Materials Corporate. **Tooling Technology**. 2007
- 24) NASCIMENTO, F. A.; RIBEIRO, M. V. **Influência do tratamento térmico na usinabilidade do aço inoxidável martensítico AISI 410**. In: Usinagem 2008 – Congresso e Feira, São Paulo - SP, out. 6-8, 2008, Anais CD-ROM. Revista Máquinas e Metais (Editora Aranda).
- 25) NIU, Q.; CHEN, M.; MING, W. **An Evaluation of the performance of coated carbide tools in face milling TC6 alloy under dry condition**. Int. J. Adv. Manuf. Technol. 64 (2013) 623-631.
- 26) NORMA ISO 3685 (1993). **Tool Life Testing with Single Point Turning**.
- 27) NORMA ABNT NBR ISO 4287:2002. **Especificações geométricas do produto (GPS) - Rugosidade: Método do perfil - Termos, definições e parâmetros da rugosidade**.
- 28) OBIKAWA, T.; KAMATA, Y.; SHINOZUKA, J. **High-speed grooving with applying MQL**. International Journal of Machine Tools & Manufacture 46 (2006) 1854–1861.
- 29) OLIVEIRA, D. J. ; GUERMANDI, L. G.; BIANCHI, E. C.; DINIZ, A. E.; AGUIAR, P. R.; CANARIM, R. C. **Improving minimum quantity lubrication in CBN grinding using compressed air wheel cleaning**. Journal of Materials Processing Technology 212 (2012) 2559-2568.
- 30) QEHAJA, N.; JAKUPI, K.; BUNJAKU, A.; BRUÇI, M.; OSMANI, H. **Effect of machining parameters and machining time on surface roughness in dry turning process**. 25th DAAAM International Symposium on Intelligent Manufacturing and Automation. Procedia Engineering 100 (2015) 135-140.
- 31) SADIK, M. I.; MYRTVEIT, T. **The Performance of PVD Coated Grade in Milling of ADI 800**. International. Journal Aerospace Mech. Eng. 5 (1) (2011) 55-58.

- 32) SANTOS, S. C.; SALES, W. F. **Aspectos tribológicos da usinagem dos materiais.** São Paulo: Artiber, 2007. 246 p.
- 33) SHARMA, V. S.; DOGRA, M.; SURI, N. M. **Cooling techniques for improved productivity in turning.** International Journal of Machine Tools & Manufacture. 49 (2009) 435-453.
- 34) SHASHIDHARA, Y. M.; JAYARAM, S. R. **Vegetable oils as a potential cutting fluid-an evolution.** Tribol. Int. 43 (5-6) (2010) 1073-1081.
- 35) SHAW, M. C. **Metal cutting principles.** 2 ed. New York: Oxford University Press, 2005. 651 p.
- 36) SILVA NETO, J. C. **Metrologia e controle dimensional.** Rio de Janeiro: Elsevier, 2012. 239 p.
- 37) SILVA, A. L.V. C.; MEI, P. R. **Aços e ligas especiais.** 3 ed. São Paulo: Blucher, 2010. 646 p.
- 38) STEPHENSON, D. A.; AGAPIOU, J. S. **Metal cutting theory and practice.** 2 ed. New York: CRC Press, 2006. 846 p.
- 39) TESSLER, M. B.; BARBOSA C. A. **A Usinabilidade dos aços inoxidáveis.** Centro de Pesquisa e Desenvolvimento, Villares Metals, 2002.
- 40) THAMIZHMANI, S.; NAGIB, M.; SULAIMAN, H. **Performance of deep cryogenically treated and non-treated PVD inserts in milling.** J. Achievements Mater. Manuf. Eng. 49 (2) (2011) 460-466.
- 41) TSAI, M. C.; CHIOU, C. S.; DU, J. S.; YANG, J. R. **Phase transformation in AISI 410 stainless steel.** Institute of Materials Science and Engineering 332 (2002) 1-10.
- 42) TRENT, E. M. **Metal cutting and the tribology of seizure: II Movement of material over the tool in metal cutting.** Wear, v. 128, n. 1, p. 47 – 64, 1988a.
- 43) TRENT, E. M. **Metal Cutting.** 3. ed. Oxford: Butterworths-Heinemann, 1991. 273p.

- 44) TRENT, E. M.; WRIGHT, P. K. **Metal Cutting**. 4 ed. Oxford: Butterworths-Heinemann, 2000. 446 p.
- 45) WEINERT, K.; INASAKI, I.; SUTHERLAND, J. W.; WAKABAYASHI, T. 2005. **Dry machining and minimum quantity lubrication**. Annals of the CIRP. 53 (2) (2004) 511-537.

8 REFERÊNCIAS CONSULTADAS

- 1) AMORIN, H. J. **Estudo da relação entre velocidade de corte, desgaste de ferramenta, rugosidade e forças de usinagem em torneamento com ferramenta de metal duro**. 2002. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica – Mecânica dos Sólidos) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2002.
- 2) DINIZ, A. E.; SCANDIFFIO, I. **Uma contribuição ao estudo do corte a seco e do corte com mínima quantidade de lubrificante em torneamento de aço**, I Congresso Brasileiro de Engenharia de Fabricação, 2001.
- 3) MELLO, H. J.; NALON, L. J.; SANCHEZ, L. E. A.; LOSNAK, C.; CRUZ, G. L.; MONICI, R. D. **“Efeito da aplicação de mínima quantidade de fluido (MQF) no torneamento de aços de diferentes condutividades térmicas”**. II Congresso Nacional de Engenharia Mecânica – CONEM 2002.
- 4) NASCIMENTO, F. A.; RIBEIRO, M. V., **Avaliação da usinabilidade do aço inoxidável martensítico AISI 410 no torneamento**. In: V Congresso Brasileiro de Engenharia de Fabricação – COBEF, Belo Horizonte – MG, Abril 14-17, 2009.
- 5) NASCIMENTO, F. A. **Avaliação da usinabilidade do aço inoxidável AISI 410** Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica), Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá – UNESP, Guaratinguetá, 2008.
- 6) VANDER VOORT, G. F. **Applied metallography**. New York: Van Nostrand Reinhold Company Inc., 1986. 301 p.