

NATHALIA MAYUMI BERNARDES MIYAHARA

**ANÁLISE COMPARATIVA DO DESEMPENHO DE FERRAMENTAS NO
TORNEAMENTO DO ALUMÍNIO 2024**

NATHALIA MAYUMI BERNARDES MIYAHARA

ANÁLISE COMPARATIVA DO DESEMPENHO DE FERRAMENTAS NO
TORNEAMENTO DO ALUMÍNIO 2024

Trabalho de Graduação apresentado ao Conselho de Curso de Graduação em Engenharia Mecânica da Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, como parte dos requisitos para obtenção do diploma de Graduação em Engenharia Mecânica.

Orientador: Prof. Dr. Manoel Cleber de Sampaio Alves

Guaratinguetá
2015

M685a	Miyahara, Nathalia Mayumi Bernardes Analise Comparativa do Desempenho de Ferramentas no Torneamento do Aluminio 2024 / Nathalia Mayumi Bernardes Miyahara – Guaratinguetá : [s.n], 2014. 120f. : il. Bibliografia : f. 117-120 Trabalho de Graduação em Engenharia Mecânica – Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá, 2014. Orientador: Prof. Dr. Manoel Cleber de Sampaio Alves 1. Usinagem 2. Metais – Corte I. Título CDU 621.9
-------	--

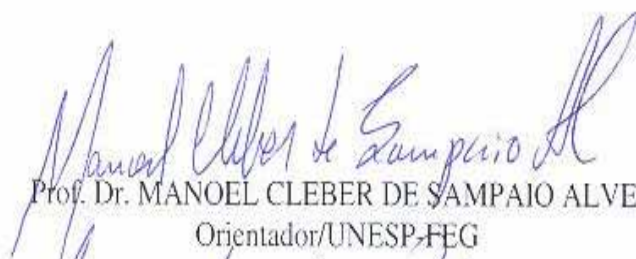
Nathalia Mayumi Bernardes Miyahara

ESTE TRABALHO DE GRADUAÇÃO FOI JULGADO ADEQUADO COMO
PARTE DO REQUISITO PARA A OBTENÇÃO DO DIPLOMA DE
“GRADUADO EM ENGENHARIA MECÂNICA”

APROVADO EM SUA FORMA FINAL PELO CONSELHO DE CURSO DE
GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA


Prof. Dr. Marcelo Sampaio Martins
Coordenador

BANCA EXAMINADORA:


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


Prof. Dr. MARCOS VALÉRIO RIBEIRO
UNESP-FEG


Prof. Dr. JOSÉ VITOR CANDIDO DE SOUZA
UNESP-FEG

Fevereiro de 2014

DADOS CURRICULARES

NATHALIA MAYUMI BERNARDES MIYAHARA

NASCIMENTO	22.04.1988 – SÃO JOSÉ DOS CAMPOS / SP
FILIAÇÃO	Lindalva Aparecida Bernardes Jorge Takashi Miyahara
2008/2014	Curso de Graduação Engenharia Mecânica – Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”

a Deus acima de tudo, a minha mãe Lindalva que sempre esteve comigo nos momentos mais difíceis e ao meu avô Joaquim que estará sempre em meu coração.

AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar agradeço a Deus por sempre ter me guiado, concedido forças e saúde, e por ter me privilegiado com crescimento pessoal, profissional e intelectual durante essa longa jornada;

à minha amada mãe, *Lindalva Aparecida Bernardes*, pelo apoio, por acreditar e sempre estar ao meu lado, pela dedicação, pelo amor incondicional e pelo exemplo de vida;

ao meu noivo, *Rodrigo Leandro Gomes de Oliveira*, pelo incentivo, compreensão, paciência e companheirismo;

ao meu orientador, *Prof. Dr. Manoel Cleber de Sampaio Alves*, pelo empenho, dedicação, sabedoria e pelos conhecimentos transmitidos ao longo da elaboração deste trabalho;

ao *Prof. Dr. Marcos Valério Ribeiro*, pelo fornecimento do alumínio 2024, material necessário à realização deste trabalho;

aos membros da banca examinadora, à Unesp e às empresas TGN e Kennametal pela doação das ferramentas;

ao *Sr. Sandro Luis Tavares de Melo* por todo aprendizado proporcionado, por toda experiência compartilhada e pela amizade;

a todos que estiveram comigo nessa jornada, minhas amigas e meus amigos, que fazem e/ou fizeram parte dessa conquista.

“Consagre ao Senhor tudo o que você faz, e os seus planos serão bem-sucedidos.”

Provérbios 16.3

MIYAHARA, N.M.B. Análise comparativa do desempenho de ferramentas no torneamento do alumínio. 2014, 116f, Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Mecânica) – Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2014.

RESUMO

As ligas de alumínio possuem aplicações nos mais diversos campos devido à sua versatilidade combinada às excelentes propriedades do alumínio, mencionadas no estudo em questão. Este trabalho tem como objetivo comparar o desempenho das ferramentas de metal duro polido, metal duro recoberto com TiB_2 e aço rápido, no torneamento da liga de alumínio 2024, em função da variação de alguns parâmetros de usinagem como: avanço, profundidade e velocidade de corte; e estudar o acabamento superficial e a potência requerida durante o torneamento através do tratamento dos dados de saída, bem como analisar as características dos cavacos para cada ferramenta utilizada. Os resultados fornecem informações dos efeitos do material da ferramenta, quando submetido a diferentes condições de usinagem, sobre as variáveis de saída em questão. Desta forma, foi possível perceber que embora a ferramenta de metal duro com recobrimento de TiB_2 tenha apresentado o melhor acabamento superficial, as características do cavaco foram melhores quando o torneamento foi realizado com a ferramenta de metal duro polido. Em relação à potência requerida ao torneamento, o menor consumo se deu para a ferramenta de aço rápido.

PALAVRAS-CHAVE: Usinagem, Avanço, Profundidade de Corte, Velocidade de Corte.

MIYAHARA, N.M.B. Comparative Analysis of Performance of Tools on 2024 Aluminium's Turning. 2014, 116f, Final Paper (Bachelor's Degree in Mechanical Engineering) – Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2014.

ABSTRACT

The aluminium alloys are used in many fields because of their versatility combined with the excellent aluminium's properties, mentioned in the study. This study aims to compare the performance of polished Hard Metal, Hard Metal covered with TiB_2 and High Speed Steel (HSS) tools, at the aluminium 2024 alloy's turning, as a function of variation of some turning parameters such as: feed, depth of cut and cutting speed; and study the surface finish and the required power during turning by processing the output data, like analyze the chip's features for each used tool. The results provide information of the tool's material effects, when submitted to different turning conditions, about the output variable in question. In this way, it was possible to notice that although the Hard Metal covered with TiB_2 tool has provided the better surface finish, the chip's features were better when the turning was accomplished by the Polished Hard Metal tool. In relation to the required turning's power, the lowest consumption occurred with the High Speed Steel tool.

KEYWORDS: Machining, Feed, Depth of Cut, Cutting Speed.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 –	Principais elementos de liga e classificação das ligas de alumínio.....	21
Figura 2 –	Processos de torneamento	31
Figura 3 –	Limitantes do processo de usinagem por torneamento	33
Figura 4 –	Grandezas relevantes ao processo de usinagem por torneamento	33
Figura 5 –	Representação dos movimentos no processo de torneamento	35
Figura 6 –	Forças de usinagem em um torneamento e suas componentes	36
Figura 7 –	Velocidade de corte v_c , de avanço v_f e efetiva v_e no torneamento.....	38
Figura 8 –	Regiões da formação do cavaco.....	42
Figura 9 –	Formas de cavacos produzidos na usinagem dos metais	42
Figura 10 –	Efeito do avanço e da profundidade de corte na forma dos cavacos	43
Figura 11 –	Zona de fluxo dentro do cavaco.....	44
Figura 12 –	Pastilha para torneamento de ligas de alumínio.....	47
Figura 13 –	Pontos de referência das arestas de corte de uma ferramenta de torno.....	49
Figura 14 –	Aresta Postiça de Corte.....	52
Figura 15 –	Mecanismo de abrasão.....	52
Figura 16 –	Difusão.....	53
Figura 17 –	Oxidação	53
Figura 18 –	Aderência	53
Figura 19 –	Fadiga	54
Figura 20 –	Quebra da ferramenta.....	54
Figura 21 –	Lascamento da ferramenta	55
Figura 22 –	Trincas	56
Figura 23 –	Deformação plástica da ferramenta	56
Figura 24 –	Esquema do processo de fabricação da pastilha de metal duro	59
Figura 25 –	Microestrutura do metal duro.....	62
Figura 26 –	Rede hexagonal de átomos de boro na matriz de titânio.....	63
Figura 27 –	Esquema do corpo de prova.....	65
Figura 28 –	Corpo de prova.....	65
Figura 29 –	Torno CNC Emco, Compact 5.....	68
Figura 30 –	Interface do software LabVIEW.....	69
Figura 31 –	Suporte e apalpador do rugosímetro	69
Figura 32 –	Display do rugosímetro.....	70
Figura 33 –	Pastilha de metal duro polido.....	71
Figura 34 –	Pastilha de metal duro polido no suporte.....	71
Figura 35 –	Configuração da pastilha de metal duro polido	71

Figura 36 –	Pastilha de metal duro com recobrimento de TiB_2	72
Figura 37 –	Pastilha de metal duro com recobrimento de TiB_2 no suporte	72
Figura 38 –	Pastilha de metal duro com recobrimento de TiB_2	72
Figura 39 –	Suporte utilizado para as pastilhas de metal duro	73
Figura 40 –	Ferramenta de aço rápido	73
Figura 41 –	Ferramenta de aço rápido	73
Figura 42 –	Configuração dos CDP's utilizados	74
Figura 43 –	Gráficos R_a e R_t <i>versus</i> f , para a pastilha de metal duro polido	78
Figura 44 –	Variação de R_a em função do avanço e da profundidade de corte, para a pastilha de metal duro polido	79
Figura 45 –	Variação de R_t em função do avanço e da profundidade de corte, para a pastilha de metal duro polido	79
Figura 46 –	Potência requerida para o torneamento do CDP1	80
Figura 47 –	Potência requerida para o torneamento do CDP2	80
Figura 48 –	Potência requerida para o torneamento do CDP3	81
Figura 49 –	Gráficos R_a e R_t <i>versus</i> f , para a pastilha de metal duro recoberta com TiB_2	84
Figura 50 –	Variação de R_a em função do avanço e da profundidade de corte, para a pastilha de metal duro recoberto com TiB_2	85
Figura 51 –	Variação de R_t em função do avanço e da profundidade de corte, para a pastilha de metal duro recoberto com TiB_2	85
Figura 52 –	Potência requerida para o torneamento do CDP4	86
Figura 53 –	Potência requerida para o torneamento do CDP5	86
Figura 54 –	Potência requerida para o torneamento do CDP6	87
Figura 55 –	Gráficos R_a e R_t <i>versus</i> f , para a ferramenta de aço rápido	90
Figura 56 –	Variação de R_a em função do avanço e da profundidade de corte, para a ferramenta de aço rápido	91
Figura 57 –	Variação de R_t em função do avanço e da profundidade de corte, para a ferramenta de aço rápido	91
Figura 58 –	Potência requerida para o torneamento do CDP7	92
Figura 59 –	Potência requerida para o torneamento do CDP8	92
Figura 60 –	Potência requerida para o torneamento do CDP9	93
Figura 61 –	Variação da potência requerida em função do avanço e da profundidade de corte, para as três ferramentas ensaiadas	94
Figura 62 –	Região com APC	94
Figura 63 –	Pastilha de metal duro polido, nova e após usinagem do CDP1	95
Figura 64 –	Pastilha de metal duro polido, nova e após usinagem do CDP1	95
Figura 65 –	Pastilha de metal duro polido, nova e após usinagem do CDP2	96

Figura 66 –	Pastilha de metal duro polido, nova e após usinagem do CDP2.....	96
Figura 67 –	Pastilha de metal duro polido, nova e após usinagem do CDP2.....	96
Figura 68 –	Pastilha de metal duro polido, nova e após usinagem do CDP3.....	97
Figura 69 –	Pastilha de metal duro polido, nova e após usinagem do CDP3.....	97
Figura 70 –	Pastilha de metal duro polido, nova e após usinagem do CDP3.....	97
Figura 71 –	Pastilha de metal duro recoberto com TiB_2 , nova e após usinagem do CDP4.....	98
Figura 72 –	Pastilha de metal duro recoberto com TiB_2 , nova e após usinagem do CDP4.....	98
Figura 73 –	Pastilha de metal duro recoberto com TiB_2 , nova e após usinagem do CDP4.....	99
Figura 74 –	Pastilha de metal duro recoberto com TiB_2 , nova e após usinagem do CDP5.....	99
Figura 75 –	Pastilha de metal duro recoberto com TiB_2 , nova e após usinagem do CDP5.....	100
Figura 76 –	Pastilha de metal duro recoberto com TiB_2 , nova e após usinagem do CDP6.....	100
Figura 77 –	Pastilha de metal duro recoberto com TiB_2 , nova e após usinagem do CDP6.....	100
Figura 78 –	Pastilha de metal duro recoberto com TiB_2 , nova e após usinagem do CDP6.....	101
Figura 79 –	Pastilha de metal duro polido; profundidade de corte de 0,50 mm; avanços de 40, 70 e 100 mm/min, respectivamente	102
Figura 80 –	Pastilha de metal duro polido; profundidade de corte de 0,35 mm; avanços de 40, 70 e 100 mm/min, respectivamente	102
Figura 81 –	Pastilha de metal duro polido; profundidade de corte de 0,20 mm; avanços de 40, 70 e 100 mm/min, respectivamente	103
Figura 82 –	Pastilha de metal duro polido; profundidade de corte de 0,50 mm; avanços de 40, 70 e 100 mm/min, respectivamente	103
Figura 83 –	Pastilha de metal duro polido; profundidade de corte de 0,35 mm; avanços de 40, 70 e 100 mm/min, respectivamente	104
Figura 84 –	Pastilha de metal duro polido; profundidade de corte de 0,20 mm; avanços de 40, 70 e 100 mm/min, respectivamente	104
Figura 85 –	Pastilha de metal duro polido; profundidade de corte de 0,50 mm; avanços de 40, 70 e 100 mm/min, respectivamente	105
Figura 86 –	Pastilha de metal duro polido; profundidade de corte de 0,35 mm; avanços de 40, 70 e 100 mm/min, respectivamente	105
Figura 87 –	Pastilha de metal duro polido; profundidade de corte de 0,20 mm; avanços de 40, 70 e 100 mm/min, respectivamente	106
Figura 88 –	Pastilha de metal duro recoberta com TiB_2 ; profundidade de corte de 0,50 mm; avanços de 40, 70 e 100 mm/min, respectivamente.....	106
Figura 89 –	Pastilha de metal duro recoberta com TiB_2 ; profundidade de corte de 0,35 mm; avanços de 40, 70 e 100 mm/min, respectivamente.....	107
Figura 90 –	Pastilha de metal duro recoberta com TiB_2 ; profundidade de corte de 0,20 mm; avanços de 40, 70 e 100 mm/min, respectivamente.....	107

Figura 91 –	Pastilha de metal duro recoberta com TiB_2 ; profundidade de corte de 0,50 mm; avanços de 40, 70 e 100 mm/min, respectivamente.....	108
Figura 92 –	Pastilha de metal duro recoberta com TiB_2 ; profundidade de corte de 0,35 mm; avanços de 40, 70 e 100 mm/min, respectivamente.....	108
Figura 93 –	Pastilha de metal duro recoberta com TiB_2 ; profundidade de corte de 0,20 mm; avanços de 40, 70 e 100 mm/min, respectivamente.....	109
Figura 94 –	Pastilha de metal duro recoberta com TiB_2 ; profundidade de corte de 0,50 mm; avanços de 40, 70 e 100 mm/min, respectivamente.....	109
Figura 95 –	Pastilha de metal duro recoberta com TiB_2 ; profundidade de corte de 0,35 mm; avanços de 40, 70 e 100 mm/min, respectivamente.....	110
Figura 96 –	Pastilha de metal duro recoberta com TiB_2 ; profundidade de corte de 0,20 mm; avanços de 40, 70 e 100 mm/min, respectivamente.....	110
Figura 97 –	Ferramenta de aço rápido; profundidade de corte de 0,50 mm; avanços de 40, 70 e 100 mm/min, respectivamente	111
Figura 98 –	Ferramenta de aço rápido; profundidade de corte de 0,35 mm; avanços de 40, 70 e 100 mm/min, respectivamente	111
Figura 99 –	Ferramenta de aço rápido; profundidade de corte de 0,20 mm; avanços de 40, 70 e 100 mm/min, respectivamente	112
Figura 100 –	Ferramenta de aço rápido; profundidade de corte de 0,50 mm; avanços de 40, 70 e 100 mm/min, respectivamente	112
Figura 101 –	Ferramenta de aço rápido; profundidade de corte de 0,35 mm; avanços de 40, 70 e 100 mm/min, respectivamente	113
Figura 102 –	Ferramenta de aço rápido; profundidade de corte de 0,20 mm; avanços de 40, 70 e 100 mm/min, respectivamente	113
Figura 103 –	Ferramenta de aço rápido; profundidade de corte de 0,50 mm; avanços de 40, 70 e 100 mm/min, respectivamente	114
Figura 104 –	Ferramenta de aço rápido; profundidade de corte de 0,35 mm; avanços de 40, 70 e 100 mm/min, respectivamente	114
Figura 105 –	Ferramenta de aço rápido; profundidade de corte de 0,20 mm; avanços de 40, 70 e 100 mm/min, respectivamente	115

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 –	Propriedades físicas do alumínio	20
Quadro 2 –	Classificação e usos das ligas de alumínio	22
Quadro 3 –	Designações e definições de têmperas para a liga 2024	28
Quadro 4 –	Análise química da liga 2024.....	29
Quadro 5 –	Elementos de liga e suas influências na usinabilidade do alumínio.....	46
Quadro 6 –	Causas e ações para minimizar avarias e desgastes da ferramenta	51
Quadro 7 –	Relações dos aços rápidos com os elementos de liga presentes.....	58
Quadro 8 –	Classes dos aços rápidos	58
Quadro 9 –	Classificação das ferramentas de metal duro	60
Quadro 10 –	Propriedades físicas e mecânicas típicas do TiB ₂ à temperatura ambiente.....	63
Quadro 11 –	Programa utilizado para a usinagem dos corpos de prova	67
Quadro 12 –	Rugosidades médias (R_a) medidas no CDP1	75
Quadro 13 –	Rugosidades totais (R_t) medidas no CDP1	75
Quadro 14 –	Rugosidades médias (R_a) medidas no CDP2	76
Quadro 15 –	Rugosidades totais (R_t) medidas no CDP2	76
Quadro 16 –	Rugosidades médias (R_a) medidas no CDP3	76
Quadro 17 –	Rugosidades totais (R_t) medidas no CDP3	77
Quadro 18 –	Valores de potência requerida para o torneamento, em <i>Watts</i>	81
Quadro 19 –	Rugosidades médias (R_a) medidas no CDP4	82
Quadro 20 –	Rugosidades totais (R_t) medidas no CDP4	82
Quadro 21 –	Rugosidades médias (R_a) medidas no CDP5	82
Quadro 22 –	Rugosidades totais (R_t) medidas no CDP5	83
Quadro 23 –	Rugosidades médias (R_a) medidas no CDP6	83
Quadro 24 –	Rugosidades totais (R_t) medidas no CDP6	83
Quadro 25 –	Valores de potência requerida para o torneamento, em <i>Watts</i>	87
Quadro 26 –	Rugosidades médias (R_a) medidas no CDP7	88
Quadro 27 –	Rugosidades totais (R_t) medidas no CDP7	88
Quadro 28 –	Rugosidades médias (R_a) medidas no CDP8	88
Quadro 29 –	Rugosidades totais (R_t) medidas no CDP8	89
Quadro 30 –	Rugosidades médias (R_a) medidas no CDP9	89
Quadro 31 –	Rugosidades totais (R_t) medidas no CDP9	89
Quadro 32 –	Valores de potência requerida para o torneamento, em <i>Watts</i>	93

LISTA DE ABREVIATURAS, SIGLAS E SÍMBOLOS

ABAL	Associação Brasileira do Alumínio
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
a_p	Profundidade de corte
APC	Aresta postiza de corte
CDP	Corpo de prova
CNC	Comando numérico computadorizado
DMT	Departamento de Materiais e Tecnologia
f	Avanço
ISO	Organização Internacional para Padronização
NBR	Norma Brasileira
rpm	Rotações por minuto
TiB ₂	Diboreto de Titânio
v_c	Velocidade de corte

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	17
2	OBJETIVO	18
3	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	19
3.1	ALUMÍNIO	19
3.1.1	Ligas de alumínio	21
3.1.1.1	Nomenclatura das ligas de alumínio.....	22
3.1.1.1.1	Série 1xxx.....	23
3.1.1.1.2	Série 2xxx.....	23
3.1.1.1.3	Série 3xxx.....	23
3.1.1.1.4	Série 4xxx.....	24
3.1.1.1.5	Série 5xxx.....	24
3.1.1.1.6	Série 6xxx.....	25
3.1.1.1.7	Série 7xxx.....	25
3.1.1.1.8	Série 8xxx.....	26
3.1.1.2	Aplicações das ligas de alumínio.....	26
3.1.1.3	Liga de alumínio 2024.....	27
3.1.1.3.1	Aplicações da liga de alumínio 2024.....	29
3.2	PROCESSO DE USINAGEM.....	29
3.2.1	Movimentos na Usinagem	30
3.2.2	Torneamento	31
3.2.2.1	Torno CNC	34
3.2.3	Potência	35
3.2.4	Velocidade de Corte	37
3.2.5	Avanço.....	39
3.2.6	Acabamento superficial	39
3.2.6.1	Rugosidade média (R_a)	40
3.2.6.2	Rugosidade máxima (R_{max}) e total (R_y)	40
3.2.7	Comprimento de corte	40
3.2.8	Interface cavaco-ferramenta	44
3.2.9	Usinabilidade.....	45
3.2.10	Lubrificação.....	46
3.2.11	Ferramentas de Corte.....	47
3.2.11.1	Geometria da cunha cortante	48
3.2.12	Desgaste e Avaria	50
3.2.12.2	Avaria	54

3.2.12.3	Desgaste.....	55
3.2.12.3.1	Deformação Plástica.....	56
3.2.13	Ferramentas de aço rápido.....	57
3.2.14	Ferramentas de metal duro.....	58
3.2.15	Ferramentas de metal duro com revestimento.....	61
3.2.15.1	Diboreto de titânio (TiB ₂).....	62
4	MATERIAIS E MÉTODOS.....	64
4.1	PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL.....	64
4.2	EQUIPAMENTOS, FERRAMENTAS E MATERIAIS UTILIZADOS.....	68
4.2.1	Equipamentos utilizados.....	68
4.2.2	Ferramentas Utilizadas.....	70
4.2.3	Materiais utilizados.....	74
4.3	ANÁLISE DOS RESULTADOS.....	74
5	RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	75
5.1	ACABAMENTO SUPERFICIAL.....	75
5.1.1	Torneamento com ferramenta de metal duro, classe N, sem recobrimento.....	75
5.1.2	Torneamento com ferramenta de metal duro recoberta com TiB ₂	82
5.1.3	Torneamento com ferramenta de aço rápido.....	88
5.1.4	Análise do desgaste das ferramentas.....	95
5.2	ANÁLISE DOS CAVACOS.....	101
6	CONCLUSÕES.....	116
7	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	117

1 INTRODUÇÃO

O alumínio é amplamente utilizado no mundo todo por causa de sua extensa gama de aplicações, e seu bom desempenho na maioria delas. É um material que possui propriedades mecânicas e térmicas favoráveis à sua utilização em diversas aplicações.

A maioria dos produtos industrializados sofre algum processo de usinagem em alguma de suas etapas de produção. O foco deste trabalho está na usinagem da liga 2024-T4, também conhecida como superduralumínio, ideal para aplicações de alta resistência, equipamentos e estruturas para aviação, componentes de computadores, engrenagens, eixos, pinos de dobradiças, blocos e componentes de válvulas, porcas, parafusos, prendedores, componentes de freio e caminhões.

A liga 2024-T4 apresenta boa usinabilidade com acabamento superficial de bom a excelente. No entanto, a tendência à formação de cavaco longo e APC durante o torneamento do alumínio 2024-T4 torna a usinagem desse material um processo complicado.

Neste trabalho buscou-se comparar os efeitos do material da ferramenta sobre algumas variáveis de saída do processo como acabamento superficial das peças, potência requerida para a usinagem, desgaste ferramental e as características do cavaco para cada ferramenta utilizada. Foram utilizadas ferramentas de metal duro polido, metal duro recoberto com TiB_2 e aço rápido, todas com geometrias equivalentes.

2 OBJETIVO

O presente Trabalho de Graduação tem por objetivo analisar a influência de diferentes materiais de ferramentas de corte no processo de torneamento, em relação à qualidade superficial, potência requerida durante o processo, desgaste ferramental e aspectos dos cavacos; bem como verificar e comparar a influência do avanço e da profundidade de corte sobre o acabamento superficial, a potência, o desgaste das ferramentas e a forma dos cavacos obtidos.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Ao analisar-se quais os materiais mais comuns usinados com o objetivo de otimizar os resultados das operações, pode-se destacar algumas propriedades físicas, químicas e mecânicas: dureza, resistência à tração, ductilidade, condutividade térmica, capacidade de endurecimento por deformação, composição química, inclusões, afinidade química, encruamento e também as propriedades relacionadas à microestrutura, uma vez que a mesma tem papel significativo no desempenho da operação de usinagem (MACHADO et al., 2011).

3.1 ALUMÍNIO

O alumínio é um metal branco acinzentado, maleável, dúctil, e o terceiro elemento mais abundante no planeta, perdendo apenas para o oxigênio e o silício. Apesar de ser um dos elementos metálicos mais abundantes na crosta terrestre geralmente é encontrado formando óxidos ou silicatos, devido a sua grande afinidade com o oxigênio. Pertence à família 13 da tabela periódica (DOMINGUES JUNIOR, 2011).

Segundo Domingues Junior (2011), as excelentes propriedades físico-químicas do alumínio, entre as quais se destacam o baixo peso específico, a resistência à corrosão, a alta condutibilidade térmica e elétrica e a infinita reciclagem, o tornam o metal não-ferroso mais consumido no mundo.

As propriedades mecânicas e térmicas do alumínio puro são fatores decisivos nas características de usinagem das ligas. O alumínio apresenta módulo de elasticidade de aproximadamente $\frac{1}{3}$ do módulo de elasticidade do aço, o que significa que sob a mesma força de corte, o alumínio se deforma três vezes mais que o aço. Essa característica tem consequências negativas na obtenção de superfícies usinadas de boa qualidade e pode gerar deformações indesejadas. Por isso, não se deve utilizar grandes esforços na fixação das peças (DINIZ; MARCONDES; COPPINI, 2008).

Dessa forma, as forças de corte necessárias para usinagem das ligas de alumínio são bem baixas se comparadas às relativas aos aços. Sua alta condutividade térmica favorece a usinabilidade e é necessário que possua dureza maior que 80 HB para que a formação da aresta postiça de corte não seja favorecida, possibilitando a obtenção de baixas rugosidades na peça usinada (DINIZ; MARCONDES; COPPINI, 2008). Segundo Machado et al. (2011), alta

condutividade térmica significa que o calor produzido na região de formação de cavacos é rapidamente conduzido para as imediações, longe da região de corte. Altos valores desse parâmetro são, em geral, desejados.

Segundo Diniz, Marcondes e Coppini (2008), o alumínio em geral pode ser facilmente usinado, uma vez que a energia consumida por unidade de volume do metal removido é muito baixa. As temperaturas de usinagem são geralmente baixas e altas velocidades de corte podem ser usadas, mas com relação aos critérios de usinabilidade baseados na rugosidade da peça e na característica do cavaco, não se pode dizer que o alumínio tenha alta usinabilidade, pois em condições normais de usinagem, o cavaco formado é longo e o acabamento superficial obtido é insatisfatório. No entanto, bons acabamentos superficiais podem ser obtidos se a velocidade de corte for alta o suficiente e a geometria da peça adequada.

O coeficiente de dilatação térmica do alumínio é maior do que do aço e do latão, o que dificulta a obtenção de tolerâncias apertadas (DINIZ; MARCONDES; COPPINI, 2008).

A elevada resistência à corrosão é complementada com a vantagem de que o metal não necessita de tratamento superficial para agir desta forma. No entanto, possui baixa resistência mecânica e, por isso, utiliza-se tanto tratamento térmico quanto adição de elementos de liga para a manipulação desta propriedade, dependendo da aplicação (BRESCIANI FILHO, 1992).

O Quadro 1 resume as principais propriedades físicas do alumínio.

Quadro 1 – Propriedades físicas do alumínio

Número atômico	13		
Massa atômica	26,98		
Densidade	2,70	mg/m ³	(20°C)
Ponto de fusão	660	°C	
Calor específico	400	J/kg.K	(25°C)
Calor latente de fusão	397	kJ/kg	
Condutibilidade térmica	247	W/m.K	(25°C)
Resistividade elétrica	26,55	nΩm	(20°C)
Condutibilidade elétrica (volumétrica)	64,94	%IACS	
Estrutura cristalina	Cúbica de faces centradas		

Fonte: (BRESCIANI FILHO, 1992).

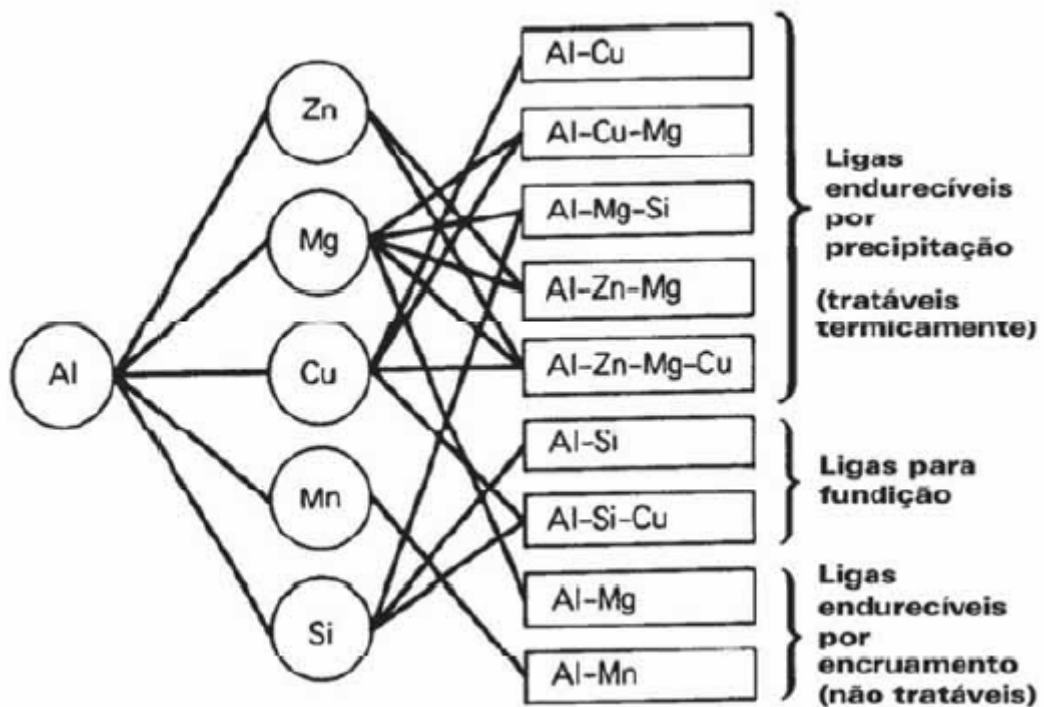
3.1.1 Ligas de alumínio

A principal função das ligas de alumínio é aumentar a resistência mecânica sem prejudicar as demais propriedades, seu grande alcance oferece à indústria uma grande variedade de combinações de propriedades, entre outros benefícios (DOMINGUES JUNIOR, 2011).

Ainda segundo Domingues Junior (2011), nas ligas comerciais, os elementos de liga se encontram em proporções determinadas segundo uma especificação que prevê um limite tolerável desses elementos ou de impurezas, de forma a não comprometer as características mecânicas e químicas das ligas. A composição química do alumínio e suas ligas são expressas em porcentagem, segundo a Norma NBR 6834 da ABNT.

Podem-se verificar, a partir da Figura 1, os principais elementos de liga e a respectiva classificação das ligas de alumínio.

Figura 1 – Principais elementos de liga e classificação das ligas de alumínio



Fonte: (ZANGRANDI, 2008).

3.1.1.1 Nomenclatura das ligas de alumínio

A nomenclatura das ligas de alumínio deve ser feita conforme mostrado a seguir (MOREIRA, 2015).

Na série 1xxx, os dois últimos dígitos indicam a porcentagem de Alumínio (Al) acima de 99%. exemplos:

- liga 1050 - 99,50% de Al
- liga 1060 - 99,60% de Al

O segundo dígito indica modificações no limite de impurezas ou a adição de algum elemento de liga. Se o segundo dígito for zero, indica que o Al não foi ligado e apresenta o limite de impurezas convencional. Os números entre um e nove indicam controle especial sobre uma ou mais impurezas ou a adição de elementos de liga.

Nas séries 2xxx a 8xxx, os dois últimos dígitos não possuem significado numérico, apenas identificam diferentes ligas do mesmo grupo. O segundo dígito indica modificações no limite de impurezas ou a adição de elementos de liga.

Ligas experimentais também utilizam este sistema de classificação, porém, são indicadas pelo prefixo X.

O Quadro 2 lista a composição química e as principais aplicações de cada série da ligas de alumínio.

Quadro 2 – Classificação e usos das ligas de alumínio

Série	Composição química	Principais aplicações
1xxx	Al comercialmente puro	Contatos elétricos, Alclad
2xxx	Al-Cu e Al-Cu-Mg	Indústria aeronáutica
3xxx	Al-Mn e Al-Mn-Mg	Latas de bebidas, painéis
4xxx	Al-Si	Metal de adição para soldas, pistões forjados de motores
5xxx	Al-Mg	Aplicações náuticas (navios e barcos)
6xxx	Al-Mg-Si	Perfis arquitetônicos, componentes automotivos
7xxx	Al-Zn-Mg e Al-Zn-Mg-Cu	Indústria aeronáutica
8xxx	Outras ligas (Al-Li, Al-Fe)	Diversas e variadas

Fonte: (YOSHIKAWA, 2011).

3.1.1.1.1 Série 1xxx

Segundo Moreira (2015), O alumínio comercialmente puro, não ligado, com pureza igual ou superior a 99% de Al, Fe e Si são as principais impurezas. As ligas da série 1000 são caracterizadas pela excelente resistência a corrosão, alta condutibilidade térmica e elétrica, baixa resistência mecânica e elevada ductilidade. Um aumento moderado na resistência mecânica pode ser obtido por meio de encruamento.

As ligas desta série podem ser aplicadas, por exemplo, em equipamentos de indústria química, refletores, trocadores de calor, condutores elétricos e capacitores, embalagens (papel alumínio), ou ainda em painéis decorativos para uso na construção civil.

3.1.1.1.2 Série 2xxx

Segundo Moreira (2015), o cobre é o elemento de liga principal e, na maioria das ligas, o magnésio é o elemento de liga secundário. São ligas tratáveis termicamente, podendo, após os tratamentos, atingir a resistência de aço baixo carbono (450 MPa). Apresentam resistência à corrosão inferior a de outras ligas de alumínio e, sob certas condições, podem apresentar corrosão intragranular.

As ligas desta série tem boa usinabilidade e características de soldagem limitadas (exceto a liga 2219), razão pela qual, segundo Santos (2009), esta liga é empregada quase que exclusivamente em estruturas rebitadas. Elas podem ser aplicadas, por exemplo, em componentes com elevada relação resistência/peso, sujeitos a temperaturas inferiores a 130°C, rodas forjadas de caminhões e para a indústria aeronáutica, fuselagem e componentes estruturais de aeronaves, ou até mesmo componentes de suspensão de automóveis.

As especificações 2017 (duralumínio) e 2024 (superduralumínio) são bastante conhecidas como materiais empregados em estruturas de aeronaves (SANTOS, 2009).

3.1.1.1.3 Série 3xxx

Ainda segundo Moreira (2015), o manganês é o principal elemento de liga. As ligas desta série não são tratáveis termicamente; entretanto, apresentam resistência 20% superior as ligas da série 1xxx. Devido à baixa solubilidade do Mn no Al (de até 1,8%), existem poucas ligas da série 3xxx. Três delas são largamente empregadas na indústria: 3003, 3004 e 3105.

As ligas desta série podem ser aplicadas, por exemplo, em componentes de resistência mecânica baixa que exijam elevada ductilidade, como latas de bebidas, utensílios de cozinha, trocadores de calor, tanques de armazenamento, sinalização rodoviária ou até mesmo em painéis decorativos e telhados usados na construção civil.

3.1.1.1.4 Série 4xxx

Moreira (2015) diz que o silício é o principal elemento de liga. A maioria das ligas desta série não são tratáveis termicamente. O Si pode ser adicionado para diminuir a temperatura de fusão sem provocar fragilidade excessiva; dessa forma, ligas Al-Si são utilizadas em arames de solda ou como ligas para brazagem de Al (soldagem de Al). A liga 4032 é empregada na fabricação de pistões forjados devido ao baixo coeficiente de expansão e a alta resistência ao desgaste.

Ligas contendo entre 4 e 7% de Si apresentam cores que variam do cinza ao negro após serem submetidas à anodização, e então são utilizadas em painéis decorativos para a construção civil. As ligas desta série podem ser aplicadas, por exemplo, em arquitetura e construção civil ou na produção de fios, arames e pós para brazagem.

3.1.1.1.5 Série 5xxx

O magnésio é o principal elemento de liga, é um dos elementos mais efetivos para endurecimento do Al. Quando utilizado como elemento principal ou em conjunto com o Mn, resulta em ligas não tratáveis com resistência de moderada a elevada. O Mg é considerado mais efetivo como endurecedor do que o Mn (0,8% de Mg exerce a mesma influência sobre a resistência que 1,25% de Mn) e, ainda, pode ser adicionado em quantidades elevadas (aproximadamente 15%). As ligas desta série apresentam boas características de soldagem e resistência à corrosão em atmosfera marinha.

Como exemplos da aplicabilidade das ligas desta série pode-se citar o uso em arquitetura e decoração, embalagens (tampas de latas em Al), suportes para iluminação pública, peças de barcos e navios, tanques para criogenia ou até mesmo componentes de guindastes e automotores (MOREIRA, 2015).

3.1.1.1.6 Série 6xxx

O magnésio e o silício são os principais elementos de liga. A proporção de Mg e Si visa à formação da fase Mg_2Si , formando ligas tratáveis termicamente. As ligas da série 6xxx apresentam boa ductilidade, boas características de soldagem e de usinagem e boa resistência à corrosão. Podem ser aplicadas, por exemplo, em arquitetura e decoração, quadros de bicicletas ou ainda estruturas soldadas (MOREIRA, 2015).

3.1.1.1.7 Série 7xxx

Para Moreira (2015), o zinco é o principal elemento de liga, adicionado em quantidades entre 1 e 8%. Adicionado em conjunto com Mg, resulta em ligas tratáveis termicamente com resistência mecânica elevada. Normalmente, Cu e Cr também são adicionados em pequenas quantidades. As ligas desta série podem ser aplicadas, por exemplo, em componentes da indústria aeronáutica como estruturas, peças móveis e componentes de alta resistência.

Ainda, de acordo com ABAL (2015), as ligas desta série são denominadas “Ligas de elevada resistência tratadas termicamente”, que são tão resistentes quanto o aço estrutural, mas necessitam de proteção superficial, sendo, conforme mencionado anteriormente, utilizadas na aviação – setor onde o fator de resistência/peso é fundamental. Assim como as ligas da série 6xxx, as ligas desta série apresentam boa usinabilidade.

3.1.1.1.8 Série 8xxx

As ligas desta série envolvem um grande número de composições, com uma miscelânea de elementos de liga. As ligas conformadas contendo Li (2,4% a 2,8%) foram desenvolvidas para uso aeroespacial e criogenia (MOREIRA, 2015).

3.1.1.2 Aplicações das ligas de alumínio

Segundo Diógenes, devido às excelentes combinações de propriedades que podem ser reunidas em ligas de alumínio, estas constituem um dos mais versáteis materiais que devem ser utilizados quando se fala em termos de engenharia, de arquitetura ou de indústrias em geral.

As ligas de alumínio possuem amplo campo de aplicação, sendo, portanto, desenvolvidas de forma particular para cada uma delas. Segundo Alcoa (2010), dentre as principais aplicações das ligas de alumínio, destacam-se:

- Construção civil;
- Esquadrias e revestimentos;
- Telhas;
- Estruturas;
- Transportes;
- Aeronáutica;
- Indústria Automotiva;
- Embarcações;
- Vagões;
- Indústria eletroeletrônica;
- Bens de consumo;
- Máquinas e equipamentos;
- Embalagens.

O alumínio é amplamente utilizado no mundo moderno devido à sua excelente performance e propriedades superiores na maioria das aplicações, pois suas técnicas de

fabricação permitem a manufatura do produto acabado a preços competitivos (ALCOA, 2010).

3.1.1.3 Liga de alumínio 2024

De acordo com Alcoa (2010), a liga 2024 é uma liga de alumínio para usinagens de alta resistência. Sua resistência típica à tensão em têmpera, T351 e T4, é igual ou superior a resistência de aços doces. A liga apresenta boas características de usinabilidade, capacidade de acabamento superficial e furação profunda. As têmperas T6 e T851 oferecem uma melhora na resistência e um aumento na resistência à corrosão por tensão, acima das têmperas T4 e T351.

A liga 2024 oferece boa usinabilidade quando usinada com ferramentas de carbeto em tornos monofuso ou multifuso. É recomendado o uso de quebra cavacos. A liga recebe classificação B segundo o sistema de classificação de usinabilidade da Associação do Alumínio, gerando cavacos curvos ou de fácil quebra, com acabamento superficial de bom a excelente (ALCOA, 2010).

As classificações A, B, C e D, são relativas à usinabilidade em ordem decrescente de mérito (NIVERMETAL, 2015, tradução nossa).

A resposta a anodização é classificada como moderada para essa liga, que aceita qualquer tipo de anodização (ALCOA, 2010).

O Quadro 3 apresenta características para os principais tipos de têmpera com os quais a liga 2024 é comercializada, incluindo os tipos mencionados.

Quadro 3 – Designações e definições de têmperas para a liga 2024

Têmpera-padrão	Definições de têmpera
T351	Solubilizada, trabalhada a frio e envelhecida naturalmente. Aplicada em produtos que são trabalhados a frio para melhorar a resistência, após tratamento térmico de solubilização, ou nos quais o efeito do encruamento, devido ao endireitamento, é levado em consideração ao serem fixados os limites para as propriedades mecânicas.
T4	Solubilizada e envelhecida naturalmente em condições substancialmente estáveis. Aplicado aos produtos que não sofrem deformação plástica, depois do tratamento térmico de solubilização, ou nos quais o efeito do encruamento, devido ao endireitamento, pode ser desprezado ao serem fixados os limites de propriedades mecânicas.
T6	Solubilizada e então envelhecida artificialmente. Aplicado aos produtos que não sofrem deformação plástica, depois do tratamento térmico de solubilização, ou nos quais o efeito do encruamento, devido ao endireitamento, pode ser desprezado ao serem fixados os limites de propriedades mecânicas.
T851	Solubilizada, trabalhada a frio e então envelhecida artificialmente. Aplicado aos produtos que sofrem deformação plástica a frio para aumentar a sua resistência mecânica, depois do tratamento térmico de solubilização, ou nos quais o efeito do encruamento, devido ao endireitamento, é levado em consideração ao serem fixados os limites para as propriedades mecânicas.

Fonte: (ALCOA, 2010).

O Quadro 4 apresenta, segundo Alcoa (2010), a análise química da liga 2024.

Quadro 4 – Análise química da liga 2024

Análise Química da Liga 2024			Temperatura <i>Líquidus</i> : 637°C			Temperatura <i>Sólidus</i> : 501°C			Densidade: 2,79 g/cm ³		
Porcentagem em Peso		Elementos									
	<u>Si</u>	<u>Fe</u>	<u>Cu</u>	<u>Mn</u>	<u>Mg</u>	<u>Cr</u>	<u>Zn</u>	<u>Ti</u>	<u>Outros Cada</u>	<u>Outros Total</u>	<u>Alumínio</u>
Mínimo	--	--	3.8	.30	1.2	--	--	--	--	--	
Máximo	.50	.50	4.9	.90	1.8	.10	.25	.15	.05	.15	Restante

Fonte: (ALCOA, 2010).

3.1.1.3.1 Aplicações da liga de alumínio 2024

A principal função das ligas de alumínio é aumentar a resistência mecânica sem prejudicar as outras propriedades. Assim, novas ligas têm sido desenvolvidas combinando as propriedades adequadas a aplicações específicas (ABAL, 2015).

Segundo Alcoa (2010), os altos níveis de propriedades mecânicas da liga 2024 fazem dessa liga ideal para aplicações que requerem alta resistência. Aplicações típicas incluem equipamentos e estruturas para aviação, componentes de computadores, engrenagens, eixos, pino de dobradiças, blocos e componentes de válvulas, porcas, parafusos, prendedores, componentes de freio e caminhões.

3.2 PROCESSO DE USINAGEM

A usinagem é o processo de fabricação mais popular do mundo e transforma em cavacos aproximadamente 10% da produção de metais, se considerarmos que o cavaco são lascas de material que são removidas, pode-se identificar a Idade da Pedra Lascada como origem da usinagem. É a transformação da matéria-prima em produto por meio dessa remoção de material na forma de cavacos que caracteriza o processo de usinagem (SANTOS; SALES, 2007).

Segundo Machado et al. (2011), a usinagem é definida como um processo de fabricação que produz cavaco, caracterizado por sua forma geométrica irregular, ao conferir forma, dimensões e acabamento à peça.

3.2.1 Movimentos na Usinagem

Os movimentos entre ferramenta e peça são aqueles que permitem a ocorrência do processo de usinagem. Por convenção, os movimentos sempre estarão ocorrendo supondo-se a peça parada e, portanto, todo o movimento sendo realizado pela ferramenta. Este procedimento permite padronizar sinais algébricos aos movimentos, sempre tendo como referência a peça. Além disso, facilita o estudo dos movimentos (DINIZ; MARCONDES; COPPINI, 2008).

De acordo com Diniz, Marcondes e Coppini (2008), os movimentos ativos são aqueles que promovem remoção de material; movimento de corte, movimento de avanço e movimento efetivo de corte. Os movimentos passivos são aqueles que são fundamentais para a realização do processo de usinagem, mas não promovem remoção de material; movimento de ajuste, movimento de correção, movimento de aproximação e movimento de recuo.

Para um melhor entendimento sobre ângulos e ferramentas de corte, forças de corte e condições de usinagem, são explicados conceitos sobre os diferentes movimentos existentes na usinagem, e de algumas relações geométricas comuns na usinagem. Para isso é necessário entender o ponto de referência, que é um ponto genérico da aresta de corte (FERRARESI, 1982).

Os movimentos mais importantes são descritos segundo Ferraresi (1982) e conforme segue abaixo:

- Movimento de corte: movimento entre a peça e a ferramenta, do qual resulta de um movimento de avanço, uma única remoção de cavaco;
- Movimento de avanço: movimento entre a peça e a ferramenta que, associado ao movimento de corte resulta na remoção repetitiva de cavaco, durante um determinado número de revoluções.
- Movimento efetivo de corte: movimento resultante da realização simultânea dos movimentos de corte e de avanço.

Ainda segundo Ferraresi (1982), alguns movimentos que não estão diretamente ligados à formação do cavaco, podem ser entendidos através da nomenclatura que recebem. Por exemplo, os movimentos de posicionamento e de profundidade.

Vários parâmetros podem influenciar o desempenho dos processos de usinagem, tendo em vista as variáveis de saída, como as propriedades do material usinado, o material da ferramenta de corte, a geometria da aresta de corte, as condições de corte etc. Como parâmetros de saída e avaliadores do desempenho do processo, podem-se listar o tempo de vida da aresta de corte, o tipo de cavaco, a textura superficial, a taxa de remoção de material, a força ou a potência de usinagem, e a formação da aresta postiça de corte (MACHADO et al., 2011).

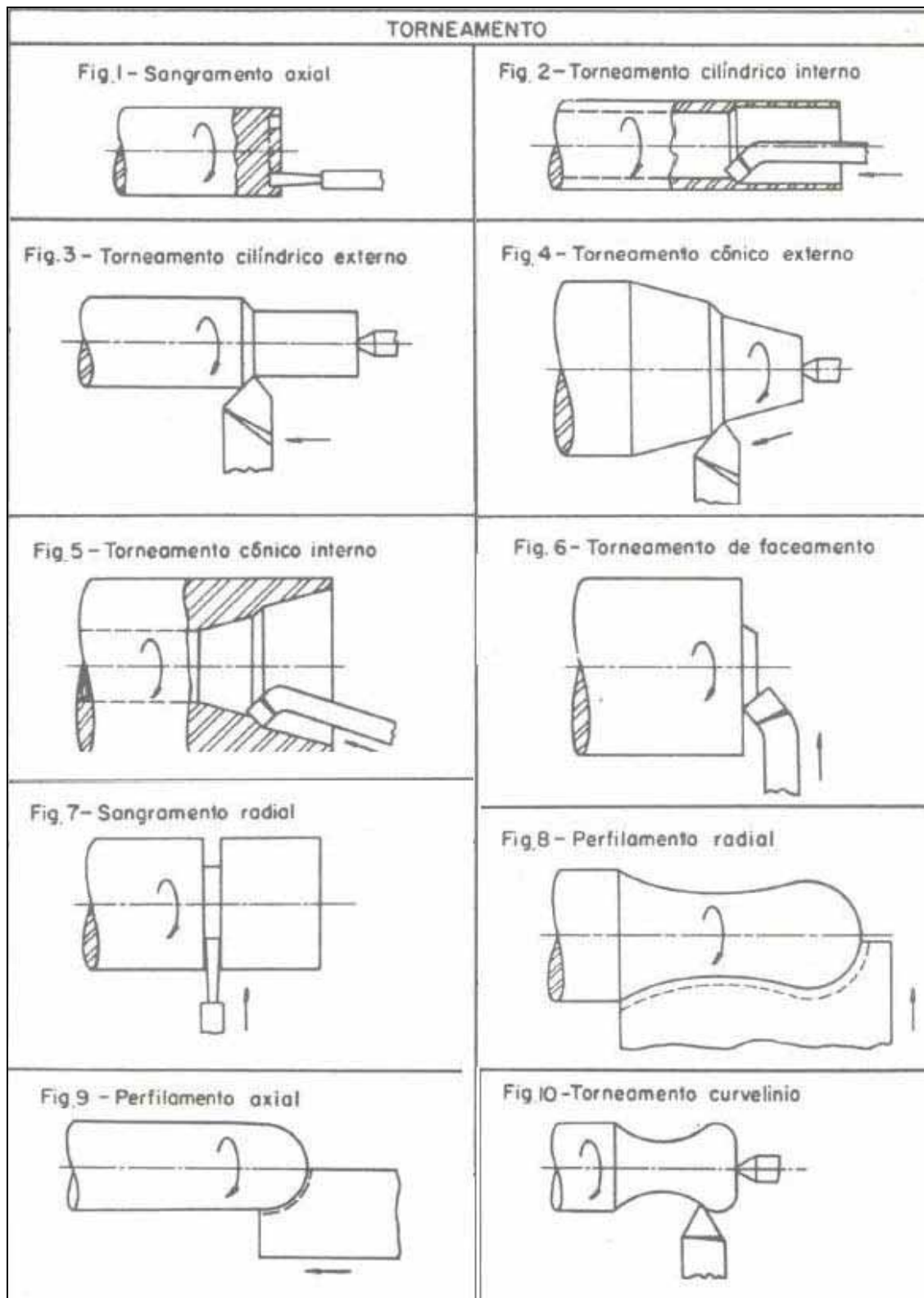
3.2.2 Torneamento

Ferraresi (1982) define o torneamento como um processo mecânico de usinagem, destinado à obtenção de superfícies de revolução com auxílio de uma ou mais ferramentas monocortantes. Para tanto, a peça gira em torno do eixo principal de rotação da máquina e a ferramenta se desloca simultaneamente segundo uma trajetória coplanar com o referido eixo. Quanto à forma da trajetória, o torneamento pode ser retilíneo ou curvilíneo.

Já Machado et al. (2011) dizem que o torneamento é um processo convencional de usinagem em que ocorre remoção de material denominado cavaco, por cisalhamento, utilizando uma ou mais ferramentas com uma única aresta de corte e geometria definida. Esse processo tem como finalidade o desbaste ou o acabamento, determinados pela potência da máquina-ferramenta, e visa obter superfícies de revolução. O movimento de rotação da peça em torno do eixo principal de rotação da máquina, denominado movimento de corte, é simultâneo ao movimento de avanço longitudinal e/ou transversal realizado pela ferramenta, ou seja, para obtenção da superfície desejada deve-se providenciar um movimento relativo apropriado entre a peça e a ferramenta adequada. A combinação dos movimentos de corte e de avanço resulta no chamado movimento efetivo.

Na Figura 2 são apresentados os tipos de torneamento (FERRARESI, 1982).

Figura 2 – Processos de torneamento

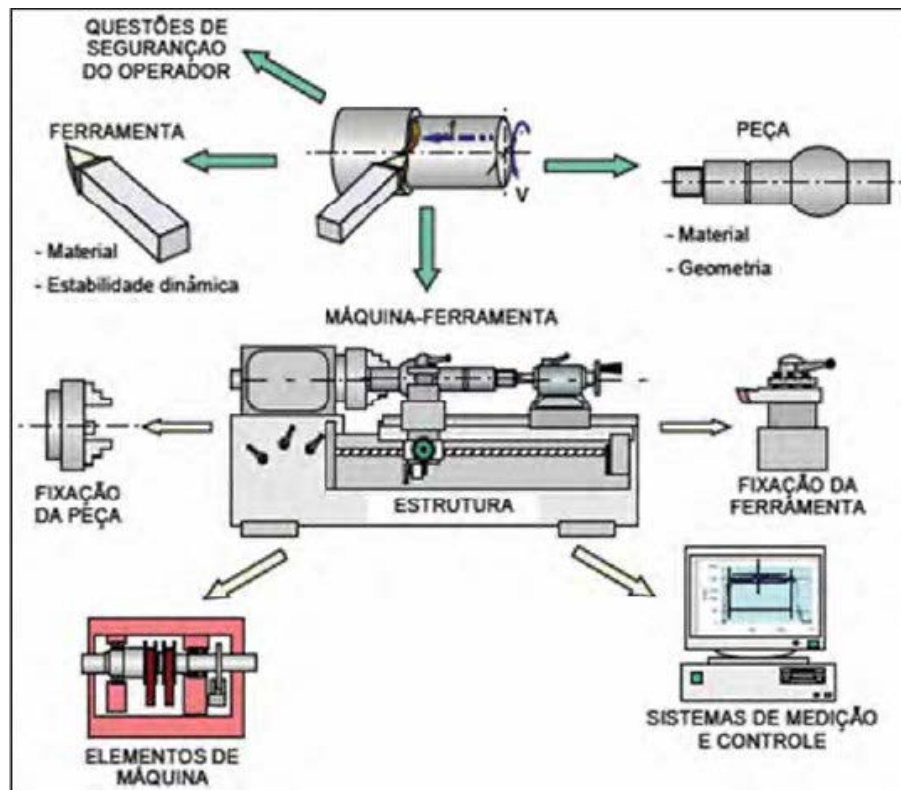


Fonte: (FERRARESI, 1982).

As direções de corte e de avanço estão contidas no Plano de Trabalho. Ou seja, todos os movimentos que fazem parte da formação do cavaco (FERRARESI, 1982).

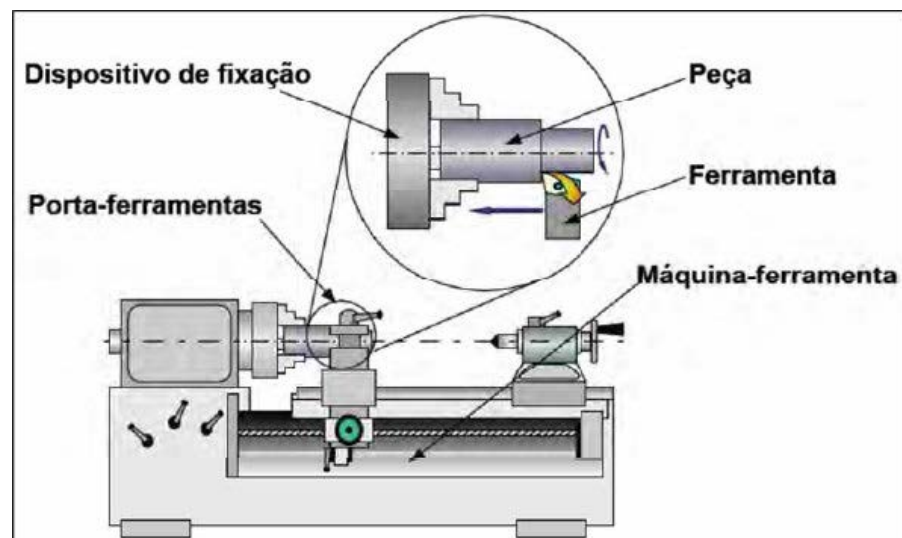
Durante o torneamento diversos fatores que atuam como limitantes do processo devem ser levados em consideração, bem como certas grandezas. A Figura 3 destaca os fatores limitantes e a Figura 4, as grandezas relevantes ao processo de usinagem por torneamento (STOETERAU, 2007).

Figura 3 – Limitantes do processo de usinagem por torneamento



Fonte: (STOETERAU, 2007).

Figura 4 – Grandezas relevantes ao processo de usinagem por torneamento



Fonte: (STOETERAU, 2007).

Onde:

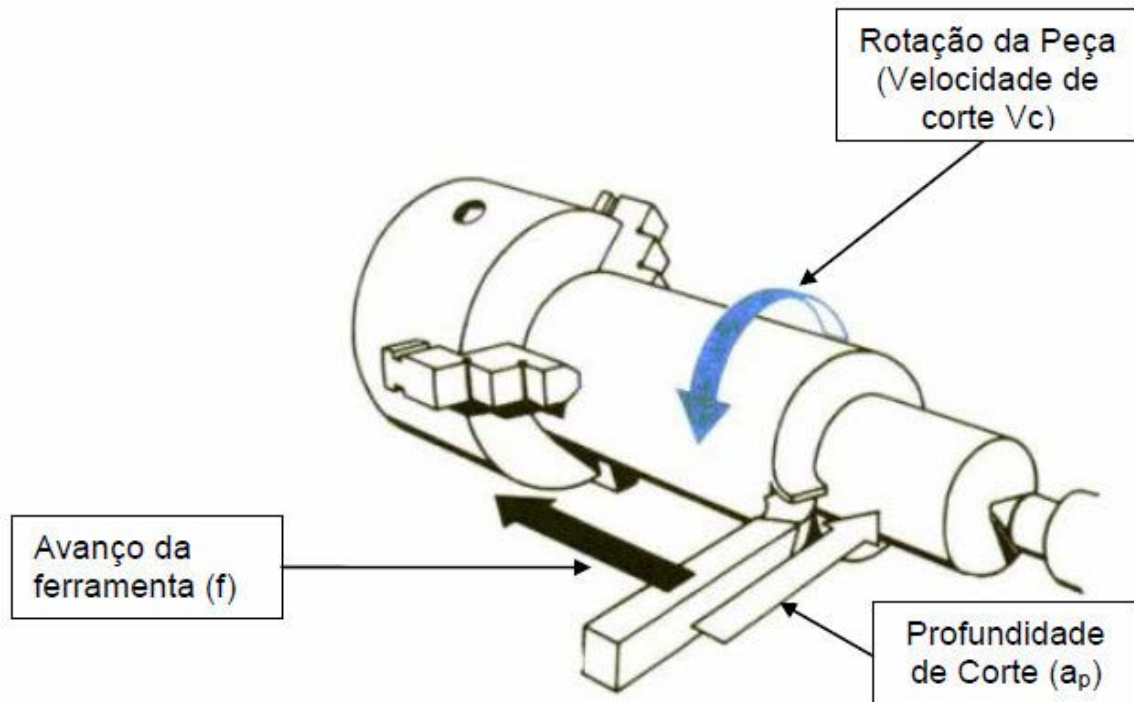
- Peça: tudo aquilo que irá sofrer uma operação de usinagem;
- Dispositivo de fixação: local onde será fixada a peça;
- Ferramenta: tudo o que realiza uma operação de usinagem;
- Porta-ferramenta: dispositivo destinado a fixar a ferramenta;
- Máquina-ferramenta: elemento que proporciona os movimentos, velocidade, avanço e força necessários ao processo de usinagem.

3.2.2.1 Torno CNC

Máquinas e ferramentas comandadas pelo computador são denominadas CNC e possibilitam a fabricação de peças de geometrias complexas com melhor precisão e acabamento. As máquinas CNC também possibilitam a fabricação de peças com as mesmas características e a redução da mão de obra. No entanto são necessários altos investimentos em maquinário e capacitação de profissionais para a utilização efetiva da nova tecnologia a disposição, o que causa o desligamento da mão de obra não especializada (COSTA, 2006).

O CNC é um equipamento eletrônico capaz de receber informações por meio de entrada própria, compilar essas informações e transmiti-las à máquina-ferramenta, que, sem a intervenção do operador, realiza as operações na sequência programada. Os tornos CNC, diferentes dos tornos convencionais, não necessitam de acessórios (gabaritos, cames, limites etc) nem da interferência direta do operador para controlar os seus movimentos. Por isso, a garantia de uniformidade e qualidade de peça para peça e de lote para lote são maiores. A Figura 5 mostra as representações dos movimentos do processo de torneamento (SOUZA, 2011).

Figura 5 – Representação dos movimentos no processo de torneamento



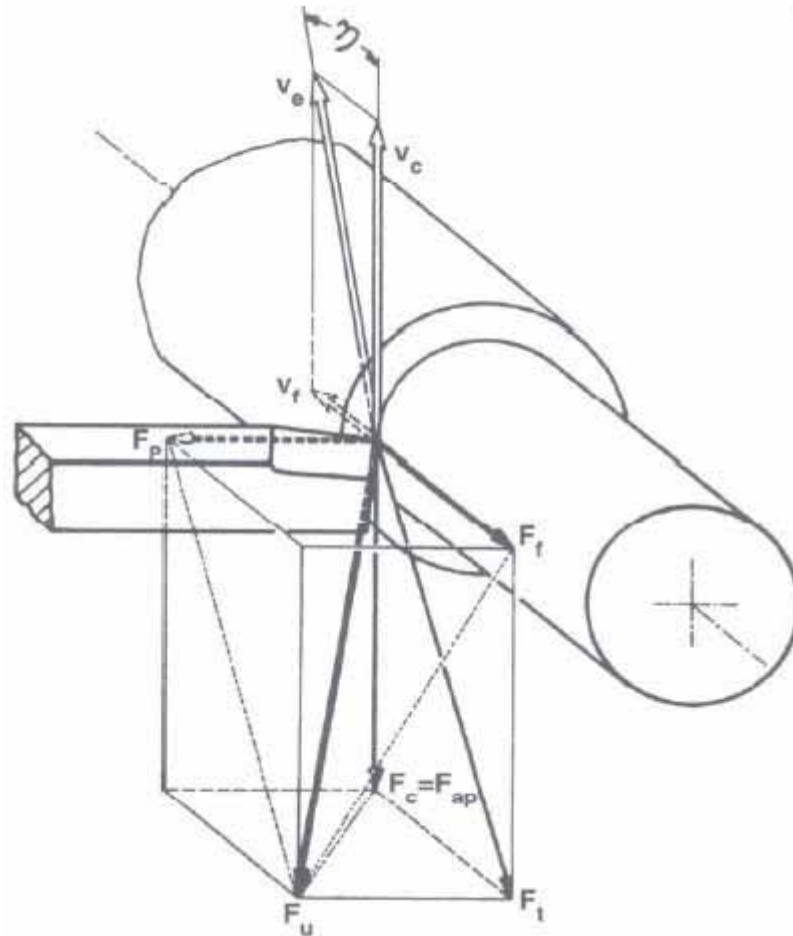
Fonte: (SOUZA, 2011).

3.2.3 Potência

Segundo Machado et al. (2011), o conhecimento da força de usinagem que age sobre a cunha cortante e o estudo de seus componentes são de grande importância, porque possibilitam estimar a potência necessária para o corte, bem como as forças atuantes nos elementos da máquina-ferramenta, além de manter relação com o desgaste das ferramentas de corte, influenciando a viabilidade econômica do processo.

Na Figura 6 são demonstradas, segundo Diniz, Coppini e Marcondes (2008), algumas forças derivadas da força de usinagem.

Figura 6 – Forças de usinagem em um torneamento e suas componentes



Fonte: (DINIZ; COPPINI; MARCONDES, 2008).

Sendo:

- Força ativa (F_t): consiste na componente da força de usinagem no plano de trabalho, contribui para a potência de usinagem, devido ao fato de estar localizada junto ao plano de trabalho;
- Força de corte (F_c): se localiza no plano de trabalho e consiste na projeção da força de usinagem sobre a direção de corte;
- Força de avanço (F_f): Se localiza no plano de trabalho e consiste na projeção da força de usinagem sobre a direção de avanço;
- Força de apoio (F_{ap}): se localiza no plano de trabalho e consiste na projeção da força de usinagem sobre a direção perpendicular à direção de avanço;
- Força passiva ou de profundidade (F_p): se localiza no plano perpendicular ao plano de trabalho e consiste na componente da força de usinagem neste plano.

Devido à sua localização perpendicular ao plano de usinagem, a força de profundidade não contribui para a potência de usinagem e é a responsável pela deflexão elástica da peça e da ferramenta durante o corte, consequentemente é também responsável pela dificuldade de obtenção de tolerâncias de forma e de dimensão de pequenos valores.

Excepcionalmente, na operação de torneamento, a força de corte é igual à força de apoio, o mesmo não acontece em outras operações de usinagem (DINIZ; COPPINI; MARCONDES, 2008).

Alguns fatores influenciam na pressão específica de corte, são eles: material da peça, material e geometria da ferramenta, seção de corte, velocidade de corte, condições de lubrificação e refrigeração e estado de afiação da ferramenta. Alguns fatores influenciam na força de avanço e na de profundidade, tais como: raio de ponta da ferramenta, ângulo de posição e ângulo de inclinação. À medida que o raio da ponta da ferramenta aumenta, existe um aumento considerável na força de profundidade e, consequentemente, um decréscimo na força de avanço (DINIZ; COPPINI; MARCONDES, 2008).

3.2.4 Velocidade de Corte

Segundo Diógenes (2011), tem-se as seguintes grandezas para a velocidade de corte:

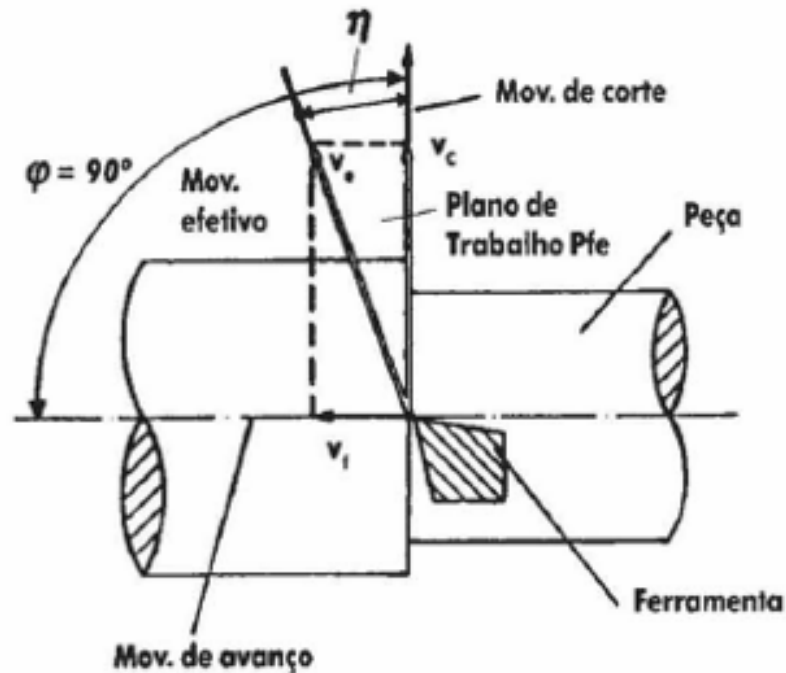
- Velocidade de corte: v_c (cutting);
- Velocidade de avanço: v_f (feed);
- Velocidade efetiva: v_e (effective).

Dessa forma:

$$v_e = (v_f^2 + v_c^2)^{1/2}$$

Na Figura 7 estão esquematizadas as velocidades envolvidas no processo de torneamento.

Figura 7 – Velocidade de corte v_c , de avanço v_f e efetiva v_e no torneamento



Fonte: (DIÓGENES, 2011).

Onde φ (direção de avanço) é o ângulo formado entre a direção de corte e a direção de avanço. Para torneamento longitudinal e furação, esse ângulo é constante de igual a 90° .

Ainda segundo Diógenes (2011), a velocidade de corte para todos os processos de usinagem com ferramenta ou peça rotativa é calculada por:

$$v_c = \pi \cdot d_m \cdot n$$

A velocidade de avanço é calculada por:

$$v_f = z \cdot f_z \cdot n$$

Onde:

- d_m : diâmetro médio correspondente à camada de corte;
- n : rotação;
- z : número de arestas cortantes;
- f_z : avanço por aresta cortante.

3.2.5 Avanço

De acordo com Diógenes (2011), o avanço é o movimento da ferramenta por volta ou curso, medido no plano de trabalho, na direção de avanço. Quando a ferramenta tem mais do que uma aresta cortante, o avanço é calculado por:

$$f = f_z \cdot z$$

Onde:

- f_z : avanço por aresta;
- z : número de arestas.

3.2.6 Acabamento superficial

Sabe-se que as características do produto são influenciadas pela rugosidade. Um exemplo clássico sobre essas influências é a vida em fadiga dos materiais, a resistência à fadiga diminui quando o material apresenta maiores níveis de rugosidade (PALMA, 2011).

De acordo com Callister (2007), durante as operações de usinagem, pequenos arranhões e ranhuras são invariavelmente introduzidos na superfície da peça por ação de corte da ferramenta. Estas marcações de superfície podem limitar a vida em fadiga. Foi observado que a melhoria do acabamento de superfície por polimento melhora a vida em fadiga significativamente.

Dentre os fatores que influenciam na rugosidade superficial das peças, destacam-se a geometria da ferramenta de corte, o avanço, a deformação plástica do material processado e a vibração da ferramenta de corte. Assim, para redução nas irregularidades superficiais, é necessário reduzir o avanço e trabalhar com pequenos ângulos de inclinação para a ferramenta de corte – as quais devem ter as pontas arredondadas (LOPES, 2006).

3.2.6.1 Rugosidade média (R_a)

Segundo Diógenes (2011), rugosidade média (R_a) é a média aritmética dos valores absolutos das ordenadas dos afastamentos dos pontos do perfil de rugosidade, em relação à linha média, dentro do percurso de medição.

3.2.6.2 Rugosidade máxima (R_{max}) e total (R_y)

Segundo Diógenes (2011), rugosidade máxima (R_{max}) é o maior valor das rugosidades parciais que se apresenta no percurso de medição.

A norma DIN 4762 (1984) indica um parâmetro semelhante ao R_{max} para a medição de rugosidade superficial na Alemanha e é designada por R_y . R_y é a máxima distância pico-vale, dentro do comprimento de avaliação.

3.2.7 Comprimento de corte

O comprimento de corte pode ser definido como o comprimento de cavaco a ser retirado, medido na superfície de corte, segunda a direção normal à direção de corte (DIÓGENES, 2011).

3.2.7.1 Cavaco

Em todos os processos de usinagem com ferramentas de corte, tem-se a presença dos cavacos em função da remoção de material. A partir deste fato é possível, de maneira visual e apalpável, identificar a conformidade do processo, pois o cavaco pode ser considerado um meio de comunicação entre a máquina-ferramenta e o operador responsável pelo processo, ou seja, em um lote de produção pode-se determinar logo no início da fabricação se as condições de usinagem estão adequadas a partir do cavaco resultante ou no meio da cadeia produtiva

pode-se identificar o momento de troca da aresta cortante de uma ferramenta, quando a mesma for cambiável (OLIVEIRA, 2011).

Nas usinagens em torno CNC, o cavaco é um aliado da produtividade, qualidade, segurança e desempenho. Porque possui uma relação direta entre a peça e a ferramenta, de modo que a escolha adequada da ferramenta, a escolha do fluido de corte, a velocidade e a profundidade de corte aliados ao cavaco, podem reduzir drasticamente o tempo de usinagem, o custo de produção e aumentar consideravelmente a lucratividade (OLIVEIRA, 2011).

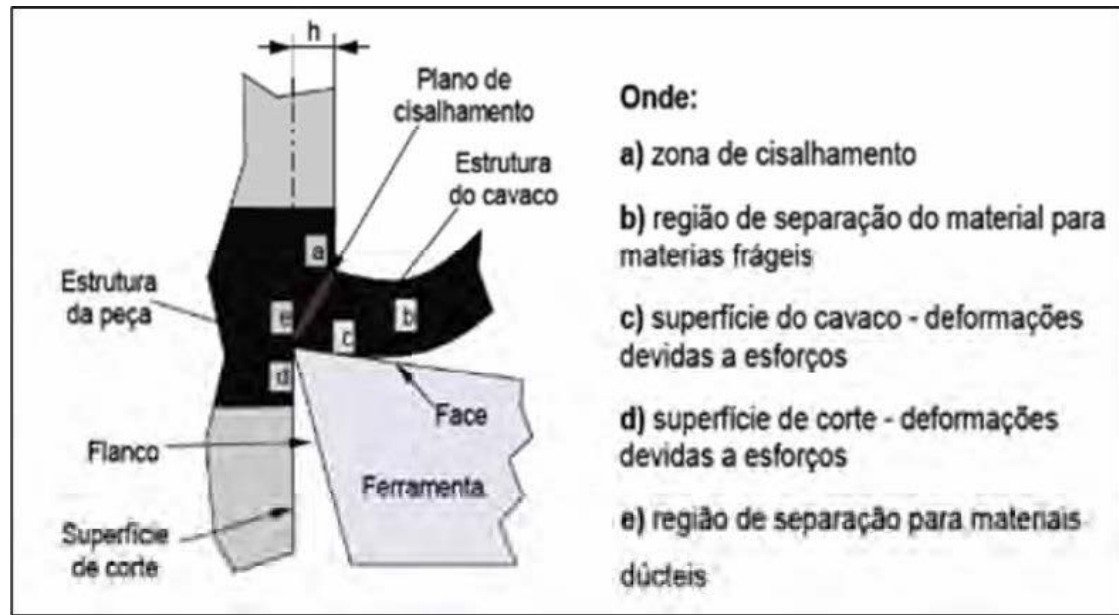
A aplicação de métodos e cuidados que compõem o controle na forma do cavaco é feita levando em consideração alguns fatores: segurança do operador, possível dano à ferramenta e à peça, manuseio e armazenagem do cavaco, forças de corte, temperatura e vida da ferramenta. Para materiais mais frágeis o cavaco se lasca com maior frequência e, portanto, tem a forma mais curta. Já materiais mais dúcteis formam cavacos contínuos, apresentando riscos ao operador e desvantagens em relação ao tempo de produção (DINIZ; COPPINI; MARCONDES, 2008).

No corte dos materiais é envolvido cisalhamento concentrado ao longo do plano de cisalhamento, que consiste na zona primária de cisalhamento. O ângulo entre o plano de cisalhamento e a direção de corte é denominado ângulo de cisalhamento, quanto maior a deformação do cavaco, maior será o esforço de corte e menor o ângulo de cisalhamento, essa característica é melhor apresentável em materiais dúcteis que são materiais susceptíveis a deformação (DINIZ; COPPINI; MARCONDES, 2008).

Quando o cavaco se forma é visível a rugosidade do mesmo, visto que a deformação não é homogênea devido ao fato de existirem pontos de baixa resistência ou de concentração de tensão. O mecanismo de formação do cavaco é periódico, a deformação plástica aumenta progressivamente até que haja ruptura por cisalhamento seguido de escorregamento da porção deformada de material, enquanto isso o ciclo inicia-se novamente na superfície subsequente do material usinado. Nos materiais dúcteis a região de deformação plástica é maior, enquanto nos materiais frágeis essa região é pequena, resultando em ruptura total do cavaco que salta fora da região de corte, não havendo atrito com a superfície de saída da ferramenta (DINIZ; COPPINI; MARCONDES, 2008).

A Figura 8 esquematiza regiões de formação do cavaco durante a operação de torneamento.

Figura 8 – Regiões da formação do cavaco



Fonte: (OLIVEIRA, 2011).

Morfologicamente, os cavacos podem ser: contínuos, descontínuos ou segmentados. Quanto à sua forma podem ser classificados em: em fita, helicoidais, em espiral, em lascas ou pedaços. Entretanto, a norma ISO 3685 (1993) classificou-os mais detalhadamente, conforme Figura 9 (MACHADO et al., 2011).

Figura 9 – Formas de cavacos produzidos na usinagem dos metais

1- Cavaco em fita	2- Cavaco tubular	3- Cavaco espiral	4- Cavaco hel. tipo arruela	5- Cavaco hel. cônico	6- Cavaco em arco	7- Cavaco fragmentado	8- Cavaco tipo agulha
1-1- Longo	2-1- Longo	3-1- Plano	4-1- Longo	5-1- Longo	6-1- Conect.		
1-2- Curto	2-2- Curto	3-2- Cônico	4-2- Curto	5-2- Curto	6-2- Solto		
1-3- Emaranhado	2-3-Emaranhado		4-3-Emaranhado	5-3-Emaranhado			

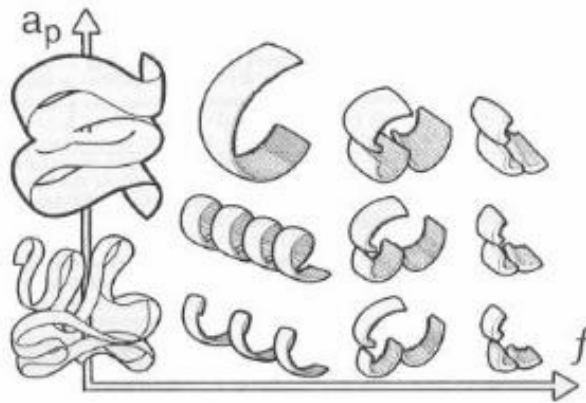
Fonte: (ISO 3685, 1993).

O material da peça é o que mais influencia a forma e o tipo do cavaco. Um aumento na velocidade de corte, uma redução no avanço ou um aumento no ângulo de saída tendem a

produzir cavacos em fitas (contínuos). O avanço é o parâmetro mais influente, seguida da profundidade de corte, a afetar a forma do cavaco (MACHADO et al., 2011).

O efeito do avanço e da profundidade de corte na forma dos cavacos pode ser visto na Figura 10.

Figura 10 – Efeito do avanço e da profundidade de corte na forma dos cavacos



Fonte: (MACHADO et al., 2011).

De acordo com Oliveira (2011), os tipos de cavaco e suas respectivas favorabilidades ao processo de usinagem estão exemplificados a seguir:

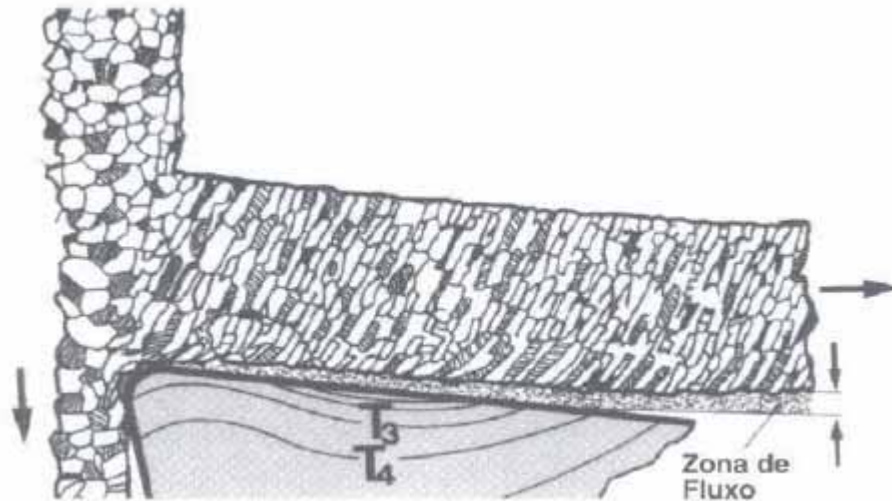
- Cavacos helicoidais: considerado o tipo mais apropriado de cavaco. A formação ocorre sempre em altas velocidades de corte, caracterizando alta remoção de material.
- Cavaco tipo espiral: também considerados um tipo de cavaco favorável, ocorre principalmente quando existe a presença de quebra-cavaco na ferramenta de corte.
- Cavaco tipo fita: de forma geral, a formação desse tipo de cavaco pode ser considerada a mais problemática, pois além de apresentar aresta de corte bastante afiada, apresenta certa tendência a causar paradas no processo produtivo, enrolando-se na peça, na ferramenta ou na placa do torno e em alguns casos a formação desse tipo de cavaco pode causar a quebra da ferramenta de corte.
- Cavaco em lascas/pedaços: ocorre devido irregularidades no material, ângulo efetivo de corte pequeno, velocidades de corte pequenas, altas profundidades de corte, sendo preferível quando se dispõe de pouco espaço para a realização da operação de torneamento.

3.2.8 Interface cavaco-ferramenta

Segundo Machado (2009), a teoria de Trent diz que na interface cavaco-superfície de saída de ferramenta existe uma zona de aderência e, logo após, uma zona de escorregamento entre o cavaco e a ferramenta.

Ao usinar um material que forma cavaco contínuo utilizando ferramenta de metal duro ou aço rápido, o movimento do cavaco na zona de aderência ocorre por cisalhamento do material. Muito próximo à interface é formada uma zona de cisalhamento intenso, também conhecida como zona de fluxo, demonstrada na Figura 11. Nessa zona existe uma camada de material estacionário na interface cavaco-ferramenta e a velocidade de saída do cavaco aumenta à medida que a espessura é percorrida, até que se atinja o limite final da zona de fluxo, onde não há mais cisalhamento e a velocidade de saída do cavaco se estabiliza e fica constante (DINIZ; COPPINI; MARCONDES, 2008).

Figura 11 – Zona de fluxo dentro do cavaco



Fonte: (DINIZ; COPPINI; MARCONDES, 2008).

O par ferramenta-peça define as condições na interface, escorregamento ou aderência. Altas velocidades de corte, longos tempos de usinagem e pequenas diferenças entre o material da peça e o da ferramenta favorecem as condições de aderência. Pequenos ângulos de saída na ferramenta aumentam a zona de contato da superfície de saída da ferramenta com o cavaco e

desfavorecem, de modo a aumentar a zona de aderência, aumentando consequentemente as forças de usinagem e a temperatura de corte (FREIRE DE SOUZA, 2012).

3.2.9 Usinabilidade

Segundo Diniz, Marcondes e Coppini (2008), a usinabilidade pode ser definida como o grau de dificuldade em se usinar determinado material, tornando-se relativa quando se fala de uma ou de outra característica tomada como parâmetro para o material trabalhado. Dessa forma, um material pode ter usinabilidade baixa em certas condições e alta em outras condições de usinagem.

O grau de usinabilidade é medido a partir de grandezas mensuráveis inerentes ao processo, como a vida da ferramenta, o acabamento superficial da peça, os esforços de corte, a temperatura de corte, a produtividade, as características do cavaco ou até mesmo a abrasividade (STOETERAU, 2007).

De acordo com Diniz, Marcondes e Coppini (2008), método mais aceito para mensurar a usinabilidade consiste no acompanhamento da usinagem do material a ser analisado comparado à usinagem de um material padrão. A usinagem deve ocorrer até o fim da vida da ferramenta ou até um determinado valor de desgaste da mesma.

As ligas de alumínio apresentam, em geral, boa usinabilidade. Entretanto, com relação aos critérios de usinabilidade baseados na rugosidade da peça e na característica do cavaco, não se pode dizer que o alumínio tenha alta usinabilidade, pois em condições normais de usinagem, o acabamento superficial não é satisfatório e o cavaco é alongado. Para que o acabamento superficial seja bom, deve-se utilizar altas velocidades de corte e estar atento quanto à geometria da ferramenta (DINIZ; MARCONDES; COPPINI, 2008).

Ainda de acordo com Diniz, Marcondes e Coppini (2008), a variação de impurezas, processos de fundição e tratamentos aplicados ao metal são outros fatores que podem influenciar positiva ou negativamente a usinagem das ligas de alumínio.

Conforme Quadro 5, os elementos de liga podem ser divididos em grupos, cada grupo exerce influência a seu modo na usinabilidade do alumínio (DINIZ; MARCONDES; COPPINI, 2008).

Quadro 5 – Elementos de liga e suas influências na usinabilidade do alumínio

Elementos de liga	Influência na usinabilidade
Sn, Bi e Pb	Atuam como lubrificantes e como fragilizadores do cavaco.
Fe, Mn, Cr e Ni	Combinam entre si ou com o alumínio e/ou para formarem partículas duras, que favorecem a quebra do cavaco e que, em grande quantidade, tem efeito abrasivo sobre a ferramenta.
Mg	Em teores pequenos (cerca de 0,3%) aumenta a dureza do cavaco e diminui o coeficiente de atrito entre cavaco e ferramenta.
Si	Aumenta a abrasividade da peça, a vida da ferramenta diminui com o aumento do tamanho da fase primária do silício.
Cu	Forma o intermetálico CuAl, que fragiliza o cavaco.
Zn	Não exerce influência na usinabilidade.

Fonte: (DINIZ; MARCONDES; COPPINI, 2008).

3.2.10 Lubrificação

A não utilização de lubrificantes na unidade de corte de uma máquina ferramenta tem inúmeras vantagens e desvantagens, suas principais vantagens são o aumento na eficiência e a redução de custos. Além disso, as condições ambientais da empresa e a qualidade do local de trabalho melhoram ao longo do tempo (GONÇALVES DOS SANTOS, 2012).

Para diminuir os efeitos dos períodos improdutivos causados pelos desgastes ferramentais pode-se introduzir um sistema de lubrificação e refrigeração eficientes ao processo. No entanto, nos últimos anos, as pesquisas restringiram ao máximo o uso de fluidos refrigerantes e lubrificantes na produção metal mecânica em detrimento dos custos operacionais da produção, dos fatores ecológicos, das exigências legais de conservação do meio ambiente e da preservação da saúde do ser humano (GONÇALVES DOS SANTOS, 2012).

3.2.11 Ferramentas de Corte

Deve-se utilizar um material mais duro para a ferramenta com relação ao material da peça a ser usinada, ou seja, a ferramenta deve apresentar uma dureza relativa maior do que a da peça. A obtenção de bons resultados no desenvolvimento de ferramentas ocorre quando é encontrado um balanço entre a tenacidade e a dureza do material, esse balanço é obtido através de diferentes composições químicas, controle nos processos de fabricação, tratamento térmico e tamanho de grãos (DINIZ; MARCONDES; COPPINI, 2008).

Segundo Mehrotra (1998), os materiais de corte mais comuns na usinagem de ligas metálicas, classificados pela resistência à deformação térmica e pela tenacidade à fratura.

O que mais influencia a temperatura durante a usinagem é a velocidade de corte, portanto quanto maior a velocidade de corte empregada, maior deverá ser a resistência à deformação a quente do material da ferramenta. Conforme aumentam as solicitações mecânicas à ferramenta, deve crescer a resistência à fratura do material da ferramenta (SHAW, 1994).

As ferramentas para corte de alumínio possuem aresta afiada, ou seja, aresta sem raio com ângulos bastante positivos, conforme a Figura 12, para evitar a formação da aresta postiça de corte e garantir um cisalhamento perfeito do cavaco (DINIZ; MARCONDES; COPPINI, 2008).

Figura 12 – Pastilha para torneamento de ligas de alumínio



Fonte: (o autor).

O material de ferramenta típico para usinagem de ligas de alumínio é o metal duro classe K sem cobertura. A classe K é recomendada, pois as temperaturas de corte são baixas e, por isso, a formação do desgaste de cratera via processo difusivo não é um problema. Por outro lado, metais duros à base de carboneto de titânio (classe P) são inadequados para a usinagem de alumínio, devido à grande afinidade físico-química entre o alumínio e o titânio. A ferramenta é sem cobertura, pois não se necessita grande resistência ao desgaste e, por outro lado, é necessário que a aresta seja bastante afiada, o que é difícil de ser obtido com espessas camadas de cobertura (DINIZ; MARCONDES; COPPINI, 2008).

Para Diniz, Marcondes e Coppini (2008), quando ferramentas de diamantes são usadas, a velocidade de corte pode ser muito alta, com valores normalmente limitados pela máquina-ferramenta e não pelo desgaste.

3.2.11.1 Geometria da cunha cortante

Entender os ângulos da ferramenta de corte e os ângulos efetivos (de trabalho) é necessário para compreender melhor o processo de torneamento. Foram realizadas diversas pesquisas e em consequência do desenvolvimento desses estudos ao longo dos anos, em 1966 foi aprovado o projeto DIN 6581, denominado “Geometria na cunha cortante das ferramentas”. Essa norma distingue os ângulos da ferramenta dos ângulos efetivos (FERRARESI, 1982).

Os ângulos da ferramenta são simplesmente obtidos medindo-se a ferramenta, não variam com a mudança de posição da ferramenta, independem das condições de usinagem e interessam à execução e manutenção da ferramenta. Enquanto os ângulos efetivos se referem à ferramenta em operação e são de grande importância na operação de corte (DINIZ; COPPINI; MARCONDES, 2008).

Segundo Ferraresi (1982), os conceitos de superfície de folga, superfície de saída, aresta principal de corte, aresta lateral de corte e de pontas de corte são explicitados a seguir:

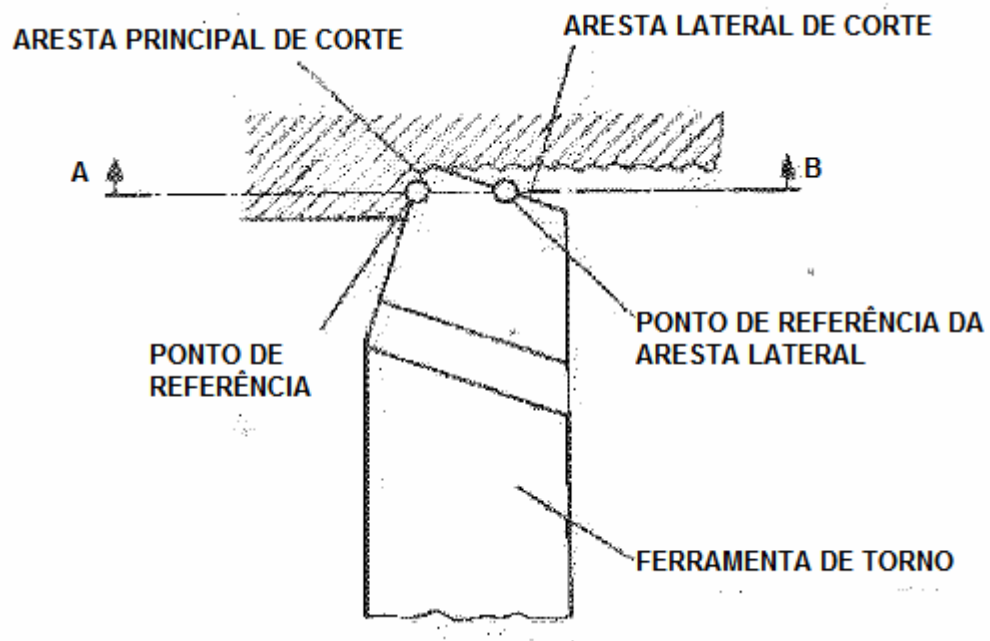
- Superfície de folga (incidência): é a superfície da cunha cortante da ferramenta que se defronta com a superfície de corte. Essa superfície pode apresentar um chanfro junto à aresta de corte;

- Superfície de saída: é a superfície da cunha cortante sobre a qual o cavaco se forma, também pode apresentar um chanfro;
- Aresta principal de corte: é a aresta de corte na qual a cunha de corte correspondente indica qual é a direção de avanço no plano de trabalho;
- Aresta lateral de corte: é a aresta de corte na qual a cunha de corte correspondente não indica a direção de avanço no plano de trabalho;
- Ponta de corte: é a ponta na qual acontece o encontro da aresta principal de corte e a aresta lateral de corte de igual superfície de saída. Pode-se fazer um arredondamento ou um chanframento na ponta de corte, dependendo da aplicação.

Ainda de acordo com Ferraresi (1982), no torneamento existem alguns planos de referência que são estudados e determinados de modo a facilitar o entendimento, são eles: plano efetivo de referência, plano de referência da ferramenta, plano de corte, plano de medida, plano de trabalho no sistema efetivo de referência e o plano de trabalho no sistema de referência da ferramenta.

A Figura 13 demonstra os pontos de referência das arestas de corte de uma ferramenta de torneamento (FERRARESI, 1982).

Figura 13 – Pontos de referência das arestas de corte de uma ferramenta de torno.



Fonte: (FERRARESI, 1982).

Para ampliar o entendimento, são mostrados aspectos gerais dos ângulos na cunha cortante, que determinam a posição e a forma da cunha de corte. Existem alguns ângulos na parte de corte no sistema de referência da ferramenta, são chamados de ângulos da ferramenta e se referem ao ponto de corte escolhido. Existem alguns ângulos principais, tais como: ângulo de posição da ferramenta, ângulo de posição da aresta secundária da ferramenta, ângulo de ponta da ferramenta, ângulo de inclinação da ferramenta, ângulo de saída da ferramenta, ângulo de cunha da ferramenta e ângulo de folga da ferramenta. Outros ângulos se relacionam com a parte de corte no sistema de referência da ferramenta, que são os ângulos do sistema efetivo de referência, tais como: ângulo de posição efetivo, ângulo de inclinação efetivo, ângulo de saída efetivo, ângulo de cunha efetivo e ângulo de folga efetivo (FERRARESI, 1982).

3.2.12 Desgaste e Avaria

Segundo Machado et al. (2011), por maior que seja a dureza e a resistência ao desgaste das ferramentas de corte, e por menor que seja a resistência mecânica da peça de trabalho, a ferramenta de corte sofrerá um processo de desgaste que mais cedo ou mais tarde exigirá sua substituição. Embora os custos com ferramentas de corte representem apenas uma pequena fração do custo de fabricação, desgastes acelerados e/ou avarias frequentes levem a paradas da máquina para a troca, e isso significa custos adicionais e perda de produtividade. O desgaste e a avaria, geralmente, promovem a perda de material, enquanto a deformação plástica promove somente o seu deslocamento.

Machado et al. (2011) dizem que em um processo de usinagem existem duas causas para a substituição da ferramenta de corte, encerrando a sua vida: a avaria (trinca, lascamento ou quebra) e o desgaste (ou deformação), que pode ser de cratera, de flanco ou de entalhe.

A partir do Quadro 6 pode-se familiarizar com as principais causas e ações utilizadas para minimizar as avarias e os desgastes das ferramentas de corte.

Quadro 6 – Causas e ações para minimizar avarias e desgastes da ferramenta

Tipo de desgaste e/ou avaria	Possíveis causas	Ações para minimização
Desgaste de flanco	Velocidade de corte muito alta ou muito baixa (se a causa for a presença de APC). Resistência ao desgaste insuficiente da ferramenta. Abrasão. Aresta postiça de corte.	Redução da velocidade de corte. Seleção de classe de ferramenta mais resistente ao desgaste. Aumento da velocidade de corte se o desgaste for causado pela APC.
Desgaste de entalhe	Oxidação.	Seleção de fluido de corte com agentes oxidantes. Redução da velocidade de corte.
Desgaste de cratera	Difusão.	Seleção de classe da ferramenta que possua cobertura de óxido de alumínio.
Deformação plástica	Altas temperaturas combinadas com altas pressões na região de corte.	Seleção de classe de ferramenta com maior dureza a quente. Redução da velocidade de corte.
Trincas de origem mecânica	Variação excessiva de esforço na aresta de corte.	Seleção de uma classe de ferramenta mais tenaz. Redução do avanço. Suavização do primeiro contato da ferramenta com a peça.
Trincas de origem térmica	Excessiva variação de temperatura.	Seleção de classe de ferramenta mais tenaz. Corte a seco no fresamento.
Lascamento	Classe da ferramenta muito frágil. Geometria da ferramenta muito fraca. Choques da ferramenta com a peça.	Seleção de classe de ferramenta mais tenaz. Aumento do ângulo de ponta, raio de ponta e/ou do ângulo de cunha (chanframento de aresta). Suavização do primeiro contato da ferramenta com a peça.

Fonte: (MACHADO et al., 2011).

3.2.12.1 Mecanismos de Desgaste

Conforme citado anteriormente o desgaste de flanco pode ser causado APC, quando esse tipo de desgaste é causado pela presença de APC deve-se aumentar a velocidade de corte utilizada na usinagem para minimizar os desgastes. Na Figura 14 é possível verificar uma ferramenta com aresta postiça de corte.

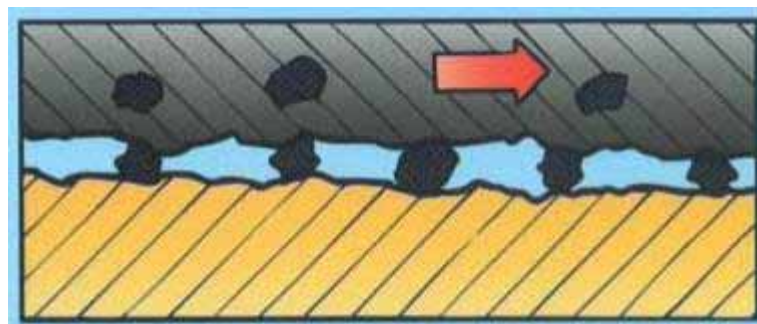
Figura 14 – Aresta Postiça de Corte



Fonte: (SANDVIK, 2014).

O desgaste de flanco pode também ser causado pelo mecanismo de abrasão (Figura 15), visando evitar ou diminuir a incidência de desgaste de flanco é necessário utilizar-se de menores velocidades de corte e/ou de ferramentas mais resistentes.

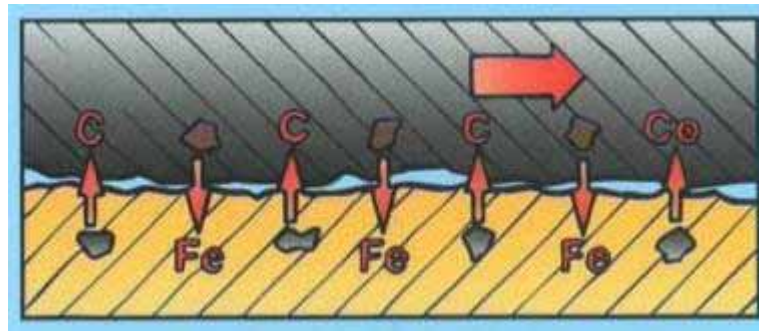
Figura 15 – Mecanismo de abrasão



Fonte: (SANDVIK, 2014).

A difusão promove o desgaste de cratera (Figura 16) que pode ser evitado ou postergado através da utilização de ferramentas com recobrimento de óxido de alumínio.

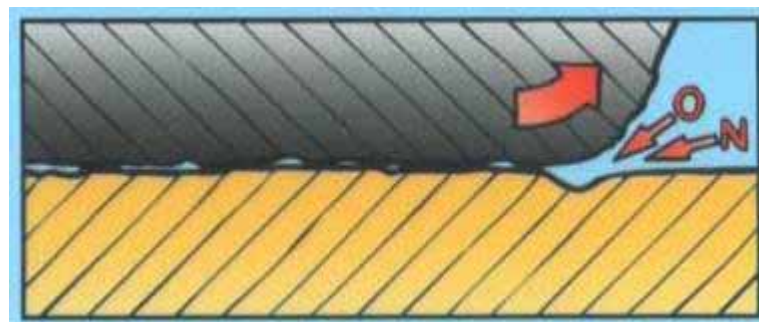
Figura 16 – Difusão



Fonte: (SANDVIK, 2014).

Já a oxidação é a responsável pela ocorrência de desgastes de entalhe (Figura 17), uma maneira de evitar esse tipo de desgaste é, além de reduzir a velocidade de corte buscar fluidos de corte que possuam agentes oxidantes em sua composição.

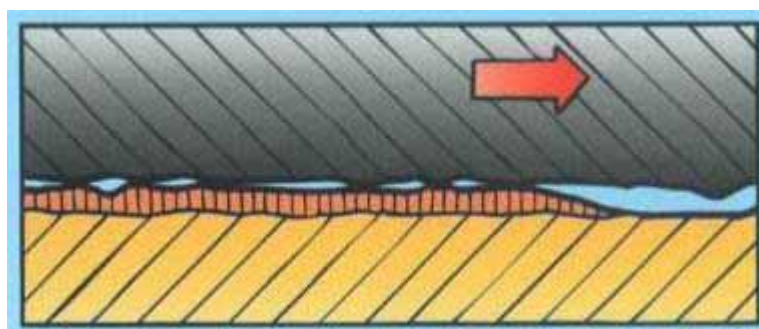
Figura 17 – Oxidação



Fonte: (SANDVIK, 2014).

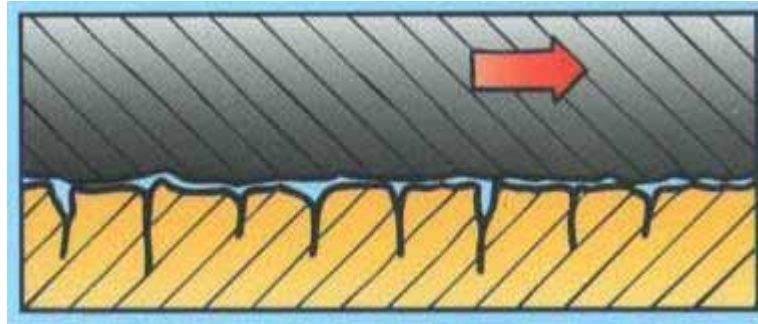
Outros mecanismos que aceleram a ocorrência de desgastes e avaria são a aderência (Figura 18) e também a fadiga (Figura 19).

Figura 18 – Aderência



Fonte: (SANDVIK, 2014).

Figura 19 – Fadiga

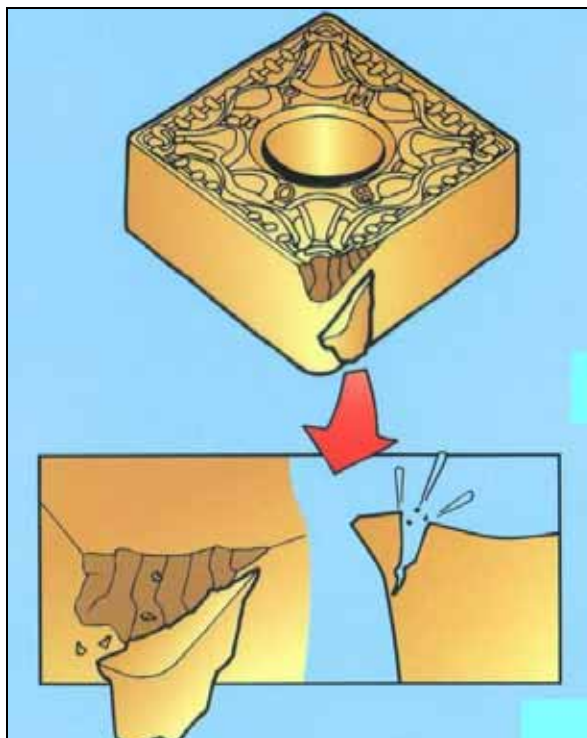


Fonte: (SANDVIK, 2014).

3.2.12.2 Avaria

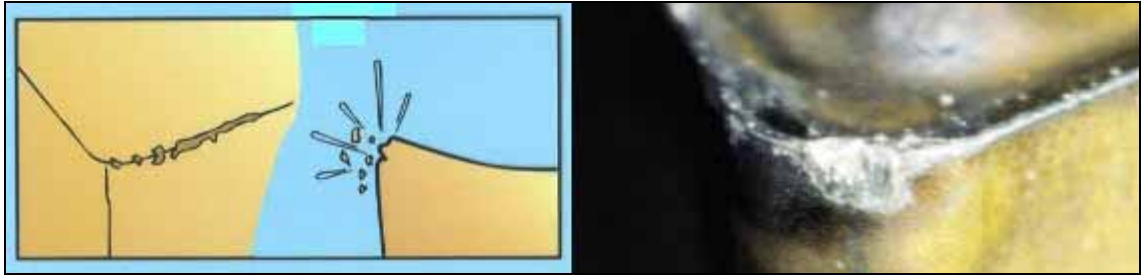
Fenômeno que ocorre de maneira repentina e inesperada, causado pela quebra (Figura 20), lascamento (Figura 21) ou trinca da aresta de corte. Fenômeno mais comum no corte interrompido (fresamento). A quebra é mais comum em ferramentas com baixa tenacidade, como as cerâmicas. Já o lascamento depende também da tenacidade da ferramenta, mas pode ocorrer até mesmo em ferramentas de aço rápido (MACHADO et al., 2011).

Figura 20 – Quebra da ferramenta



Fonte: (SANDVIK, 2014).

Figura 21 – Lascamento da ferramenta



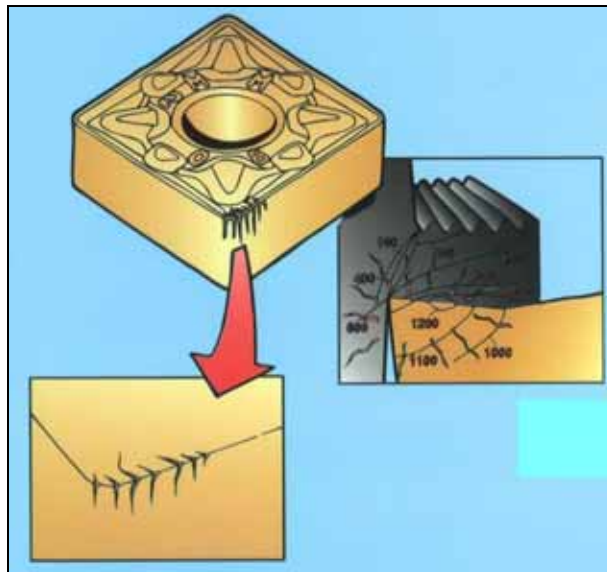
Fonte: (SANDVIK, 2014).

3.2.12.3 Desgaste

A Norma ISO 3685 (1993) define desgaste em ferramentas como a “mudança de sua forma original durante o corte, resultante da perda gradual de material”. No desgaste, ao contrário da avaria, essa perda acontece de maneira contínua e progressiva, em proporções pequenas, e pode ocorrer tanto nas superfícies de folga como na superfície de saída das ferramentas, em cortes contínuos ou interrompidos. O desgaste pode ocorrer segundo vários mecanismos e a deformação plástica pode fazer parte desses mecanismos. Nesse processo, a temperatura desenvolvida durante o corte tem um papel decisivo e atinge ferramentas de corte de qualquer material (MACHADO et al., 2011).

Segundo Sandvik (2014), desgaste é um fenômeno previsível, ocasionado pela utilização normal da ferramenta, levando ao fim da vida útil. Na Figura 22 pode ser visto o fenômeno de desgaste por trincas.

Figura 22 – Trincas



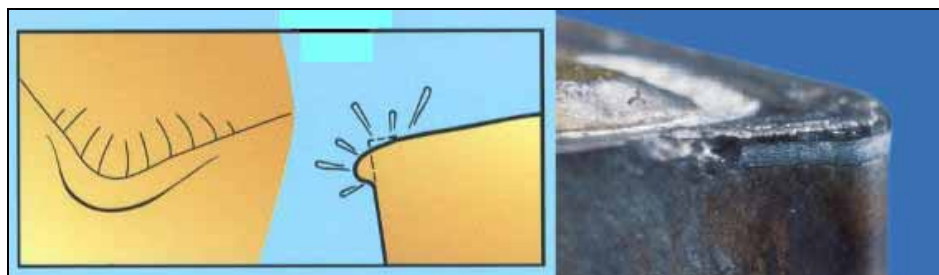
Fonte: (SANDVIK, 2014).

3.2.12.3.1 Deformação Plástica

Ocorre por cisalhamento devido às altas tensões atuantes nas superfícies das ferramentas de corte. Em casos extremos pode levar à total destruição da cunha cortante. É mais comum acontecer em ferramentas com baixa resistência ao cisalhamento e maior tenacidade, como o aço rápido, as ligas fundidas e o metal duro. É comum encontrar na literatura o tratamento da deformação plástica como desgaste, o que é perfeitamente aceitável (MACHADO et al., 2011).

A Figura 23 mostra uma ferramenta que sofreu deformação plástica.

Figura 23 – Deformação plástica da ferramenta



Fonte: (SANDVIK, 2014).

3.2.13 Ferramentas de aço rápido

Aços rápidos são ligas altamente ligadas de carbono e ferro, que contém quantidades de carbono que variam de 0,7% a 1,6%, em que suas propriedades requeridas são: dureza à quente, resistência ao desgaste e tenacidade (GONÇALVES, 2000).

É usado em ferramentas de uso geral, em ferramentas de geometria complexa ou naquelas usadas em situações em que as velocidades de corte são mais modestas (SOUZA, 2011).

Desenvolvido no fim do século XIX, por F. W. Taylor, o aço rápido foi o responsável pelo primeiro grande salto tecnológico na história da usinagem. Com o seu advento, foi possível aumentar as velocidades de corte antes obtidas com ferramentas de aço carbono (3 a 5 m/min) em cerca de dez vezes (30 a 35 m/min) – razão pela qual os aços rápidos possuem este nome (HSS – high-speed steel). Comparado com os materiais das ferramentas atuais, esses valores são relativamente baixos. Apesar disso, esse grupo de materiais ainda resiste, por mais de um século depois de descobertos ainda são largamente empregados (cerca de 40% das ferramentas empregadas na indústria são de HSS). São aplicados principalmente em brocas, fresas inteiriças, cossinetes, brochas e até em ferramentas de barra para aplicações em torneamento de peças de diâmetros reduzidos, cuja velocidade de corte conseguida é inferior à velocidade econômica de corte dos materiais mais resistentes (SOUZA, 2011).

O aço rápido é um aço alta liga com microestrutura martensítica com inclusões de carbonetos. As ferramentas de aço rápido são divididas em dois grandes grupos: aços ao tungstênio (W), identificados pela letra “T”, e aços ao molibdênio (Mo), identificados pela letra “M”. Assim, os principais elementos de liga dos aços rápidos são: tungstênio (W), molibdênio (Mo), cobalto (Co), vanádio (V), cromo (Cr) e outros (SOUZA, 2011).

Diferente do que acontece com os aços convencionais, que são temperados e revenidos, os aços rápidos apresentam uma elevação de dureza quando revenidos em temperaturas entre 480°C e 565°C, dependendo da composição química. Quando da seleção de um aço rápido, deve-se considerar as principais características necessárias ao desempenho da função. O Quadro 7 mostra algumas dessas características e suas relações com os elementos de liga presentes (SOUZA, 2011).

Quadro 7 – Relações dos aços rápidos com os elementos de liga presentes

Características	Elementos de Liga
Dureza à quente	W, Mo, Co (com W ou Mo), V, Cr, Mn
Resistência ao desgaste abrasivo	V, W, Mo, Cr, Mn
Profundidade de endurecimento	B, V, Mo, Cr, Mn, Si, Ni
Empenamento mínimo	Mo (com Cr), Cr, Mn
Aumento da tenacidade pelo refinamento do grão	V, W, Mo, Mn, Cr

Fonte: (SOUZA, 211).

De acordo com o American Iron and Steel Institute e conforme Quadro 8, os aços rápidos são agrupados em seis classes (FERRARESI, 1982).

Quadro 8 – Classes dos aços rápidos

Classe 610	Ao tungstênio
Classe 620	Ao tungstênio-cobalto
Classe 630	Ao molibdênio
Classe 640	Ao molibdênio-cobalto
Classe 650	Ao tungstênio-molibdênio
Classe 660	Ao tungstênio-molibdênio-cobalto

Fonte: (FERRARESI, 1982).

3.2.14 Ferramentas de metal duro

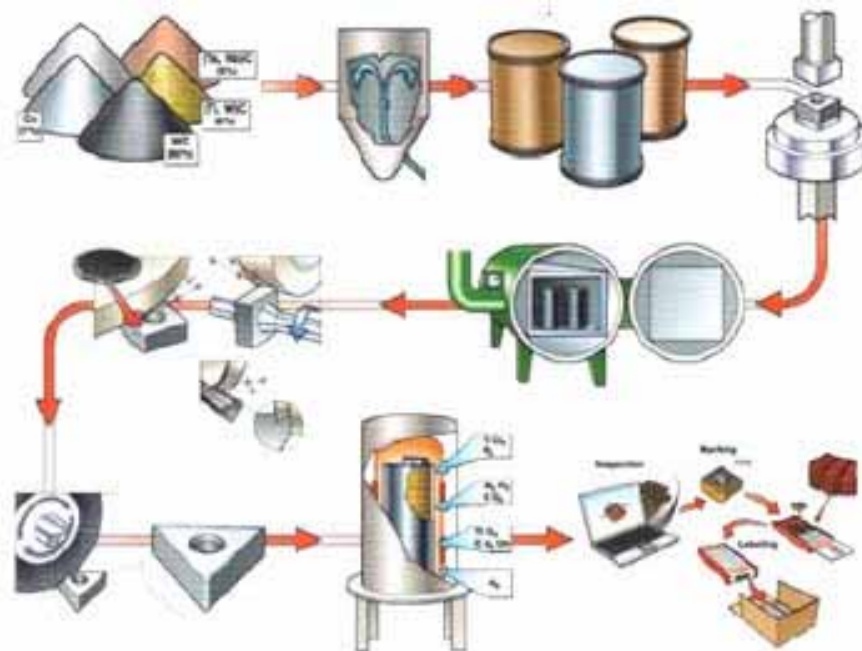
Segundo Souza (2011), ferramentas compostas por metal duro são usadas em 50% das aplicações devido ao custo e à combinação da dureza com a temperatura ambiente, dureza à quente, resistência ao desgaste e tenacidade, possível graças a variação da sua composição. Essas ferramentas podem ser aplicadas em altas velocidades de corte.

A grande vantagem do metal duro é manter o corte da ferramenta vivo por muito mais tempo, mesmo quando submetido à velocidade de trabalho inúmeras vezes superior ao que suportaria o aço rápido. O metal duro aumentou significativamente a produtividade, por ter a propriedade de manter a dureza e assim o fio de corte, mesmo quando muito aquecido, pois

quanto mais rápido se executa a usinagem, maior é o calor gerado na interface ferramenta-peça (SOUZA, 2011).

Desde o princípio, o metal duro, por ser fruto da metalurgia do pó, foi desenvolvido em forma de pastilhas que, inicialmente, eram soldadas a hastes ou cabeçotes metálicos para, deste modo, formar a chamada ferramenta. Como as soldas não resistiam às altas temperaturas geradas na usinagem e soltavam as pastilhas durante o processo, causando acidentes, as pastilhas passaram a ser intercambiáveis e fixadas mecanicamente aos suportes, facilitando o processo de troca de uma ferramenta gasta por outra nova. A Figura 24 ilustra o processo de fabricação da ferramenta de metal duro (SOUZA, 2011).

Figura 24 – Esquema do processo de fabricação da pastilha de metal duro



Fonte: (SOUZA, 2011).

O metal duro é composto de carbonetos metálicos em forma de minúsculas partículas que são incrustadas em metal ligante. Os componentes mais importantes são o carboneto de tungstênio (WC) que determina a resistência ao desgaste, e o metal ligante cobalto (Co) que determina a tenacidade. Com o tempo, outros componentes foram adicionados a essa composição básica, como os carbonetos de titânio (TiC) que aumenta a resistência à craterização, de tântalo (TaC) e de nióbio (NbC) que aumentam a tenacidade e melhoram muito a performance das ferramentas de metal duro quanto à prevenção de desgastes originados nos processos de formação de cavacos, particulares a cada tipo de material (SOUZA, 2011).

A norma ISO 513/2004 (classification and application of hard cutting materials for metal removal with defined cutting edges – designation of main groups and groups of application) classifica os grupos de ferramentas. A letra de designação da classe é sempre acompanhada por um número que representa a tenacidade e a resistência ao desgaste da ferramenta, ou seja, quanto maior o número, maior a tenacidade e menor a resistência ao desgaste (SOUZA, 2011).

O Quadro 9 mostra a classificação dos grupos de ferramentas.

Quadro 9 – Classificação das ferramentas de metal duro

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

Fonte: (ISO 513, 2004).

Segundo Amorim (2002), deve-se ressaltar de forma especial o grupo K que além de ter sido o primeiro tipo de metal duro desenvolvido, composto basicamente por carbonetos de tungstênio aglomerados de cobalto, devido à baixa resistência dos metais duros à difusão em altas temperaturas. As ferramentas deste grupo não são recomendadas para a usinagem de metais dúcteis, sendo sua área de aplicação restrita a usinagem de materiais frágeis, que formam cavacos curtos (ferros fundidos e latões), metais não ferrosos como alumínio, cobre, titânio e níquel, não necessariamente de cavacos curtos e madeira.

3.2.15 Ferramentas de metal duro com revestimento

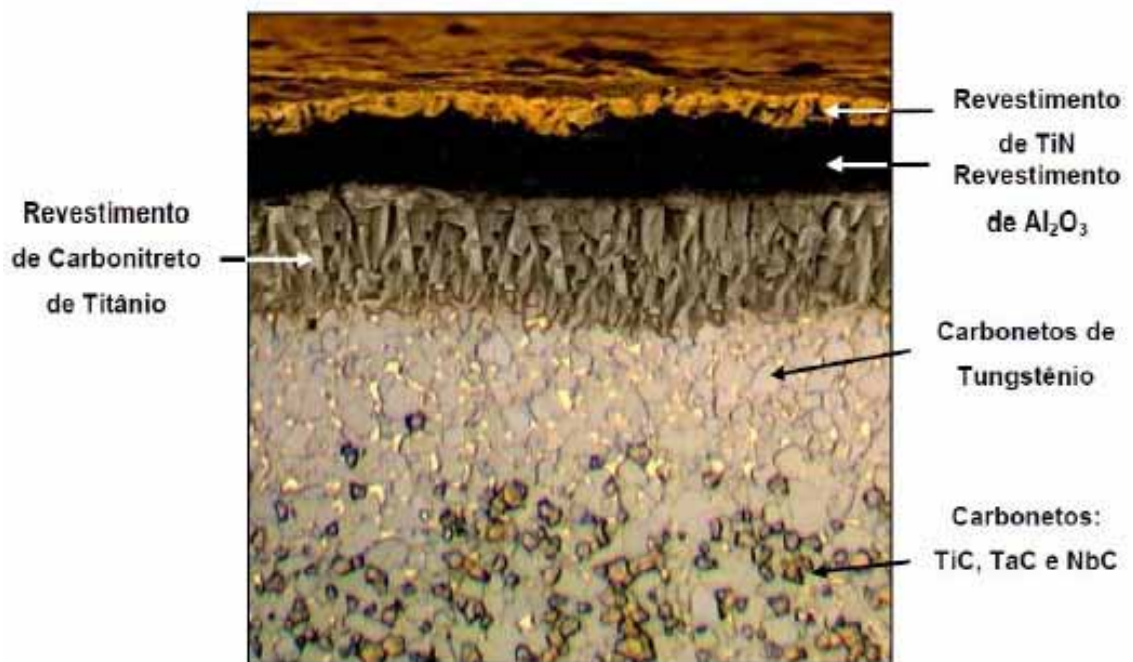
São pastilhas revestidas por componentes ainda mais resistentes ao desgaste e que apresentam melhorias em relação à taxa de remoção do cavaco e as velocidades de usinagem. Os revestimentos, simples ou compostos, são camadas de fina granulometria que combinam as propriedades de dureza e resistência ao desgaste (GONÇALVES, 2000).

Esse revestimento pode ser obtido tanto pelo processo CVD (Chemical Vapor Deposition) quanto pelo processo PVD (Physical Vapor Deposition). Essas camadas, que medem de 3 a 5 μm de espessura, proporcionam maior durabilidade à aresta de corte, pois a camada extrafina e extremamente dura sobre o núcleo tenaz permitiu que uma mesma pastilha suportasse tanto maiores esforços de corte (em operações de desbaste) quanto altas velocidades (em operações de acabamento). Atualmente, a tecnologia dos revestimentos evoluiu de tal forma que existem as pastilhas multirrevestidas, com camadas sobrepostas, em que cada uma das camadas exerce uma função específica, a fim de conter os diferentes processos de desgaste que se desenvolvem durante a usinagem (SOUZA, 2011).

Comumente tem-se um triplo revestimento: TiC/TiCN/TiN ou TiC/Al₂O₃/TiN. Entretanto existem registros de ferramentas com até doze camadas de diferentes revestimentos. Cada camada tem uma função específica e a sua associação permite oferecer um material com todas as vantagens possíveis. Uma única pastilha pode ser aplicável tanto em acabamento quanto em desbaste de metais, que podem variar do aço ao ferro fundido. O TiC ou o TiCN são revestimentos muito usados como primeira camada, pois garante uma coesão boa com o substrato. Além disso, o TiC é um dos mais duros revestimento utilizados garantindo resistência ao desgaste. O Al₂O₃ é um revestimento intermediário muito empregado pela sua inércia química, sua dureza (resistência ao desgaste) e sua baixa condutividade térmica a altas

temperaturas. O TiN se apresenta como camada mais externa proporcionando baixos coeficientes de atrito entre a ferramenta e o cavaco e entre a ferramenta e a peça. A Figura 25 mostra a estrutura do metal duro com o substrato de carboneto de tungstênio e a matriz metálica de cobalto, além dos revestimentos aplicados na superfície da ferramenta (SOUZA, 2011).

Figura 25 – Microestrutura do metal duro



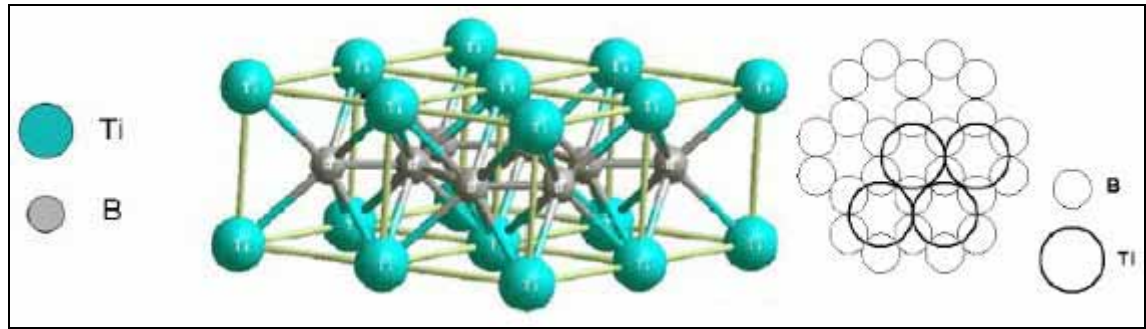
Fonte: (SOUZA, 2011).

3.2.15.1 Diboreto de titânio (TiB₂)

O TiB₂, ou diboreto de titânio é um composto cerâmico de estrutura hexagonal onde os átomos de boro formam uma rede ligada covalentemente na matriz do titânio (CABRAL, 2012).

A Figura 26 mostra a estrutura de uma rede hexagonal de átomos de boro na matriz de titânio.

Figura 26 – Rede hexagonal de átomos de boro na matriz de titânio



Fonte: (CABRAL, 2012).

Esse composto é um dos mais estáveis à base de titânio-boro, como material não é encontrado na natureza, mas pode ser sintetizado a partir do tratamento térmico do TiO_2 e o B_2O_3 . Sua estrutura permite que seja bom condutor térmico elétrico, devido à alta mobilidade eletrônica na sua estrutura (CABRAL, 2012).

Esse material tem um alto potencial para aplicações tecnológicas porque além da alta dureza possui propriedades tais como, alto ponto de fusão, coeficiente de expansão térmica relativamente baixo ($4,6 \times 10^{-6} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$) e baixa resistividade elétrica (SOARES, 2003).

É bem conhecido pelas boas propriedades em altas temperaturas, como elevada dureza (33 GPa para um monocrystal) e estabilidade química. Devido à sua alta dureza, considerável resistência mecânica e boa resistência ao desgaste, é bastante indicado para ser usado como revestimento protetor de ferramentas de corte e disco rígido magnético (CABRAL, 2012).

O Quadro 10 mostra as principais propriedades do TiB_2 .

Quadro 10 – Propriedades físicas e mecânicas típicas do TiB_2 à temperatura ambiente

Propriedades	Valores
Densidade [g/cm^3]	4.48
Parâmetro de rede [nm]	0.3028/0.3228
Ponto de Fusão [$^\circ\text{C}$]	3325 $\pm$ 25 $^\circ\text{C}$
Limite de Resistência [MPa]	410-448
Dureza [GPa]	33
Modulo Elástico [GPa]	510-575
Condutividade Térmica [W/mK]	110
Resistividade Elétrica [$\mu\Omega\text{cm}$]	8.5

Fonte: (CABRAL, 2012).

4 MATERIAIS E MÉTODOS

4.1 PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

Foi realizada a operação de usinagem por torneamento cilíndrico externo com a liga de alumínio 2024, que possui Cu e possivelmente Mg como elementos de liga (Quadro 2). Sabe-se que os elementos de liga são adicionados para melhorar as propriedades mecânicas do alumínio, como a resistência mecânica, por exemplo; mas a adição desses elementos causa também outros efeitos:

- Cobre: forma o intermetálico CuAl, que fragiliza o cavaco;
- Magnésio: em pequenas quantidades, aumenta a dureza do cavaco e diminui o coeficiente de atrito entre cavaco e ferramenta.

A liga 2024 utilizada passou por tratamento térmico, no caso a têmpera-padrão T4 (Quadro 3), que consiste em solubilização e envelhecimento natural em condições substancialmente estáveis. Esse tratamento é aplicado aos produtos que não sofrem deformação plástica depois do tratamento térmico de solubilização, ou nos quais o efeito do encruamento, devido ao endireitamento, pode ser desprezado ao serem fixados os limites de propriedades mecânicas.

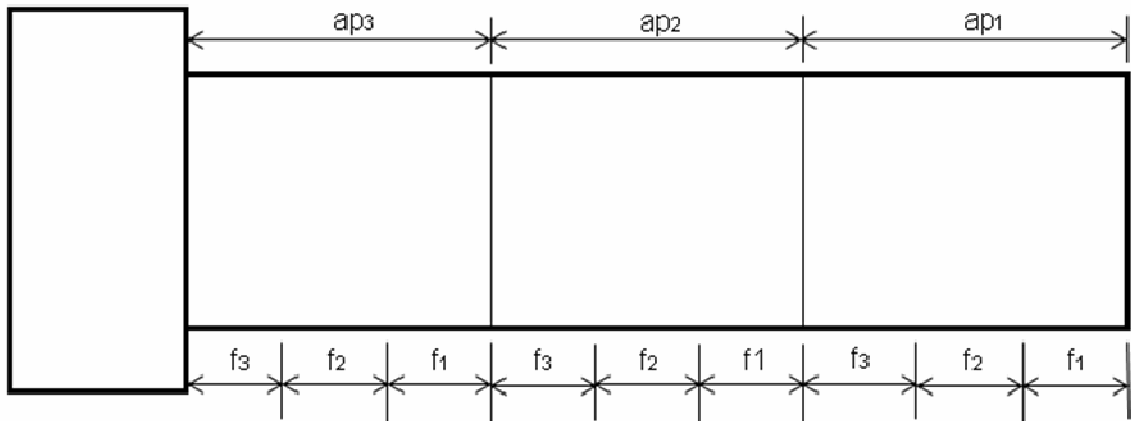
Quanto à usinabilidade, conforme citado anteriormente, a liga 2024 recebe classificação B segundo o sistema de classificação de usinabilidade da Associação do Alumínio.

As ferramentas utilizadas foram as seguintes: pastilha de metal duro polido, pastilha de metal duro recoberto com TiB_2 e ferramenta de aço rápido.

As ferramentas de metal duro ainda eram dotadas de quebra-cavacos e foram utilizados três corpos de prova para o ensaio de cada uma das três ferramentas mencionadas.

Os parâmetros variados para o ensaio de cada ferramenta foram velocidade de corte, avanço e profundidade, conforme mostrado na Figura 27.

Figura 27 – Esquema do corpo de prova



Fonte: (o autor).

Onde:

Avanço: $f_1 = 40 \text{ mm/min}$;

$f_2 = 70 \text{ mm/min}$;

$f_3 = 100 \text{ mm/min}$.

Profundidade de corte: $ap_1 = 0,50 \text{ mm}$;

$ap_2 = 0,35 \text{ mm}$;

$ap_3 = 0,20 \text{ mm}$.

Para cada ferramenta utilizou-se três corpos de prova iguais, conforme ilustra a Figura 28.

Figura 28 – Corpo de prova



Fonte: (o autor).

De cada corpo de prova coletou-se nove amostras de cavaco. Portanto, foram coletadas 81 amostras de cavaco para posterior análise e ainda, com auxílio de um rugosímetro portátil foram medidas as rugosidades médias (R_a) e as rugosidades totais (R_t) em cada uma das situações.

O procedimento de usinagem realizado está descrito a seguir:

- Depois de selecionados os corpos de prova foram digitalizadas imagens das ferramentas novas para posteriores comparações dos desgastes. Em seguida, a primeira ferramenta e o primeiro CDP foram fixados no torno e o zero em “z” foi definido na face do corpo de prova.

- A ferramenta foi então deslocada até a posição 3000 em “x” e 100 em “z” para que a etapa CNC se iniciasse. Esse procedimento foi repetido para todos os nove corpos de prova que foram ensaiados.

- Ao iniciar-se o modo CNC da máquina, o programa do Quadro 11 foi digitado:

Quadro 11 – Programa utilizado para a usinagem dos corpos de prova

N	G/M	X/I	Z/K	F	H
00	21				
01	M03				
02	92	3000	100		
03	01	2600	100	50	
04	01	2500	0	50	
05	84	2400	-2000	40	50
06	01	2600	-2000	50	
07	01	2500	-2000	50	
08	84	2400	-4000	70	50
09	01	2600	-4000	50	
10	01	2500	-4000	50	
11	84	2400	-6000	100	50
12	01	2600	-6000	50	
13	01	2500	-6000	50	
14	84	2430	-8000	40	35
15	01	2600	-8000	50	
16	01	2500	-8000	50	
17	84	2430	-10000	70	35
18	01	2600	-10000	50	
19	01	2500	-10000	50	
20	84	2430	-12000	100	35
21	01	2600	-12000	50	
22	01	2500	-12000	50	
23	84	2460	-14000	40	20
24	01	2600	-14000	50	
25	01	2500	-14000	50	
26	84	2460	-16000	70	20
27	01	2600	-16000	50	
28	01	2500	-16000	50	
29	84	2460	-18000	100	20
30	01	2600	-18000	50	
31	01	3000	100	50	
32	M30				

Fonte: (o autor).

Na coluna “F” é indicado o valor utilizado no avanço da ferramenta e na coluna “H”, o valor da profundidade de corte.

O procedimento acima foi repetido para os três corpos de prova usinados utilizando-se a pastilha de metal duro polido, de metal duro com recobrimento de TiB_2 e de aço rápido, respectivamente.

4.2 EQUIPAMENTOS, FERRAMENTAS E MATERIAIS UTILIZADOS

4.2.1 Equipamentos utilizados

A máquina ferramenta utilizada nos ensaios foi o torno CNC Emco (Figura 29), que se encontra disponível no DMT/FEG-UNESP (Guaratinguetá).

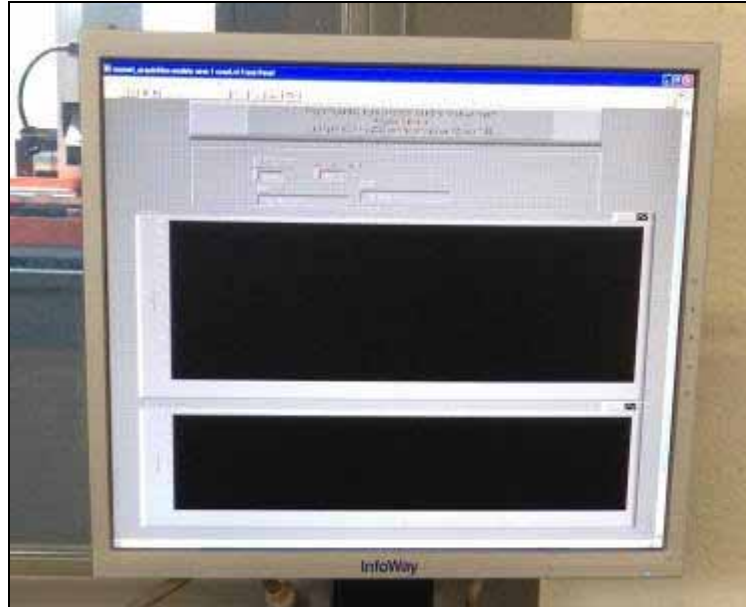
Figura 29 – Torno CNC Emco, Compact 5



Fonte: (o autor).

O software LabVIEW, foi utilizado durante a usinagem para captação da potência consumida durante o torneamento. A interface do software pode ser vista na Figura 30.

Figura 30 – Interface do software LabVIEW



Fonte: (o autor).

Foi também utilizado o rugosímetro portátil da Mahr, MarSurf M300, composto por suporte, apalpador (Figura 31) e display (Figura 32).

Figura 31 – Suporte e apalpador do rugosímetro



Fonte: (o autor).

Figura 32 – Display do rugosímetro



Fonte: (o autor).

Para visualização de possíveis desgastes nas ferramentas após o processo de torneamento, utilizou-se o microscópio digital CoolingTech.

4.2.2 Ferramentas Utilizadas

A primeira ferramenta utilizada foi a pastilha de metal duro polido DCGT070204, marca TGN (Figuras 33, 34 e 35).

Figura 33 – Pastilha de metal duro polido



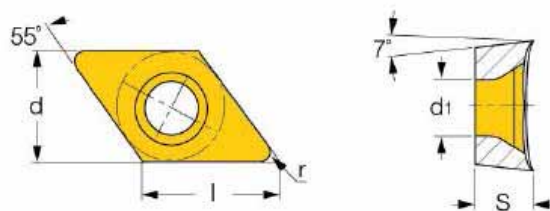
Fonte: (o autor).

Figura 34 – Pastilha de metal duro polido no suporte



Fonte: (o autor).

Figura 35 – Configuração da pastilha de metal duro polido



Fonte: (o autor).

A segunda ferramenta utilizada foi a pastilha de metal duro com recobrimento de TiB_2 , DCGT070204, marca Kennametal (Figuras 36, 37 e 38).

Figura 36 – Pastilha de metal duro com recobrimento de TiB_2



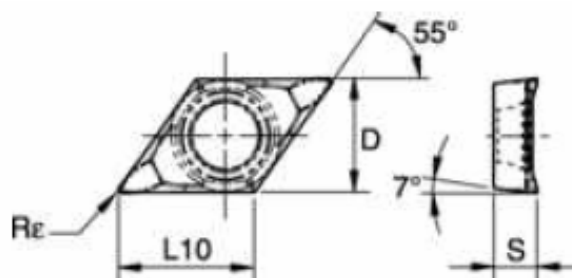
Fonte: (o autor).

Figura 37 – Pastilha de metal duro com recobrimento de TiB_2 no suporte



Fonte: (o autor).

Figura 38 – Pastilha de metal duro com recobrimento de TiB_2



Fonte: (o autor).

Para as pastilhas de metal duro polido e com recobrimento, citadas acima, foi utilizado somente o suporte SDJCR1210D07 (Figura 39).

Figura 39 – Suporte utilizado para as pastilhas de metal duro



Fonte: (o autor).

A terceira ferramenta utilizada foi a ferramenta de aço rápido, com os ângulos correspondentes aos ângulos encontrados nas duas ferramentas anteriores (Figuras 40 e 41).

Figura 40 – Ferramenta de aço rápido



Fonte: (o autor).

Figura 41 – Ferramenta de aço rápido

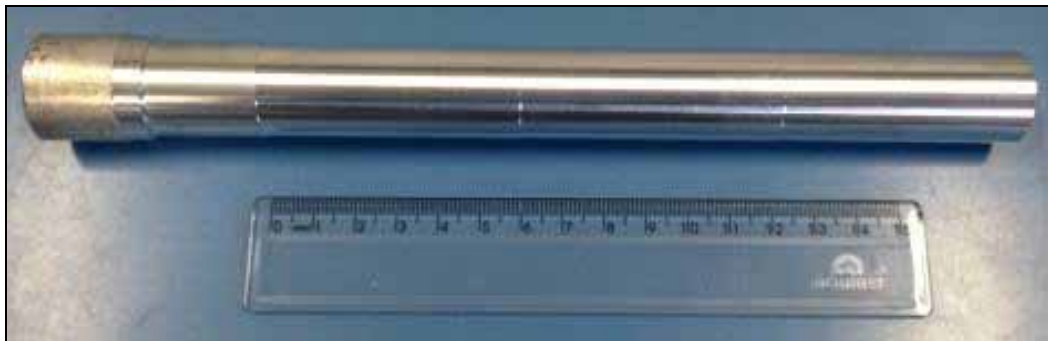


Fonte: (o autor).

4.2.3 Materiais utilizados

Foram utilizados três corpos de prova da liga de alumínio 2024-T4 (ver composição nominal em Quadro 4 e têmpera-padrão em Quadro 3), com 26 mm de diâmetro e 230 mm de comprimento, conforme Figura 42.

Figura 42 – Configuração dos CDP's utilizados



Fonte: (o autor).

Não foi utilizado fluido de corte para nenhuma das operações realizadas.

4.3 ANÁLISE DOS RESULTADOS

A partir do objetivo proposto no início deste trabalho, foi possível verificar o resultado da aplicação de cada uma das três ferramentas na usinagem do alumínio. Conforme já mencionado, foram variados alguns parâmetros (rotação, avanço e profundidade de corte) para a comparação do desempenho das ferramentas com a variação dos mesmos.

Durante os ensaios foram obtidas amostras dos cavacos formados em cada combinação de parâmetros, essa coleta foi realizada para posterior análise.

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 ACABAMENTO SUPERFICIAL

Nos intervalos entre as usinagens dos corpos de prova foram realizadas três medidas de rugosidade média (R_a) e total (R_t) em cada uma das nove regiões do corpo de prova. Tais medidas foram obtidas com o auxílio do rugosímetro portátil apresentado.

5.1.1 Torneamento com ferramenta de metal duro, classe N, sem recobrimento

- Corpo de prova 1: 1000 rpm, $V_{c1} = 81,68$ m/min.

Quadro 12 – Rugosidades médias (R_a) medidas no CDP1

	$ap_1 = 0,50$ mm			$ap_2 = 0,35$ mm			$ap_3 = 0,2$ mm		
Avanço (mm/min)	40	70	100	40	70	100	40	70	100
medida 1	0,781	1,506	1,743	0,686	1,47	1,205	0,726	1,096	1,206
medida 2	0,913	1,53	1,604	0,854	1,507	1,375	0,753	1,091	1,197
medida 3	0,904	1,404	1,743	0,953	1,376	1,266	0,593	0,899	1,359
MÉDIA	0,866	1,480	1,697	0,831	1,451	1,282	0,691	1,029	1,254

Quadro 13 – Rugosidades totais (R_t) medidas no CDP1

	$ap_1 = 0,50$ mm			$ap_2 = 0,35$ mm			$ap_3 = 0,2$ mm		
Avanço (mm/min)	40	70	100	40	70	100	40	70	100
medida 1	5,451	8,887	15,3	5,823	9,455	7,941	6,83	6,5	8,399
medida 2	6,055	10,12	12,28	5,945	11,3	9,174	5,42	7,227	7,361
medida 3	5,359	10,43	9,955	6,043	9,18	8,008	4,798	6,507	9,259
MÉDIA	5,622	9,812	12,512	5,937	9,978	8,374	5,683	6,745	8,340

- Corpo de prova 2: 1250 rpm, $V_{c2} = 102,10$ m/min.

Quadro 14 – Rugosidades médias (R_a) medidas no CDP2

	ap₁ = 0,50 mm			ap₂ = 0,35 mm			ap₃ = 0,2 mm		
Avanço (mm/min)	40	70	100	40	70	100	40	70	100
medida 1	0,608	1,438	1,713	1,047	1,427	1,94	0,936	1,017	1,838
medida 2	0,835	1,243	1,399	0,794	1,48	1,697	0,788	1,008	1,311
medida 3	0,909	1,25	1,601	1,277	1,334	1,606	0,717	1,073	1,907
MÉDIA	0,784	1,310	1,571	1,039	1,414	1,748	0,814	1,033	1,685

Quadro 15 – Rugosidades totais (R_t) medidas no CDP2

	ap₁ = 0,50 mm			ap₂ = 0,35 mm			ap₃ = 0,2 mm		
Avanço (mm/min)	40	70	100	40	70	100	40	70	100
medida 1	4,749	8,679	11,17	6,867	10,66	12,73	6,885	6,568	13,99
medida 2	6,018	10,1	9,619	9,235	11,64	11,11	6,519	7,215	8,722
medida 3	6,061	9,076	9,766	9,772	9,87	10,28	5,121	8,148	12,13
MÉDIA	5,609	9,285	10,185	8,625	10,72	11,373	6,18	7,31	11,61

- Corpo de prova 3: 1500 rpm, $V_{c3} = 122,52$ m/min.

Quadro 16 – Rugosidades médias (R_a) medidas no CDP3

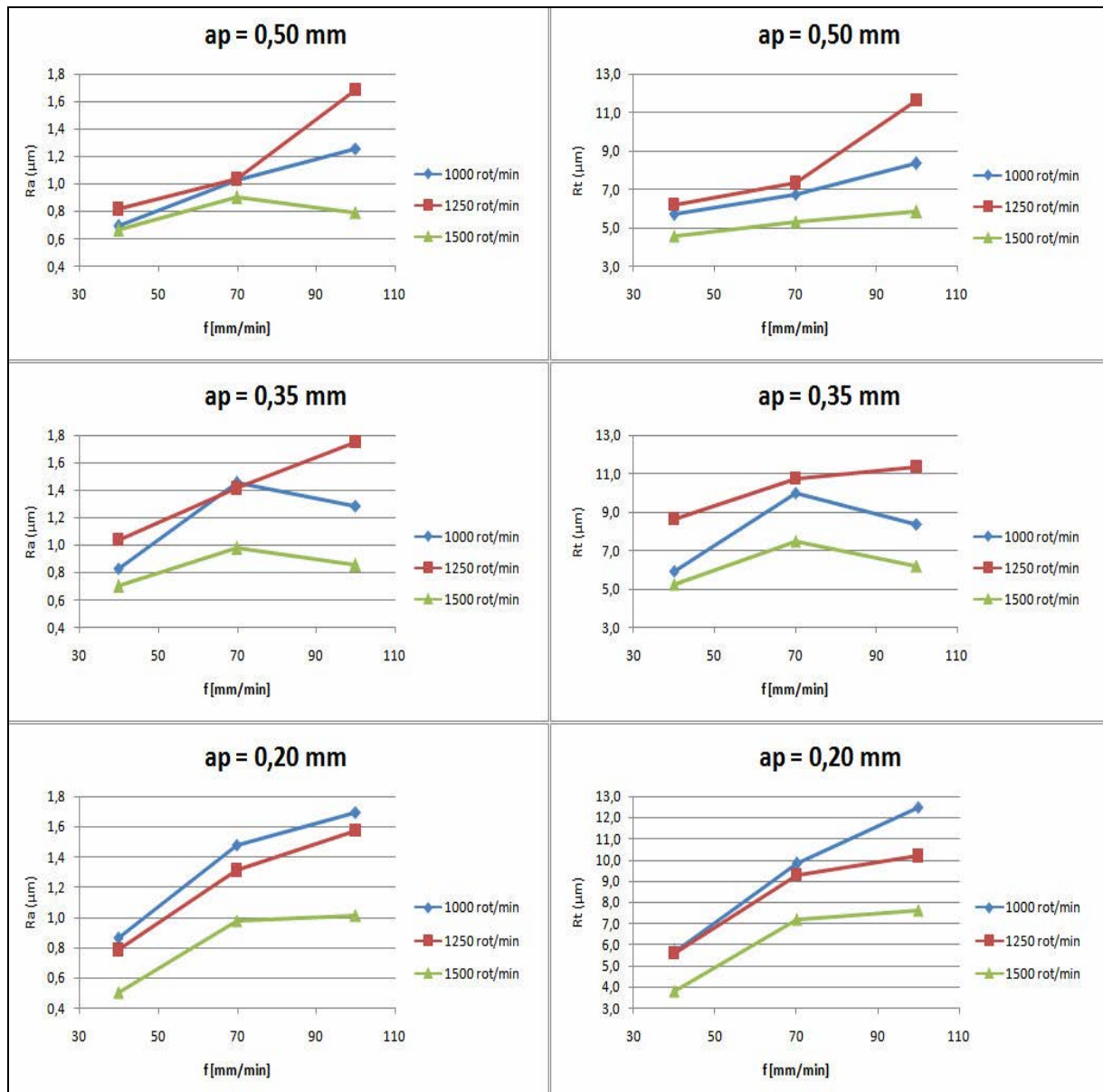
	ap₁ = 0,50 mm			ap₂ = 0,35 mm			ap₃ = 0,2 mm		
Avanço (mm/min)	40	70	100	40	70	100	40	70	100
medida 1	0,512	0,927	0,995	0,721	0,93	0,921	0,656	0,942	0,877
medida 2	0,511	0,933	0,897	0,612	1,027	0,799	0,721	0,868	0,771
medida 3	0,489	1,078	1,155	0,763	0,971	0,835	0,608	0,888	0,729
MÉDIA	0,504	0,979	1,016	0,699	0,976	0,852	0,662	0,899	0,792

Quadro 17 – Rugosidades totais (R_t) medidas no CDP3

	$ap_1 = 0,50$ mm			$ap_2 = 0,35$ mm			$ap_3 = 0,2$ mm		
Avanço (mm/min)	40	70	100	40	70	100	40	70	100
medida 1	3,858	6,775	7,605	6,134	7,88	6,366	4,633	5,652	6,317
medida 2	3,845	6,665	6,653	4,181	7,062	5,048	4,773	5,261	4,859
medida 3	3,705	8,185	8,57	5,432	7,52	7,135	4,328	5,06	6,262
MÉDIA	3,803	7,208	7,609	5,249	7,487	6,183	4,578	5,324	5,813

A partir dos gráficos de rugosidade obtidos, tanto R_a quanto R_t , em função da avanço, é possível analisar a influência que esse parâmetro exerce no acabamento superficial da peça torneada. Em todos os casos considerados na Figura 43, percebe-se uma diminuição dos valores de rugosidade conforme a velocidade de corte aumenta com o aumento da rotação.

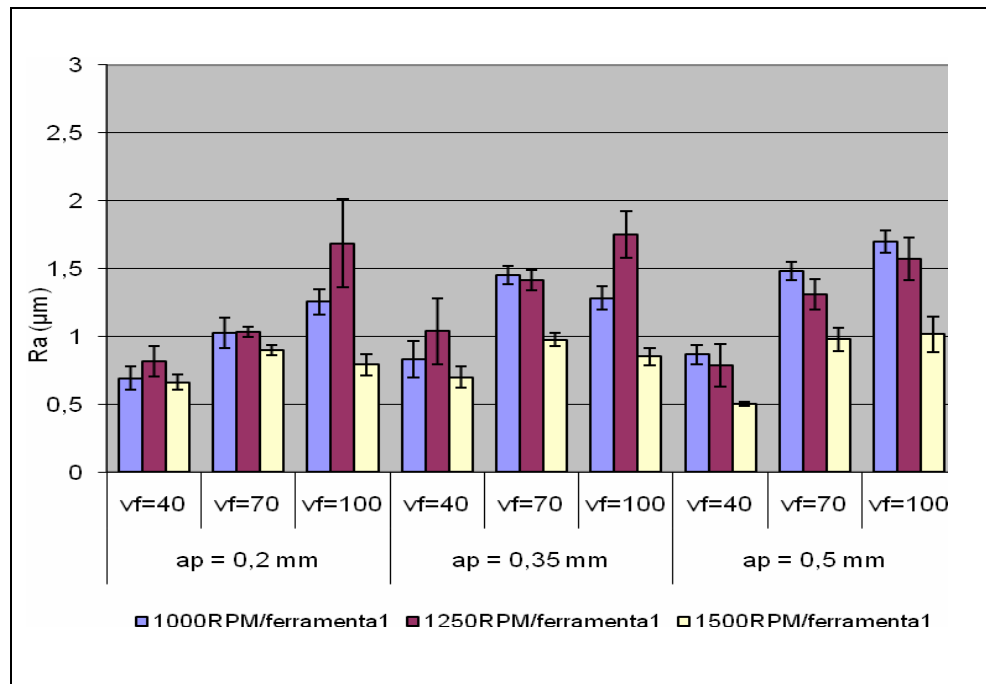
Figura 43 – Gráficos R_a e R_t versus f , para a pastilha de metal duro polido



Fonte: (o autor).

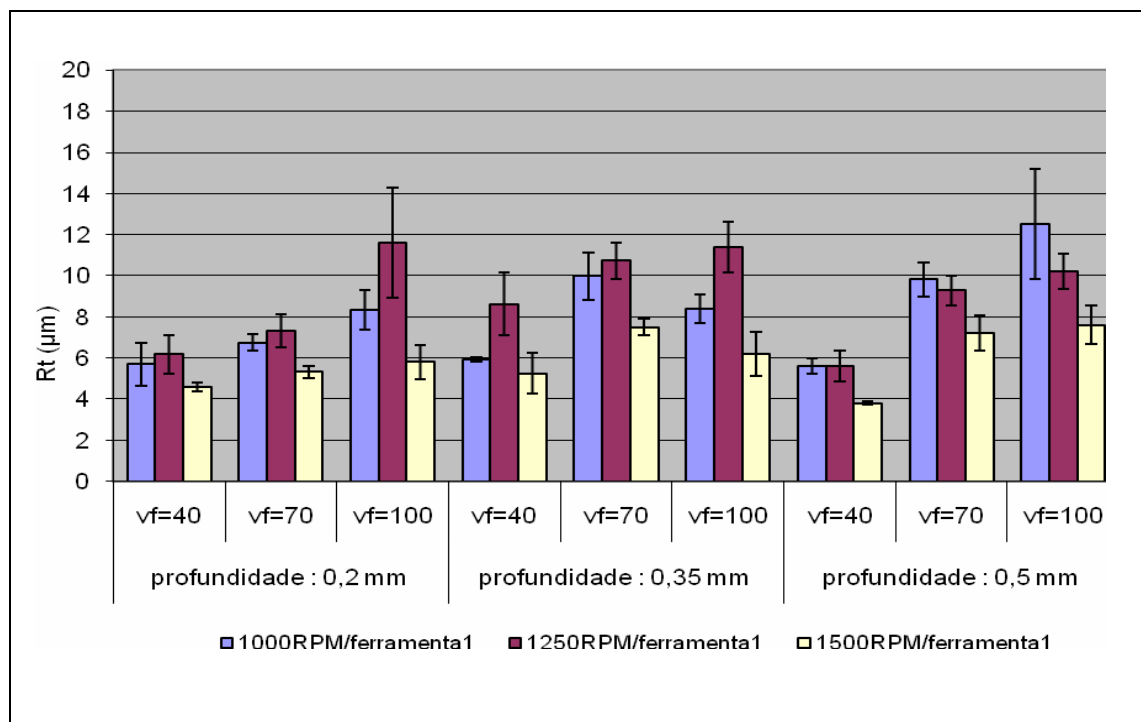
Nas Figuras 44 e 45 observa-se a variação sofrida pelos valores de R_a e R_t , respectivamente, em função do avanço e da profundidade de corte.

Figura 44 – Variação de R_a em função do avanço e da profundidade de corte, para a pastilha de metal duro polido



Fonte: (o autor).

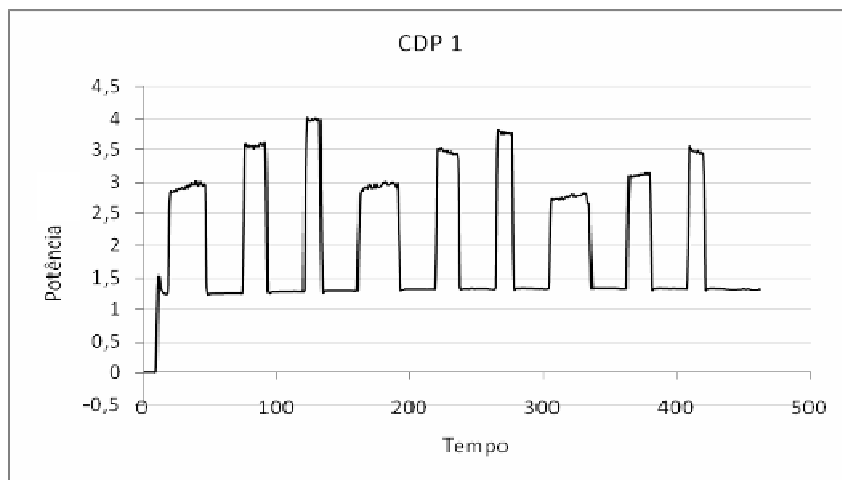
Figura 45 – Variação de R_t em função do avanço e da profundidade de corte, para a pastilha de metal duro polido



Fonte: (o autor).

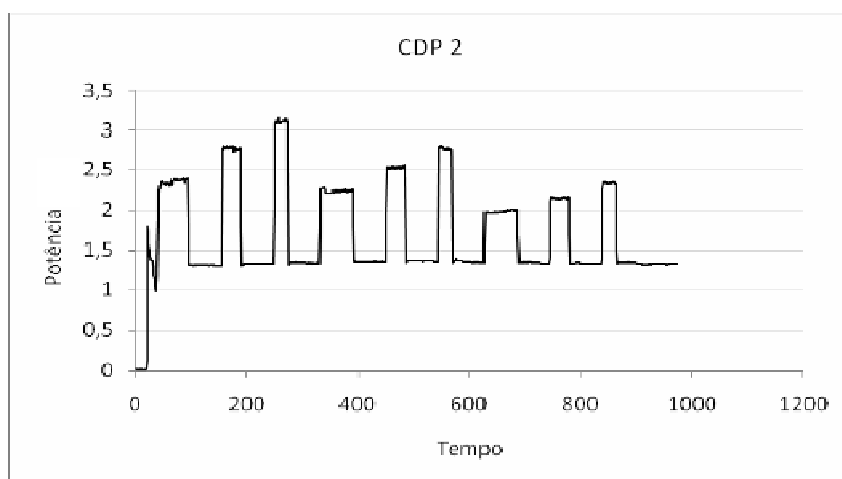
As potências requeridas para usinagem dos corpos de prova 1, 2 e 3, estão disponíveis nas Figuras 46, 47 e 48. É perceptível a ocorrência de um aumento na potência requerida de usinagem conforme aumenta o avanço, para uma dada profundidade de corte; e a diminuição da potência requerida conforme diminui a profundidade de corte, para um dado avanço. O comportamento descrito foi observado para os três corpos de prova usinados utilizando-se pastilha de metal duro polido.

Figura 46 – Potência requerida para o torneamento do CDP1



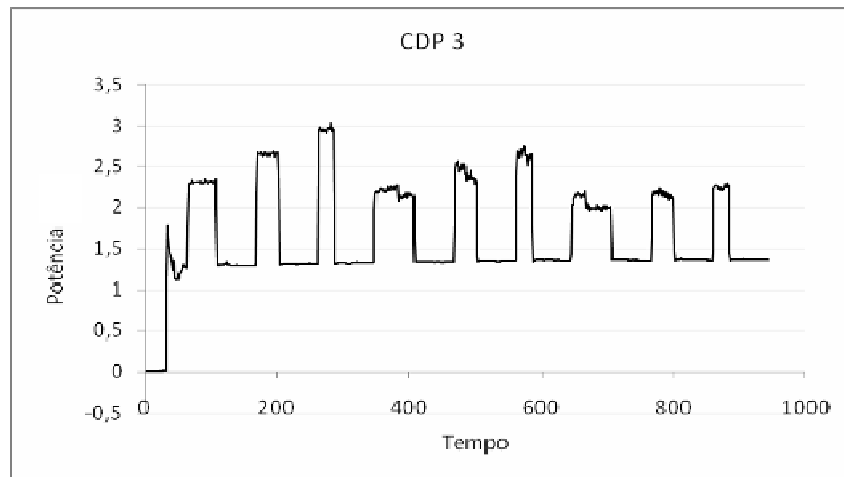
Fonte: (o autor).

Figura 47 – Potência requerida para o torneamento do CDP2



Fonte: (o autor).

Figura 48 – Potência requerida para o torneamento do CDP3



Fonte: (o autor).

A partir dos dados coletados dos gráficos das Figuras 46, 47 e 48, foram calculadas as potências requeridas para a ferramenta de metal duro polido (ferramenta 1), conforme Quadro 18 abaixo:

Quadro 18 – Valores de potência requerida para o torneamento, em *Watts*

Avanço [mm/min]	$ap_1 = 0,50 \text{ mm}$			$ap_2 = 0,35 \text{ mm}$			$ap_3 = 0,20 \text{ mm}$		
	40	70	100	40	70	100	40	70	100
CDP1	173,76	234,38	274,35	172,14	225,78	254,62	153,82	187,42	227,70
CDP2	110,71	152,21	186,82	98,67	127,11	152,71	70,94	88,45	106,06
CDP3	106,46	140,67	175,28	98,97	127,31	146,23	91,49	94,52	100,80
Média	130,31	175,75	212,15	123,26	160,07	184,52	105,42	123,46	144,85

5.1.2 Torneamento com ferramenta de metal duro recoberta com TiB_2

- Corpo de prova 4: 1000 rpm, $V_{c1} = 81,68$ m/min.

Quadro 19 – Rugosidades médias (R_a) medidas no CDP4

	$ap_1 = 0,50$ mm			$ap_2 = 0,35$ mm			$ap_3 = 0,2$ mm		
Avanço (mm/min)	40	70	100	40	70	100	40	70	100
medida 1	0,692	1,284	1,528	0,749	0,929	1,455	0,533	0,845	0,967
medida 2	0,669	1,267	1,475	0,724	0,991	1,297	0,489	0,843	0,941
medida 3	0,601	1,271	1,501	0,68	1,097	1,359	0,528	0,904	0,984
MÉDIA	0,654	1,274	1,501	0,718	1,006	1,370	0,517	0,864	0,964

Quadro 20 – Rugosidades totais (R_t) medidas no CDP4

	$ap_1 = 0,50$ mm			$ap_2 = 0,35$ mm			$ap_3 = 0,2$ mm		
Avanço (mm/min)	40	70	100	40	70	100	40	70	100
medida 1	6,83	8,557	10,82	5,597	7,166	9,735	3,619	5,725	6,159
medida 2	4,224	8,985	10,58	4,498	6,47	8,722	3,4	5,487	6,372
medida 3	3,9	7,746	9,815	4,651	7,923	11,29	3,583	6,226	6,818
MÉDIA	4,985	8,429	10,405	4,915	7,186	9,916	3,534	5,813	6,450

- Corpo de prova 5: 1250 rpm, $V_{c2} = 102,10$ m/min.

Quadro 21 – Rugosidades médias (R_a) medidas no CDP5

	$ap_1 = 0,50$ mm			$ap_2 = 0,35$ mm			$ap_3 = 0,2$ mm		
Avanço (mm/min)	40	70	100	40	70	100	40	70	100
medida 1	0,696	1,156	1,302	0,712	0,994	1,171	0,575	1,054	1,346
medida 2	0,783	1,206	1,463	0,652	0,959	1,337	0,558	1,053	1,111
medida 3	0,618	1,09	1,235	0,604	1,067	1,265	0,527	1,115	0,97
MÉDIA	0,699	1,151	1,333	0,656	1,007	1,258	0,553	1,074	1,142

Quadro 22 – Rugosidades totais (R_t) medidas no CDP5

	ap₁ = 0,50 mm			ap₂ = 0,35 mm			ap₃ = 0,2 mm		
Avanço (mm/min)	40	70	100	40	70	100	40	70	100
medida 1	5,329	7,794	9,864	4,724	7,593	9,638	4,675	7,178	9,967
medida 2	6	10,38	9,876	5,286	7,147	9,998	4,492	7,892	8,441
medida 3	4,804	7,947	8,393	4,474	8,301	9,424	4,254	7,532	7,636
MÉDIA	5,378	8,707	9,378	4,828	7,680	9,687	4,474	7,534	8,681

○ Corpo de prova 6: 1500 rpm, $V_{c3} = 122,52$ m/min.

Quadro 23 – Rugosidades médias (R_a) medidas no CDP6

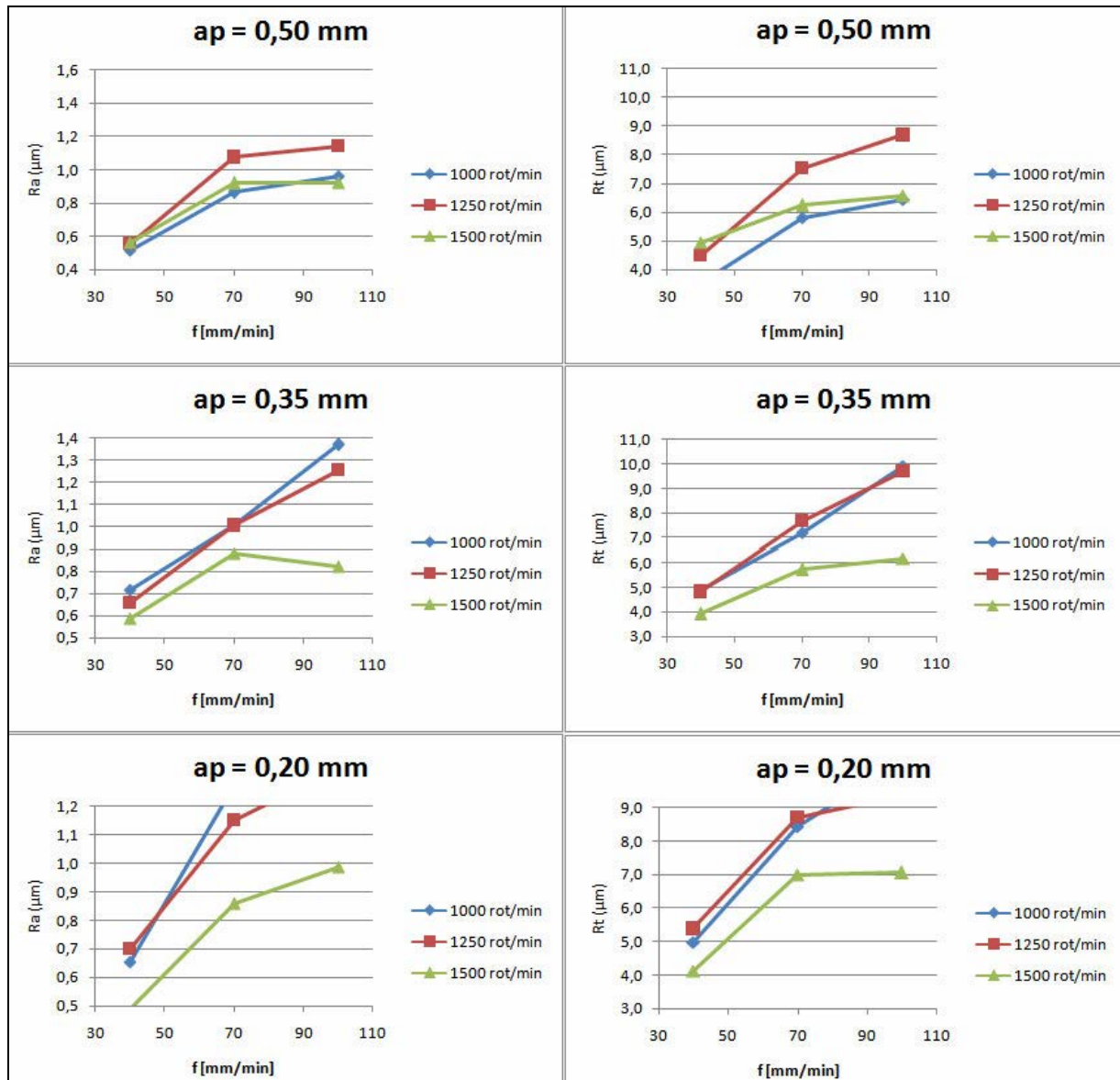
	ap₁ = 0,50 mm			ap₂ = 0,35 mm			ap₃ = 0,2 mm		
Avanço (mm/min)	40	70	100	40	70	100	40	70	100
medida 1	0,481	0,907	0,983	0,608	0,839	0,822	0,559	0,956	0,874
medida 2	0,515	0,842	1,038	0,644	0,91	0,804	0,545	0,942	0,985
medida 3	0,47	0,831	0,945	0,507	0,893	0,837	0,587	0,859	0,904
MÉDIA	0,489	0,86	0,989	0,586	0,881	0,821	0,564	0,919	0,921

Quadro 24 – Rugosidades totais (R_t) medidas no CDP6

	ap₁ = 0,50 mm			ap₂ = 0,35 mm			ap₃ = 0,2 mm		
Avanço (mm/min)	40	70	100	40	70	100	40	70	100
medida 1	4,761	7,227	5,945	3,827	5,67	6,116	6,885	7,074	6,848
medida 2	3,845	6,897	7,678	4,266	5,524	5,829	4,065	6,03	6,427
medida 3	3,778	6,867	7,556	3,668	5,988	6,58	3,919	5,603	6,452
MÉDIA	4,128	6,997	7,060	3,920	5,727	6,175	4,956	6,236	6,576

Os gráficos de rugosidade obtidos, R_a e R_t em função da avanço, permitem analisar a influência que esse parâmetro exerce no acabamento superficial da peça torneada. Na Figura 49 é possível perceber um comportamento semelhante ao observado no caso anterior, ou seja, uma diminuição dos valores de rugosidade conforme a velocidade de corte aumenta com o aumento da rotação.

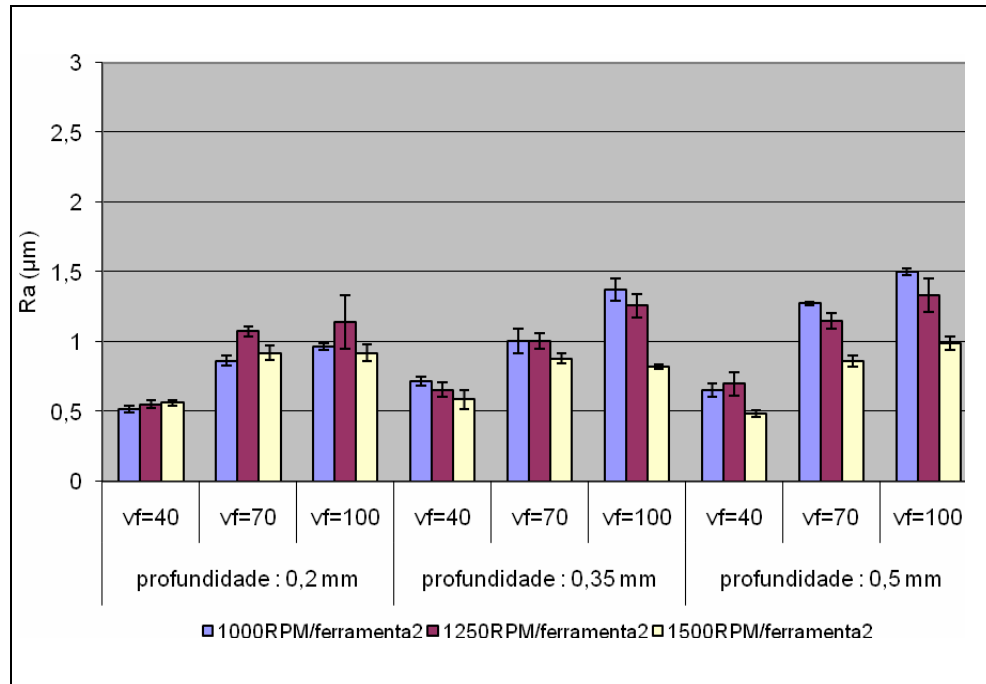
Figura 49 – Gráficos R_a e R_t versus f , para a pastilha de metal duro recoberta com TiB_2



Fonte: (o autor).

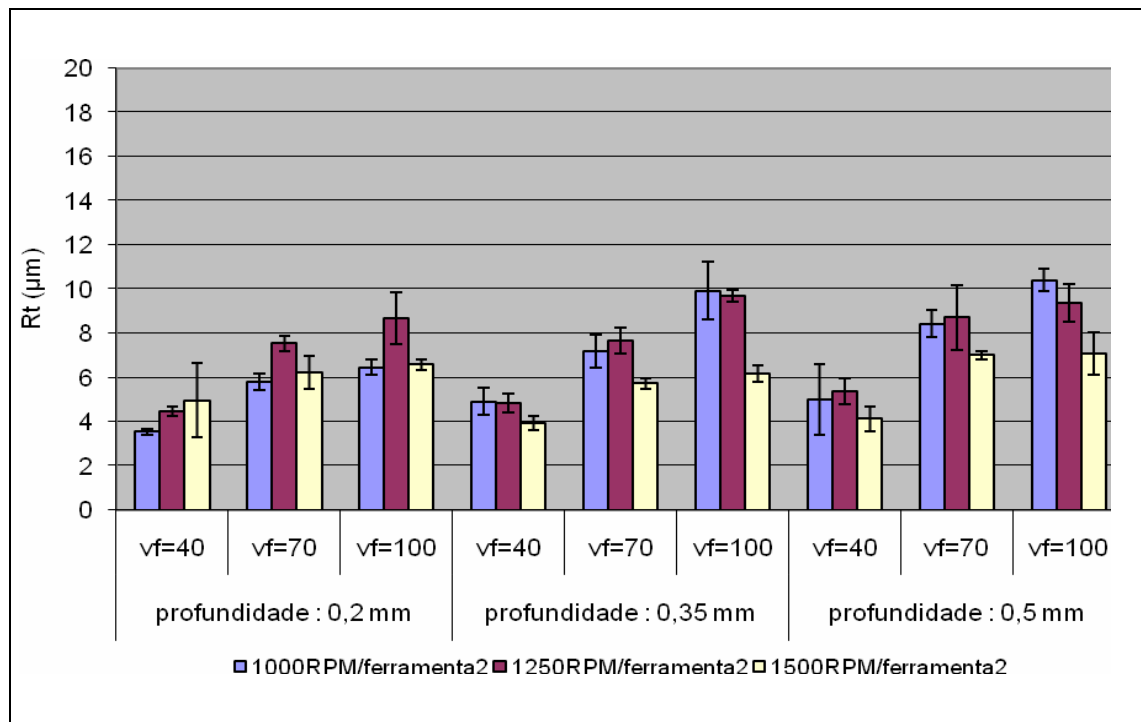
Nas Figuras 50 e 51 observa-se a variação sofrida pelos valores de R_a e R_t , respectivamente, em função do avanço e da profundidade de corte.

Figura 50 – Variação de R_a em função do avanço e da profundidade de corte, para a pastilha de metal duro recoberto com TiB_2



Fonte: (o autor).

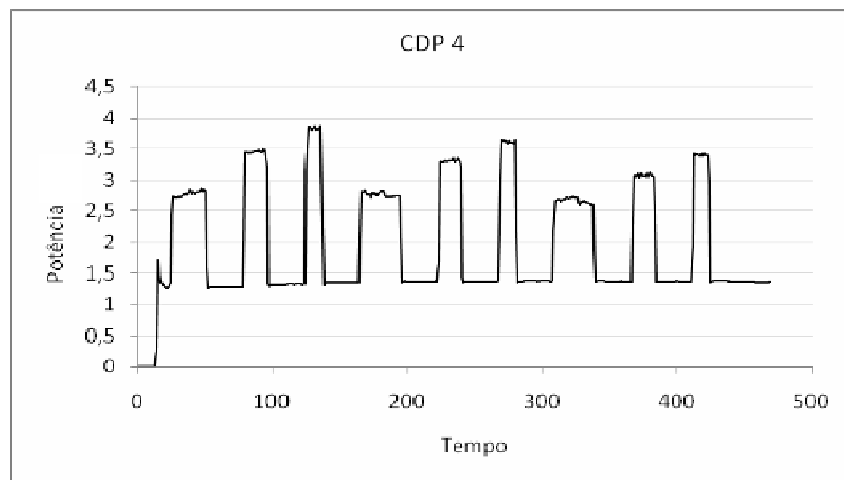
Figura 51 – Variação de R_t em função do avanço e da profundidade de corte, para a pastilha de metal duro recoberto com TiB_2



Fonte: (o autor).

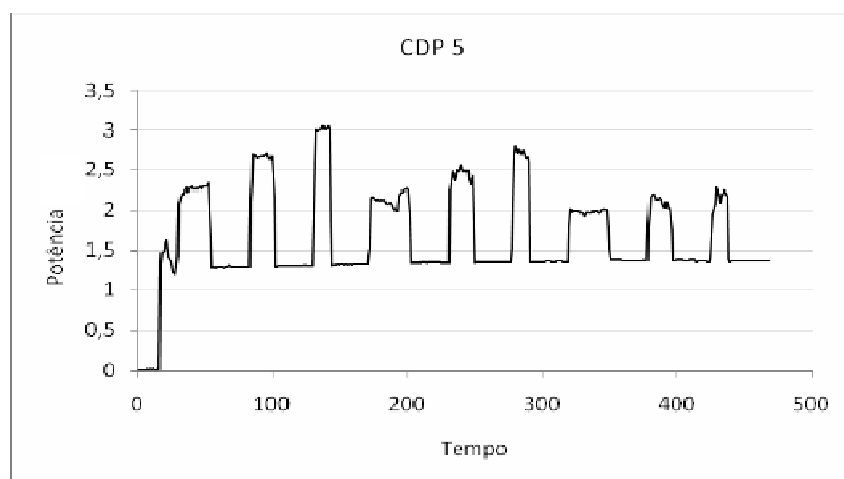
As potências requeridas para usinagem dos corpos de prova 4, 5 e 6, estão disponíveis nas Figuras 52, 53 e 54. Novamente nota-se a ocorrência de um aumento na potência requerida de usinagem conforme aumenta o avanço, para uma dada profundidade de corte; e a diminuição da potência requerida conforme diminui a profundidade de corte, para um dado avanço. O comportamento observado e descrito no caso anterior é repetido para os três corpos de prova usinados utilizando-se pastilha de metal duro recoberto com TiB_2 .

Figura 52 – Potência requerida para o torneamento do CDP4



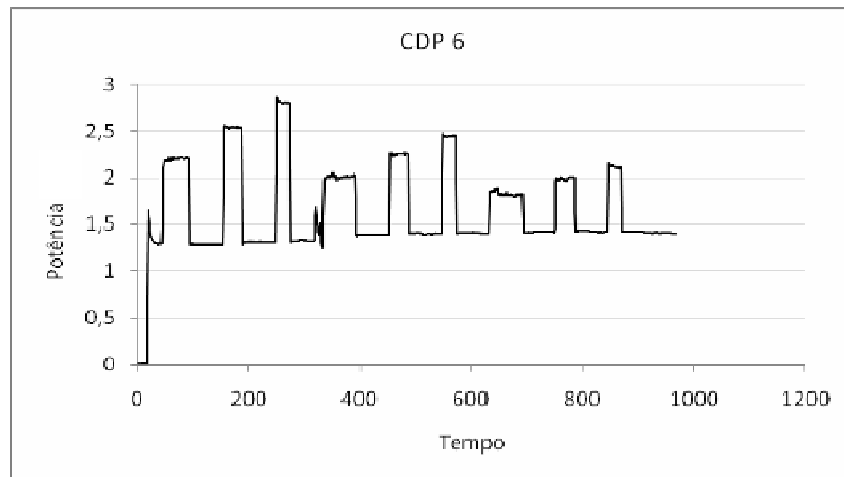
Fonte: (o autor).

Figura 53 – Potência requerida para o torneamento do CDP5



Fonte: (o autor).

Figura 54 – Potência requerida para o torneamento do CDP6



Fonte: (o autor).

A partir dos dados coletados dos gráficos das Figuras 52, 53 e 54, foram calculadas as potências requeridas para a ferramenta de metal duro com recobrimento de TiB_2 (ferramenta 2), conforme Quadro 25 abaixo:

Quadro 25 – Valores de potência requerida para o torneamento, em *Watts*

Avanço [mm/min]	$ap_1 = 0,50$ mm			$ap_2 = 0,35$ mm			$ap_3 = 0,20$ mm		
	40	70	100	40	70	100	40	70	100
CDP4	157,26	221,02	258,77	153,93	205,33	237,21	144,82	186,11	214,54
CDP5	104,54	143,40	176,80	97,66	127,71	152,71	72,26	90,98	98,87
CDP6	93,00	127,61	157,47	75,39	97,35	118,30	59,00	72,26	85,82
Média	118,27	164,01	197,68	108,99	143,47	169,41	92,02	116,45	133,08

5.1.3 Torneamento com ferramenta de aço rápido

- Corpo de prova 7: 1000 rpm, $V_{c1} = 81,68$ m/min.

Quadro 26 – Rugosidades médias (R_a) medidas no CDP7

	ap₁ = 0,50 mm			ap₂ = 0,35 mm			ap₃ = 0,2 mm		
Avanço (mm/min)	40	70	100	40	70	100	40	70	100
medida 1	1,481	1,854	1,503	1,753	1,954	2,031	2,05	2,317	2,021
medida 2	1,537	1,717	1,817	1,675	2,256	1,855	2,095	2,084	1,878
medida 3	1,269	1,752	1,901	1,858	2,122	1,748	2,452	2,648	2,385
MÉDIA	1,429	1,774	1,740	1,762	2,111	1,878	2,199	2,350	2,095

Quadro 27 – Rugosidades totais (R_t) medidas no CDP7

	ap₁ = 0,50 mm			ap₂ = 0,35 mm			ap₃ = 0,2 mm		
Avanço (mm/min)	40	70	100	40	70	100	40	70	100
medida 1	9,082	13,5	10,61	11,59	12,8	13,65	15,42	18,23	16,02
medida 2	12,23	13,39	15,08	10,9	14,91	13,57	14,26	14,82	13,93
medida 3	9,833	16,27	15,83	16,28	14,33	17,31	15,94	18,84	19,03
MÉDIA	10,382	14,387	13,84	12,923	14,013	14,843	15,207	17,297	16,327

- Corpo de prova 8: 1250 rpm, $V_{c2} = 102,10$ m/min.

Quadro 28 – Rugosidades médias (R_a) medidas no CDP8

	ap₁ = 0,50 mm			ap₂ = 0,35 mm			ap₃ = 0,2 mm		
Avanço (mm/min)	40	70	100	40	70	100	40	70	100
medida 1	1,146	0,656	0,755	1,758	1,316	1,51	1,866	1,725	1,611
medida 2	1,227	0,656	0,751	1,772	1,243	1,421	2,205	1,598	1,451
medida 3	1,248	0,726	0,716	1,487	1,268	1,174	2,005	1,573	1,582
MÉDIA	1,207	0,680	0,741	1,672	1,276	1,368	2,025	1,632	1,548

Quadro 29 – Rugosidades totais (R_t) medidas no CDP8

	ap₁ = 0,50 mm			ap₂ = 0,35 mm			ap₃ = 0,2 mm		
Avanço (mm/min)	40	70	100	40	70	100	40	70	100
medida 1	8,686	5,213	5,713	10,6	7,91	9,919	13,3	12,01	12,56
medida 2	10,76	5,524	5,603	10,9	7,636	8,789	14,55	11,49	10,27
medida 3	9,253	5,292	6,152	9,973	12,48	9,21	13,61	10,42	10,89
MÉDIA	9,566	5,343	5,823	10,491	9,342	9,306	13,82	11,307	11,24

○ Corpo de prova 9: 1500 rpm, $V_{c3} = 122,52$ m/min.

Quadro 30 – Rugosidades médias (R_a) medidas no CDP9

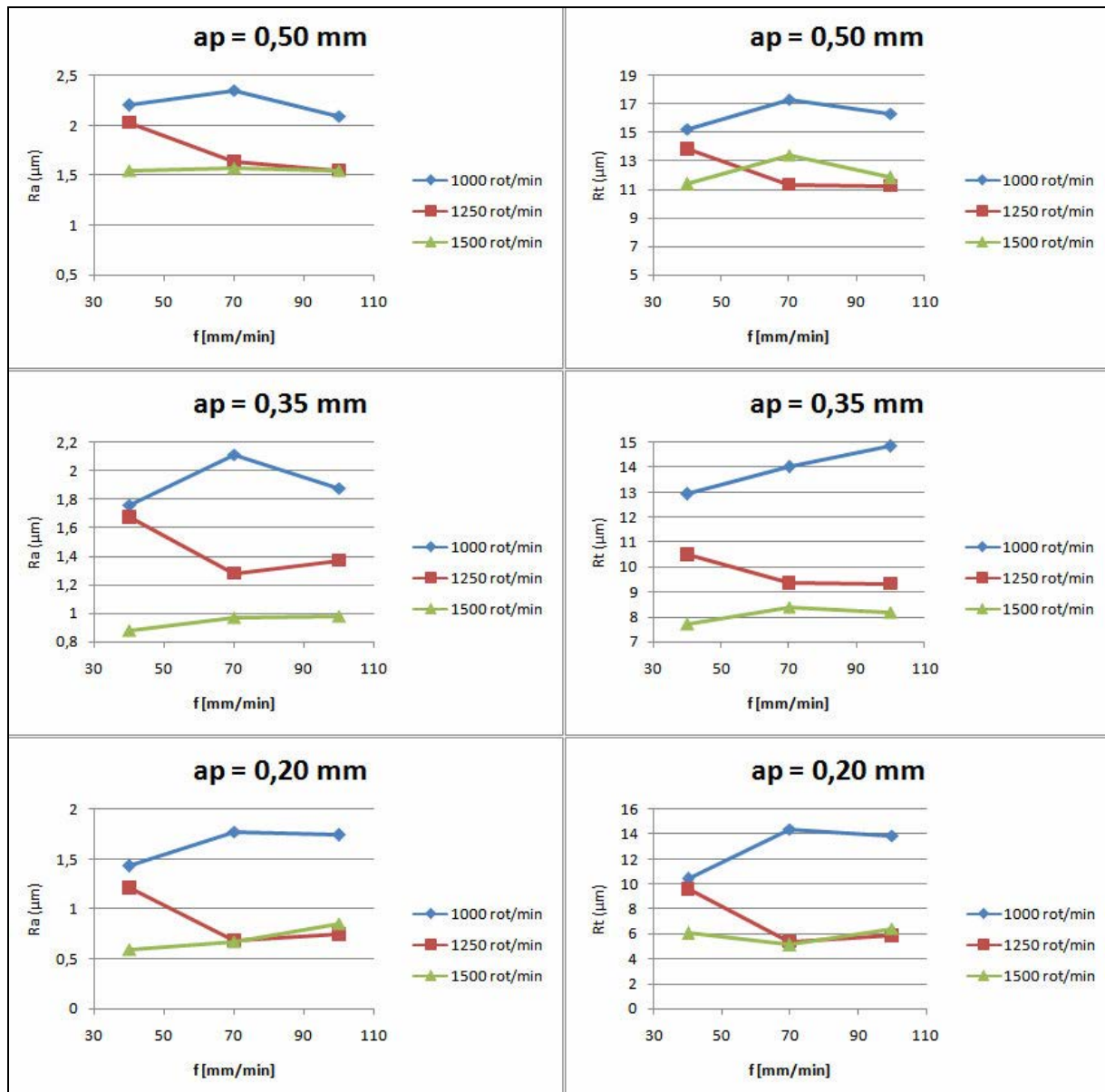
	ap₁ = 0,50 mm			ap₂ = 0,35 mm			ap₃ = 0,2 mm		
Avanço (mm/min)	40	70	100	40	70	100	40	70	100
medida 1	0,608	0,607	0,926	0,932	1,002	1,028	1,58	1,5	1,457
medida 2	0,645	0,669	0,772	0,831	0,973	0,924	1,582	1,658	1,657
medida 3	0,538	0,748	0,848	0,88	0,938	0,982	1,467	1,555	1,533
MÉDIA	0,597	0,675	0,849	0,881	0,971	0,978	1,543	1,571	1,549

Quadro 31 – Rugosidades totais (R_t) medidas no CDP9

	ap₁ = 0,50 mm			ap₂ = 0,35 mm			ap₃ = 0,2 mm		
Avanço (mm/min)	40	70	100	40	70	100	40	70	100
medida 1	7,3	4,968	6,781	6,873	8,844	9,656	11,21	10,98	11,16
medida 2	5,579	4,413	6,226	7,416	8,832	7,306	10,96	14,22	13,72
medida 3	5,267	5,927	6,159	8,838	7,453	7,538	11,99	14,99	10,63
MÉDIA	6,049	5,103	6,389	7,709	8,376	8,167	11,387	13,397	11,837

Os gráficos de rugosidade obtidos, R_a e R_t em função do avanço, permitem analisar a influência que esse parâmetro exerce no acabamento superficial da peça torneada. Na Figura 55 é possível perceber que os valores de rugosidade obtidos para a menor velocidade de corte e, conseqüentemente, para a rotação mais baixa, são significativamente maiores do que os demais. Ou seja, quanto menor a velocidade de corte, pior o acabamento superficial obtido.

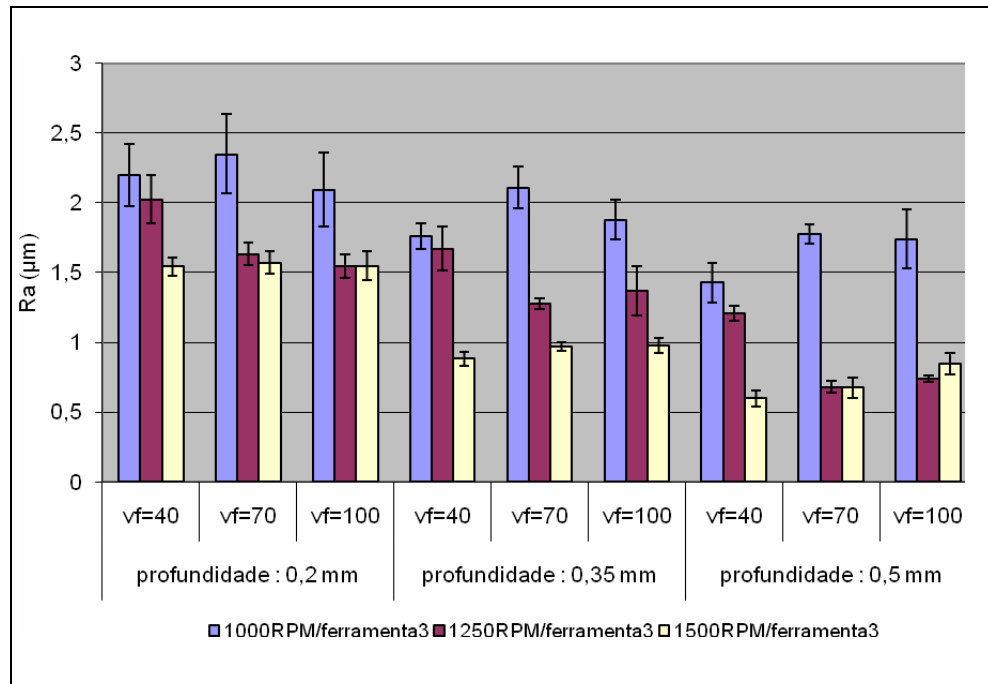
Figura 55 – Gráficos R_a e R_t versus f , para a ferramenta de aço rápido



Fonte: (o autor).

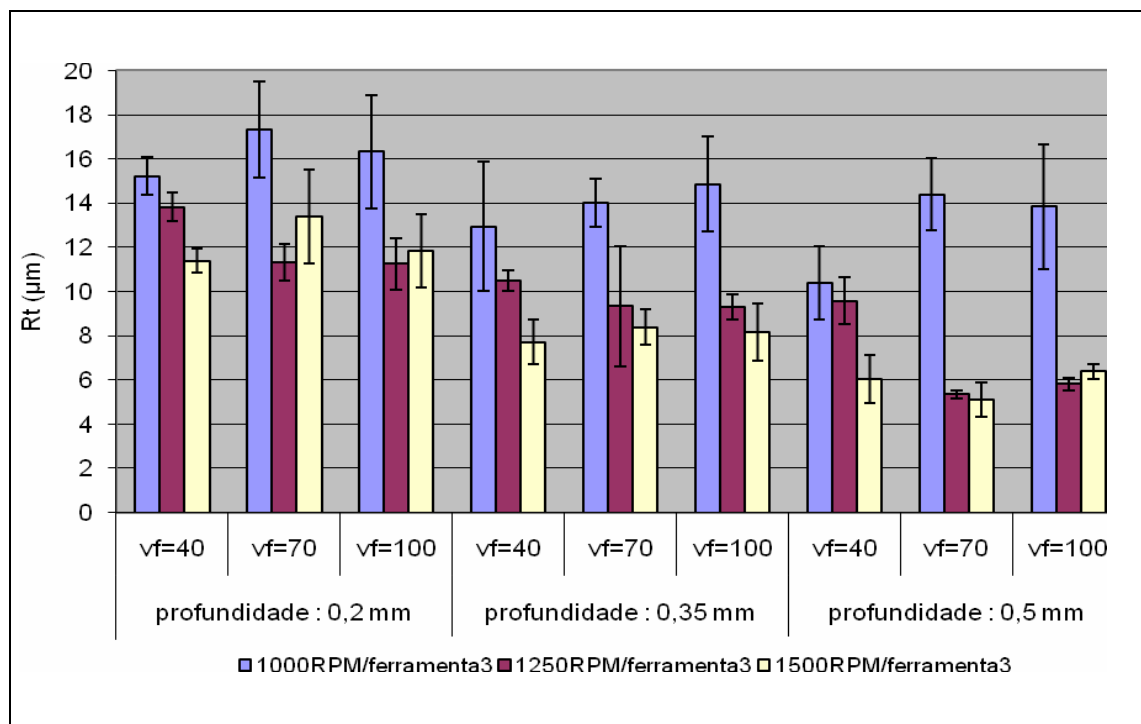
Nas Figuras 56 e 57 observa-se a variação sofrida pelos valores de R_a e R_t , respectivamente, em função do avanço e da profundidade de corte.

Figura 56 – Variação de R_a em função do avanço e da profundidade de corte, para a ferramenta de aço rápido



Fonte: (o autor).

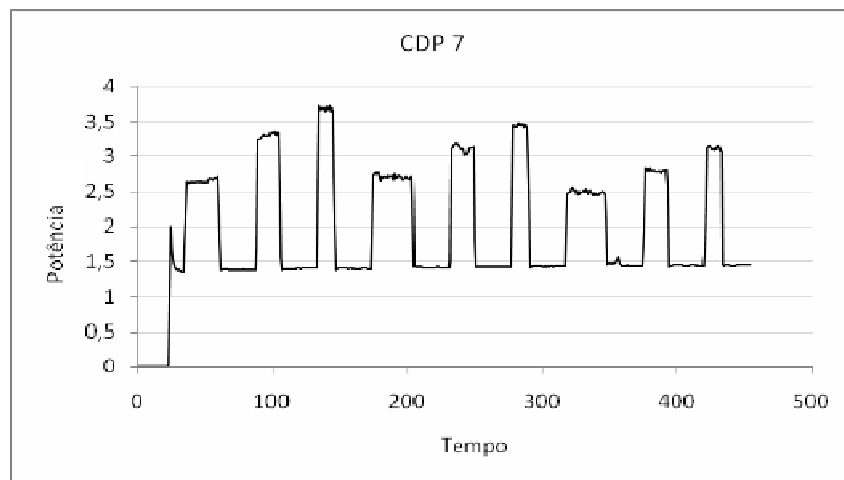
Figura 57 – Variação de R_a em função do avanço e da profundidade de corte, para a ferramenta de aço rápido



Fonte: (o autor).

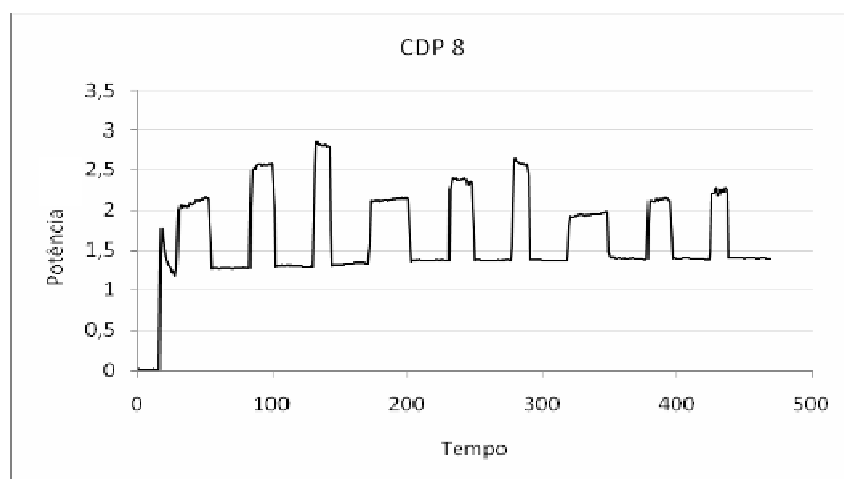
As potências requeridas para usinagem dos corpos de prova 7, 8 e 9, estão disponíveis nas Figuras 58, 59 e 60. O mesmo comportamento observado nos casos anteriores se repete, ocorre um aumento na potência requerida de usinagem conforme aumenta o avanço, para uma dada profundidade de corte; e ocorre a diminuição da potência requerida conforme diminui a profundidade de corte, para um dado avanço. O comportamento descrito é repetido para os três corpos de prova usinados utilizando-se a ferramenta de aço rápido.

Figura 58 – Potência requerida para o torneamento do CDP7



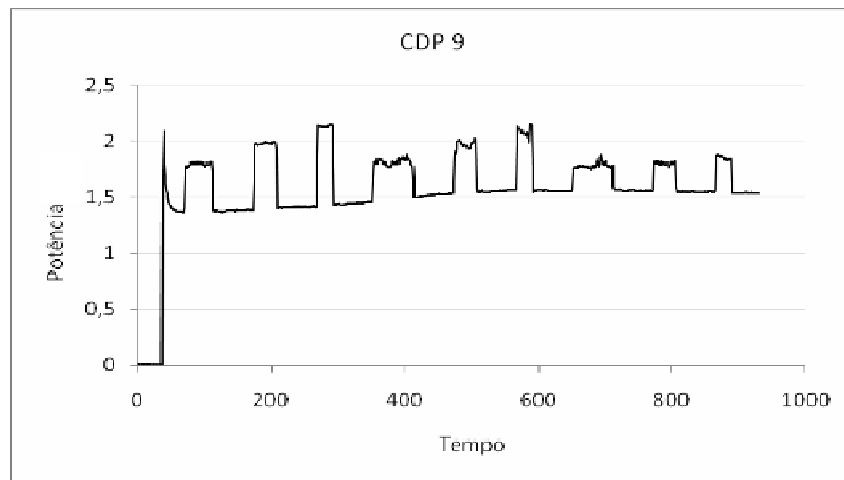
Fonte: (o autor).

Figura 59 – Potência requerida para o torneamento do CDP8



Fonte: (o autor).

Figura 60 – Potência requerida para o torneamento do CDP9



Fonte: (o autor).

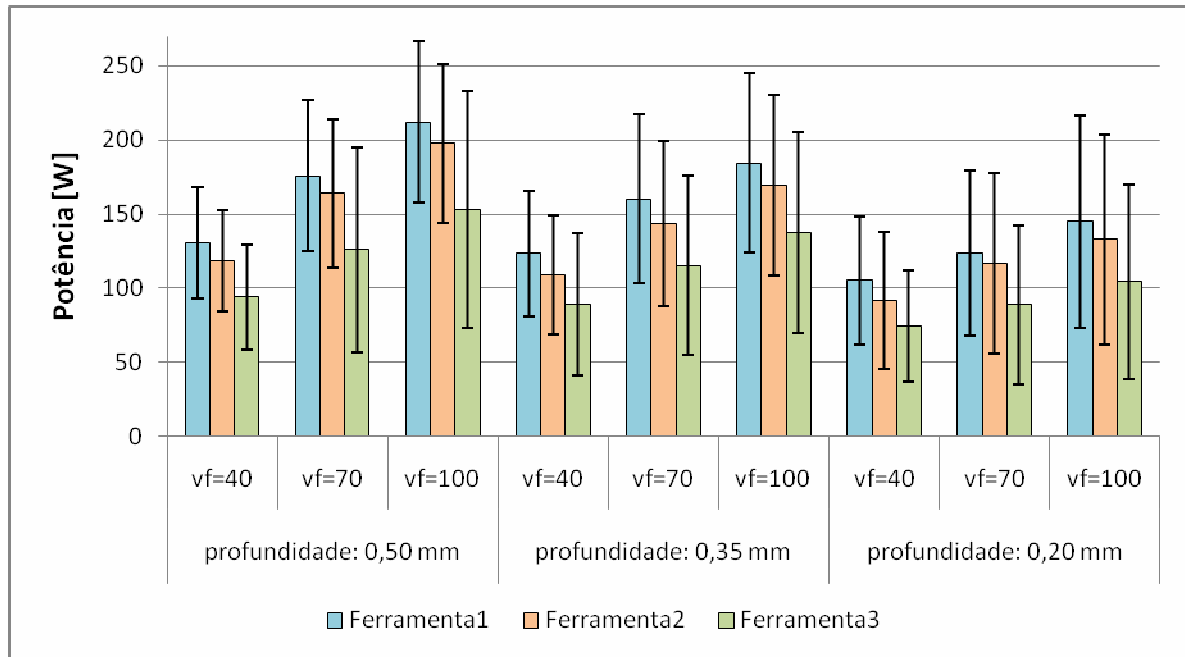
A partir dos dados coletados dos gráficos das Figuras 58, 59 e 60, foram calculadas as potências requeridas para a ferramenta de aço rápido (ferramenta 3), conforme Quadro 32 abaixo:

Quadro 32 – Valores de potência requerida para o torneamento, em *Watts*

Avanço [mm/min]	ap ₁ = 0,50 mm			ap ₂ = 0,35 mm			ap ₃ = 0,20 mm		
	40	70	100	40	70	100	40	70	100
CDP7	134,70	197,95	235,19	141,38	181,76	210,80	117,70	147,55	176,90
CDP8	78,03	119,72	147,75	77,22	101,71	125,99	57,99	76,41	87,84
CDP9	69,42	59,91	76,10	47,87	62,64	76,20	47,36	42,20	47,87
Média	94,05	125,86	153,01	88,82	115,37	137,67	74,35	88,72	104,20

As Quadros 18, 25 e 32 contêm os dados de potência para todos os casos. Conforme pode ser visto na Figura 61, para todos os casos considerados, a ferramenta de metal duro polido foi a que mais consumiu potência durante os torneamentos e a ferramenta de aço rápido, a que menos consumiu.

Figura 61 – Variação da potência requerida em função do avanço e da profundidade de corte, para as três ferramentas ensaiadas



Fonte: (o autor).

Para o CDP9 observou-se uma região em que ocorreu a formação de aresta postiça de corte (Figura 62) e, conforme era esperado por causa do comprometimento do acabamento superficial nessa região da peça, os valores de rugosidades medidos ($R_a = 4,144$ e $R_t = 43,46$) foram significativamente maiores do que aqueles provenientes de regiões não afetadas pelo problema da APC.

Figura 62 – Região com APC

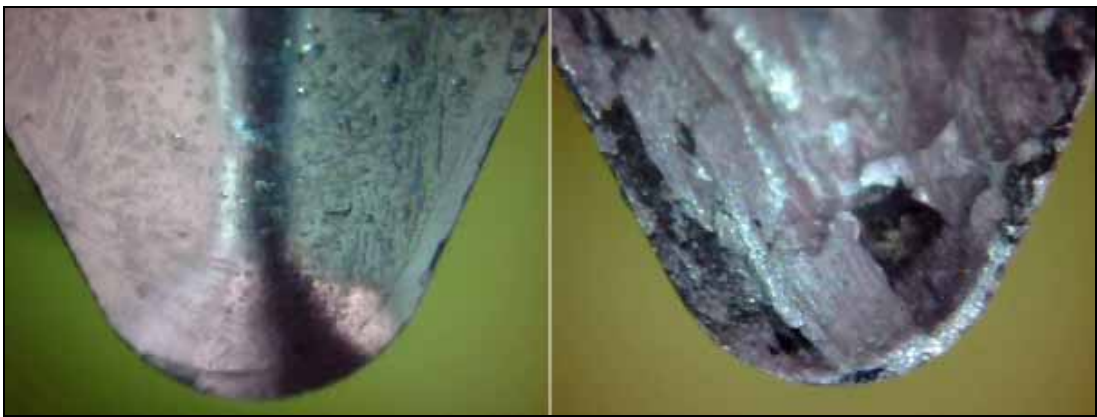


Fonte: (o autor).

5.1.4 Análise do desgaste das ferramentas

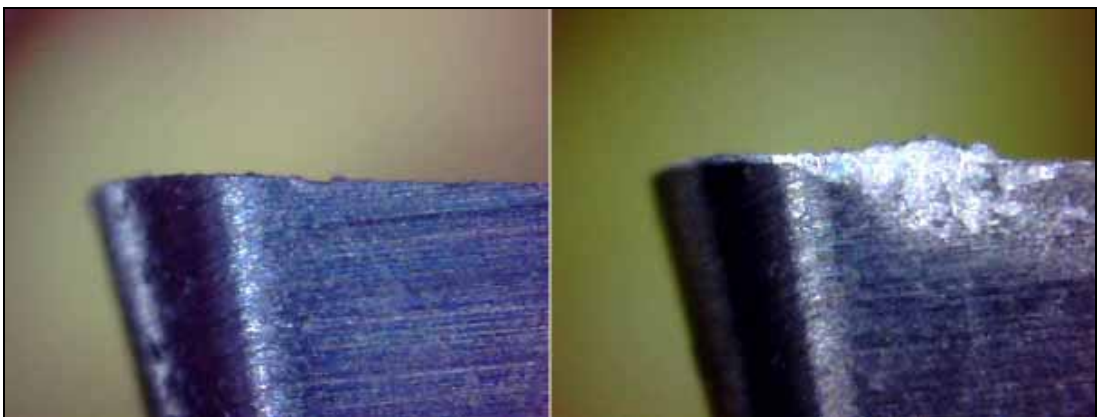
As Figuras 63 e 64 mostram a pastilha de metal duro polido antes e após o torneamento do corpo de prova 1, respectivamente. Em ambas as imagens é notável a não ocorrência de desgaste ferramental, devido ao fato de o material usinado ser relativamente mole. No entanto, é perceptível que houve deposição de alumínio sobre a ferramenta.

Figura 63 – Pastilha de metal duro polido, nova e após usinagem do CDP1



Fonte: (o autor).

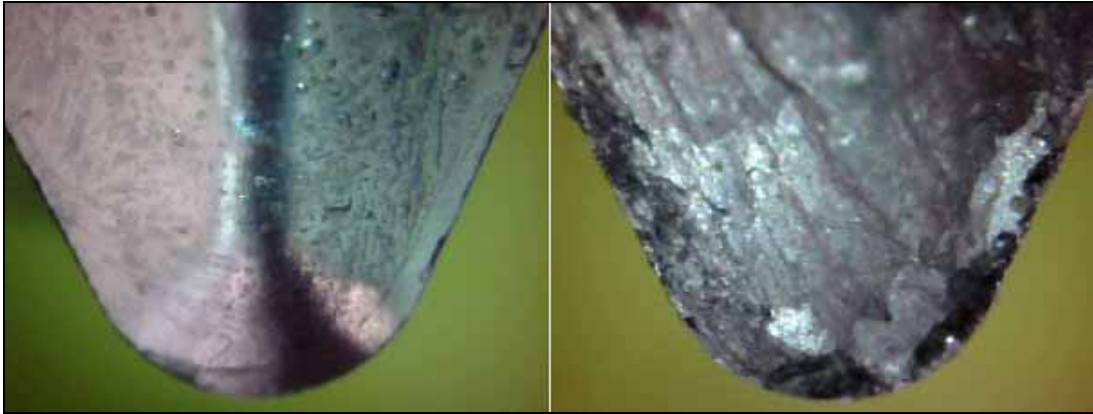
Figura 64 – Pastilha de metal duro polido, nova e após usinagem do CDP1



Fonte: (o autor).

As Figuras 65, 66 e 67 mostram a pastilha de metal duro polido antes e após o torneamento do corpo de prova 2, respectivamente. Nas três imagens é perceptível a não ocorrência de desgaste ferramental, pelo mesmo motivo descrito no caso anterior. No entanto, novamente nota-se que houve deposição de alumínio sobre a ferramenta.

Figura 65 – Pastilha de metal duro polido, nova e após usinagem do CDP2



Fonte: (o autor).

Figura 66 – Pastilha de metal duro polido, nova e após usinagem do CDP2



Fonte: (o autor).

Figura 67 – Pastilha de metal duro polido, nova e após usinagem do CDP2



Fonte: (o autor).

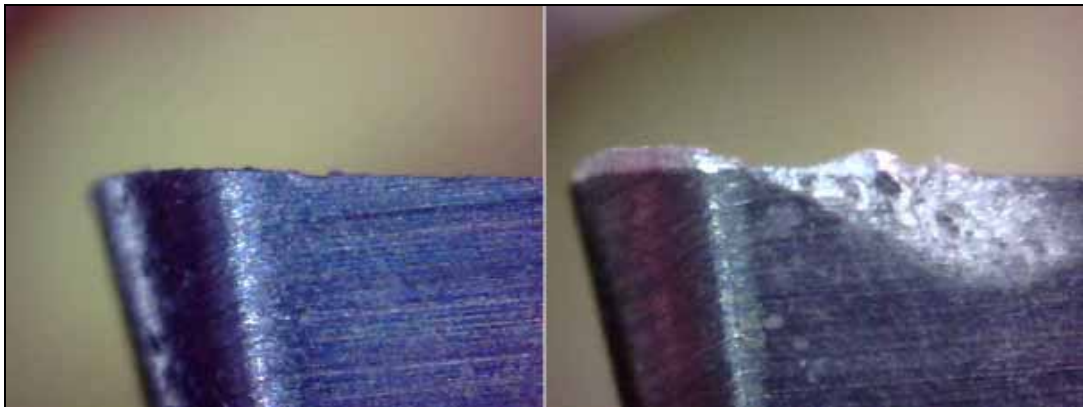
As Figuras 68, 69 e 70 mostram a pastilha de metal duro polido antes e após o torneamento do corpo de prova 3, respectivamente. As imagens mostram exatamente a mesma situação descrita nos dois casos anteriores.

Figura 68 – Pastilha de metal duro polido, nova e após usinagem do CDP3



Fonte: (o autor).

Figura 69 – Pastilha de metal duro polido, nova e após usinagem do CDP3



Fonte: (o autor).

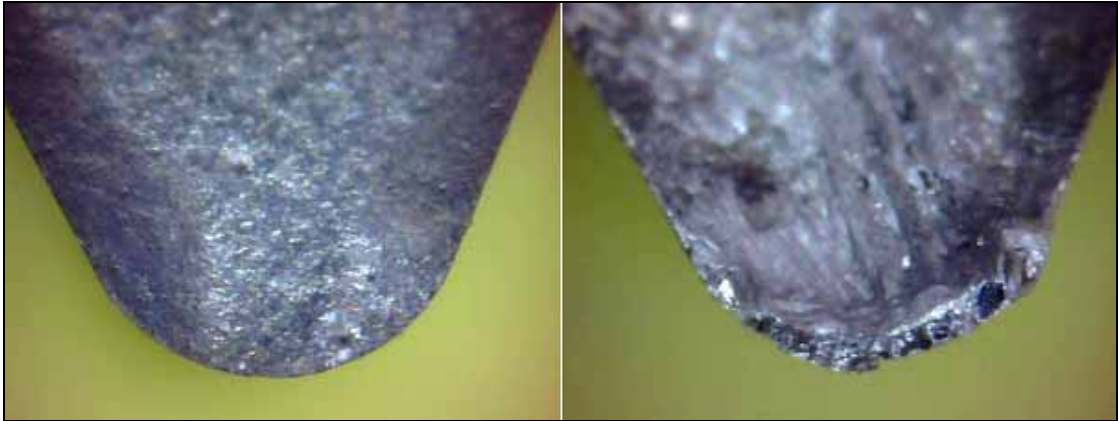
Figura 70 – Pastilha de metal duro polido, nova e após usinagem do CDP3



Fonte: (o autor).

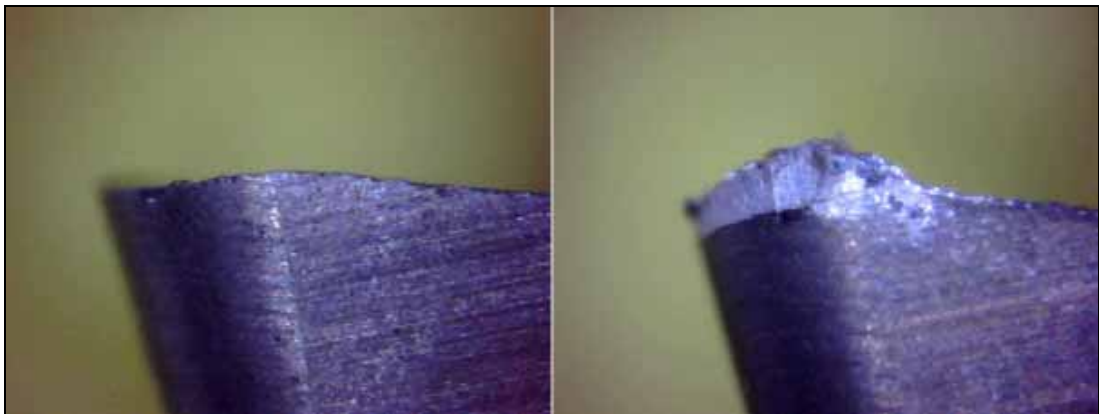
As Figuras 71, 72 e 73 mostram a pastilha de metal duro com recobrimento de TiB_2 antes e após o torneamento do corpo de prova 4, respectivamente. Em todas as imagens é possível notar que não houve desgaste ferramental, e novamente, isso se deu pelo fato de o material usinado ser relativamente mole e, por esse motivo, na provocar desgastes significativos no ferramental. Assim como nos casos anteriores, há deposição de alumínio sobre a ferramenta.

Figura 71 – Pastilha de metal duro recoberto com TiB_2 , nova e após usinagem do CDP4



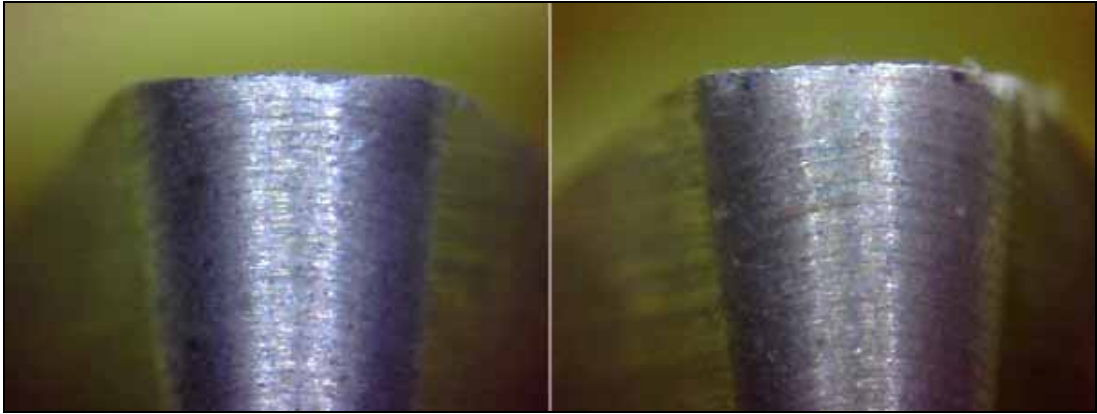
Fonte: (o autor).

Figura 72 – Pastilha de metal duro recoberto com TiB_2 , nova e após usinagem do CDP4



Fonte: (o autor).

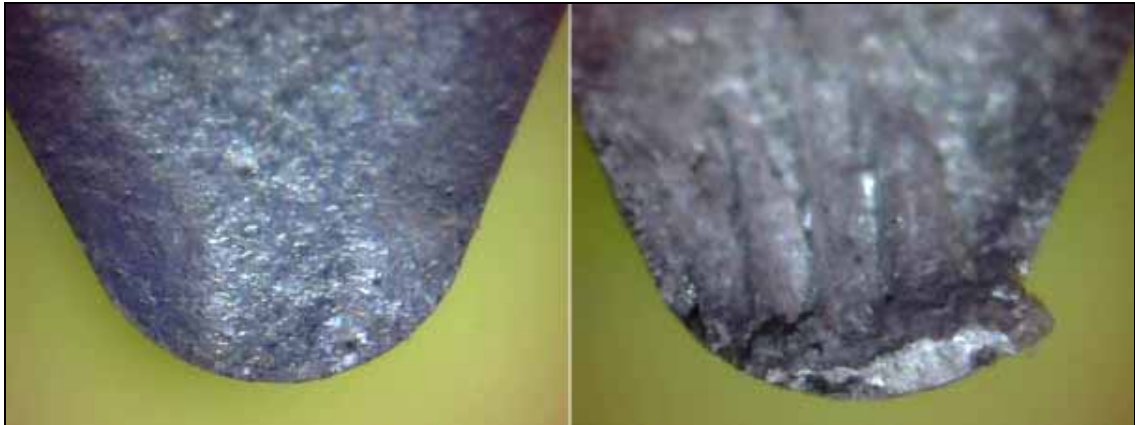
Figura 73 – Pastilha de metal duro recoberto com TiB_2 , nova e após usinagem do CDP4



Fonte: (o autor).

As Figuras 74 e 75 mostram a pastilha de metal duro recoberto com TiB_2 antes e após o torneamento do corpo de prova 5, respectivamente. Nas três imagens nota-se que, novamente, não houve desgaste ferramental, pelo motivo citado anteriormente. Mas, a deposição de alumínio sobre a ferramenta continua presente.

Figura 74 – Pastilha de metal duro recoberto com TiB_2 , nova e após usinagem do CDP5



Fonte: (o autor).

Figura 75 – Pastilha de metal duro recoberto com TiB_2 , nova e após usinagem do CDP5



Fonte: (o autor).

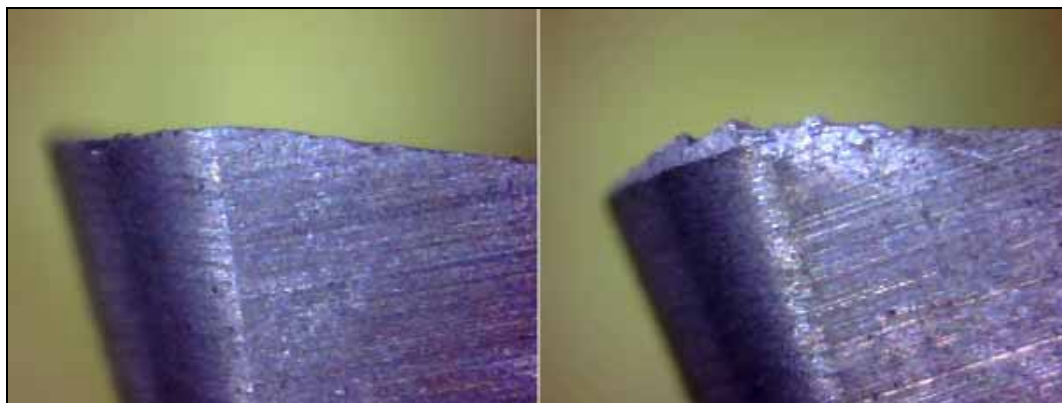
As Figuras 76, 77 e 78 mostram a pastilha de metal duro recoberto com TiB_2 antes e após o torneamento do corpo de prova 5, respectivamente. Nesse caso, também houve somente a deposição de alumínio sobre a ferramenta sem indícios de desgaste.

Figura 76 – Pastilha de metal duro recoberto com TiB_2 , nova e após usinagem do CDP6



Fonte: (o autor).

Figura 77 – Pastilha de metal duro recoberto com TiB_2 , nova e após usinagem do CDP6



Fonte: (o autor).

Figura 78 – Pastilha de metal duro recoberto com TiB_2 , nova e após usinagem do CDP6



Fonte: (o autor).

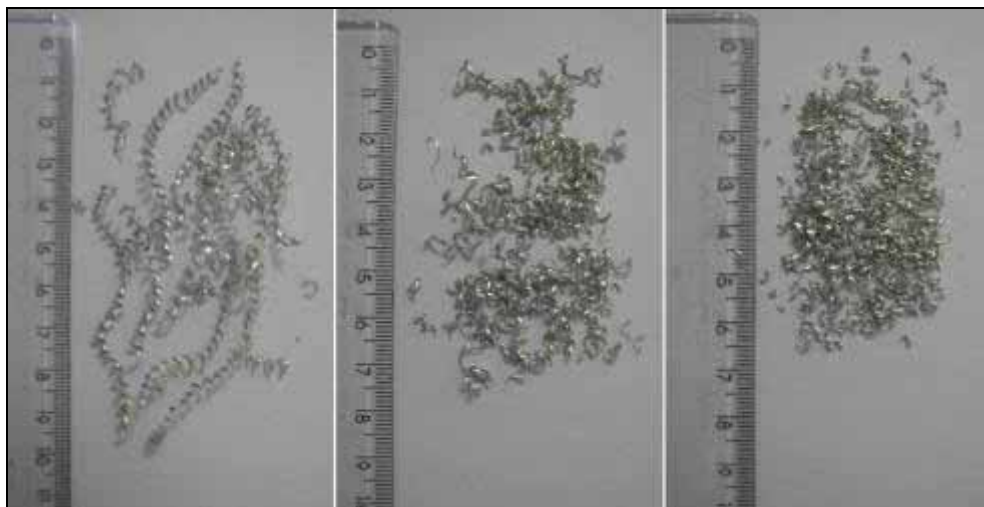
Como apenas uma ferramenta de aço rápido estava disponível e havia necessidade de afiar a mesma após o torneamento de cada CDP, para garantir que os ângulos fossem compatíveis com os das ferramentas de metal duro, não foi possível registrar o estado da ferramenta após o torneamento dos corpos de prova 7, 8 e 9. No entanto, pode-se afirmar que assim como ocorreu para as ferramentas de metal duro, não houve desgaste significativo na ferramenta de aço rápido, uma vez que o alumínio é um material macio. Provavelmente houve formação de aresta postiça de corte assim como nos outros dois casos registrados.

5.2 ANÁLISE DOS CAVACOS

- Corpo de prova 1: 1000 rpm; $V_{c1} = 81,68$ m/min.

Conforme era esperado, o aumento do avanço resultou na fragmentação do cavaco que foi de helicoidal longo para lascas, conforme se pode verificar nas Figuras 89 e 80.

Figura 79 – Pastilha de metal duro polido; profundidade de corte de 0,50 mm; avanços de 40, 70 e 100 mm/min, respectivamente



Fonte: (o autor).

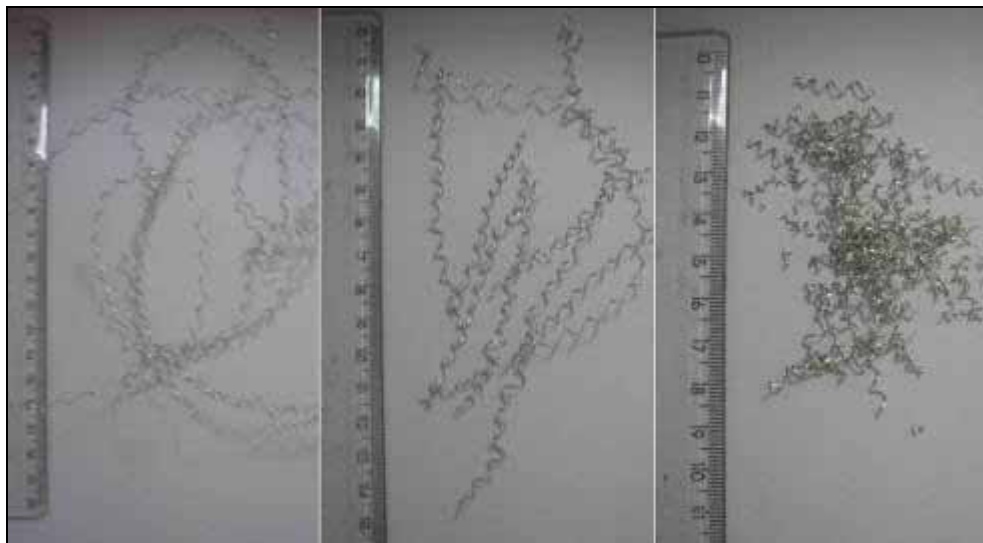
Figura 80 – Pastilha de metal duro polido; profundidade de corte de 0,35 mm; avanços de 40, 70 e 100 mm/min, respectivamente



Fonte: (o autor).

Na Figura 81 observa-se que para a menor profundidade de corte, de 0,20 mm, o cavaco se alterou de helicoidal longo para curto somente no maior avanço, de 100 mm/min.

Figura 81 – Pastilha de metal duro polido; profundidade de corte de 0,20 mm; avanços de 40, 70 e 100 mm/min, respectivamente



Fonte: (o autor).

○ Corpo de prova 2: 1250 rpm; $V_{c2} = 102,10$ m/min.

Assim como observado na Figura 81, o comportamento se repete no caso abordado na Figura 82, em que o cavaco passa de helicoidal longo para curto e finalmente sai em lascas.

Figura 82 – Pastilha de metal duro polido; profundidade de corte de 0,50 mm; avanços de 40, 70 e 100 mm/min, respectivamente



Fonte: (o autor).

Na Figura 83, o cavaco passa de curto em fita para em lascas conforme o avanço é aumentado.

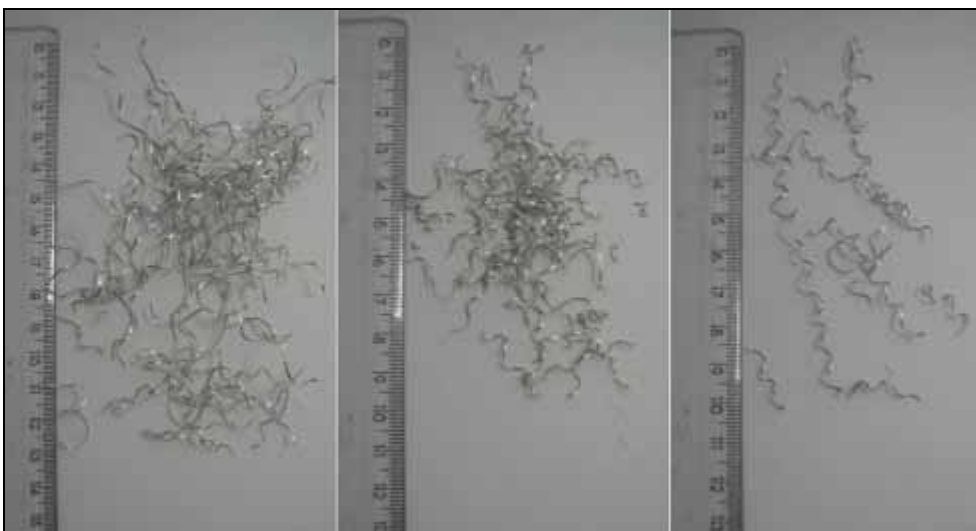
Figura 83 – Pastilha de metal duro polido; profundidade de corte de 0,35 mm; avanços de 40, 70 e 100 mm/min, respectivamente



Fonte: (o autor).

Já para o caso abordado na Figura 84, nota-se inicialmente a forma em fita e conforme o avanço aumenta, a forma tende para helicoidal curto.

Figura 84 – Pastilha de metal duro polido; profundidade de corte de 0,20 mm; avanços de 40, 70 e 100 mm/min, respectivamente

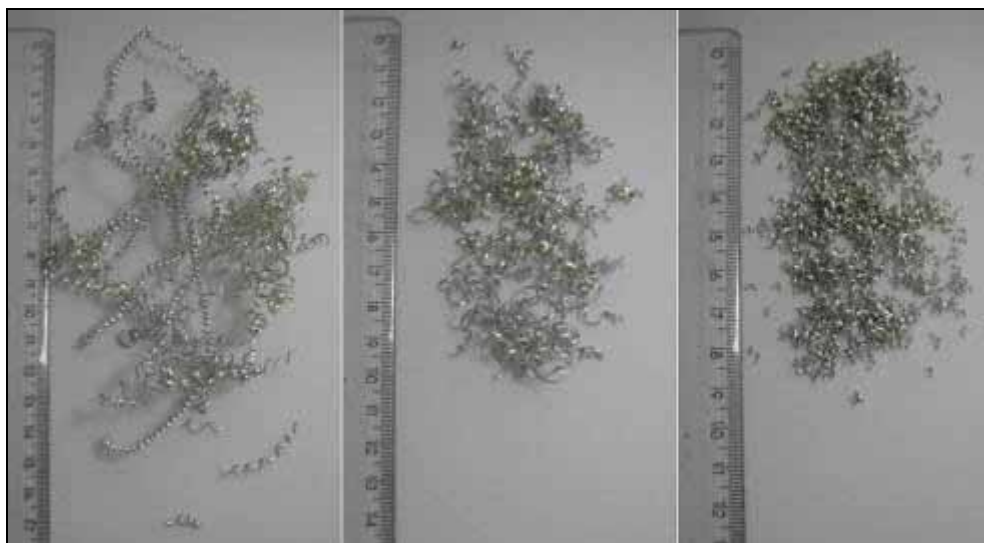


Fonte: (o autor).

- Corpo de prova 3: 1500 rpm; $V_{c3} = 122,52$ m/min.

No caso da Figura 85, é perceptível que para avanços mais baixos o cavaco assume a forma tubular longo e também tende a sair em lascas para avanços maiores.

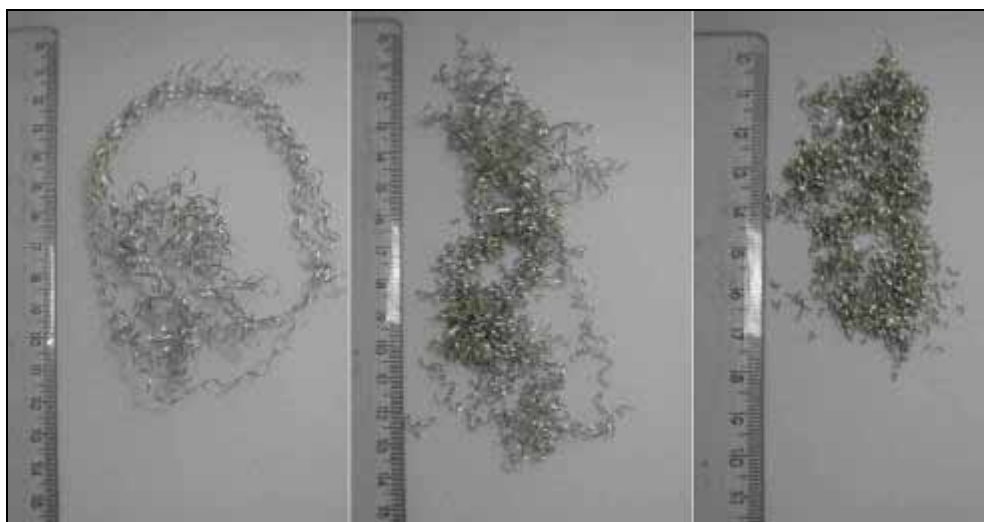
Figura 85 – Pastilha de metal duro polido; profundidade de corte de 0,50 mm; avanços de 40, 70 e 100 mm/min, respectivamente



Fonte: (o autor).

O cavaco que inicialmente tomava a forma helicoidal longo tende a se fragmentar e sair em lascas com o aumento do avanço. Esse comportamento pode ser verificado na Figura 86.

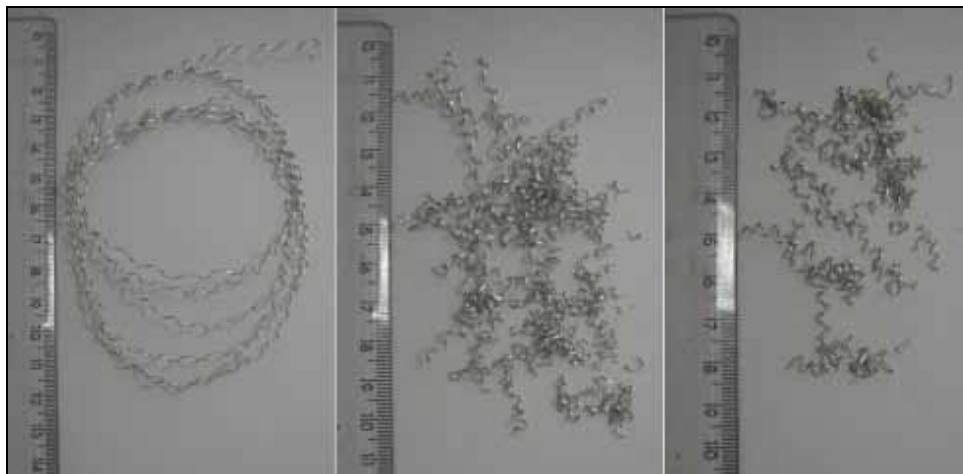
Figura 86 – Pastilha de metal duro polido; profundidade de corte de 0,35 mm; avanços de 40, 70 e 100 mm/min, respectivamente



Fonte: (o autor).

Na Figura 87 observa-se a transição da forma do cavaco de helicoidal longo para curto, conforme o avanço é aumentado.

Figura 87 – Pastilha de metal duro polido; profundidade de corte de 0,20 mm; avanços de 40, 70 e 100 mm/min, respectivamente

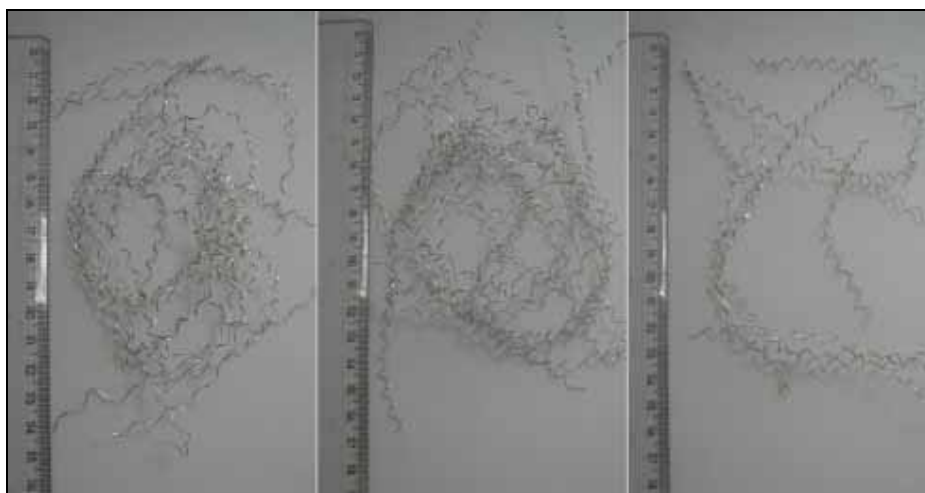


Fonte: (o autor).

○ Corpo de prova 4: 1000 rpm; $V_{c1} = 81,68$ m/min.

Para a pastilha com recobrimento de TiB_2 , observa-se na Figura 88 que o aumento do avanço promoveu uma sutil quebra no cavaco, no entanto, o mesmo continuou saindo na forma helicoidal longo.

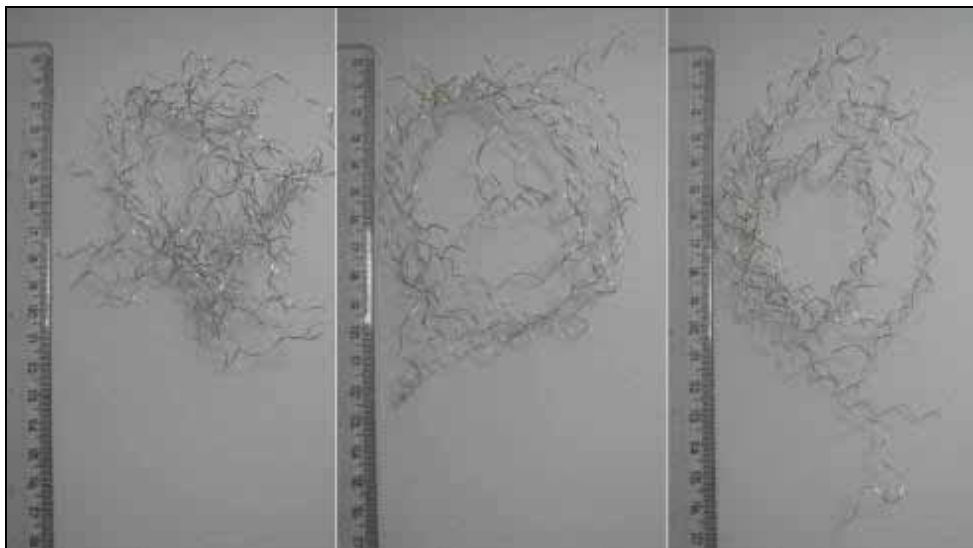
Figura 88 – Pastilha de metal duro recoberta com TiB_2 ; profundidade de corte de 0,50 mm; avanços de 40, 70 e 100 mm/min, respectivamente



Fonte: (o autor).

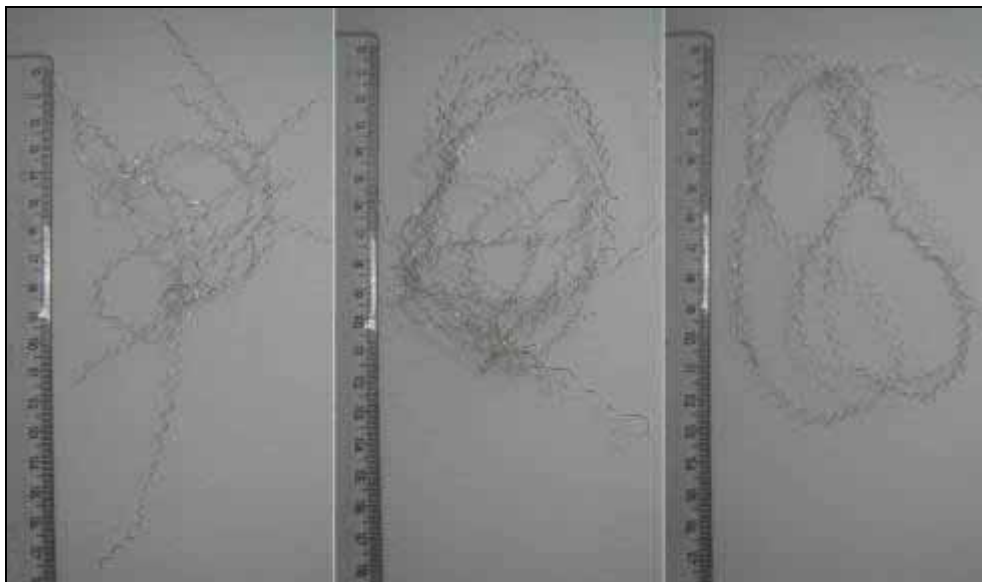
Da mesma maneira que no caso anterior, as Figuras 89 e 90 mostram que a forma do cavaco não se alterou significativamente com o aumento do avanço.

Figura 89 – Pastilha de metal duro recoberta com TiB_2 ; profundidade de corte de 0,35 mm; avanços de 40, 70 e 100 mm/min, respectivamente



Fonte: (o autor).

Figura 90 – Pastilha de metal duro recoberta com TiB_2 ; profundidade de corte de 0,20 mm; avanços de 40, 70 e 100 mm/min, respectivamente

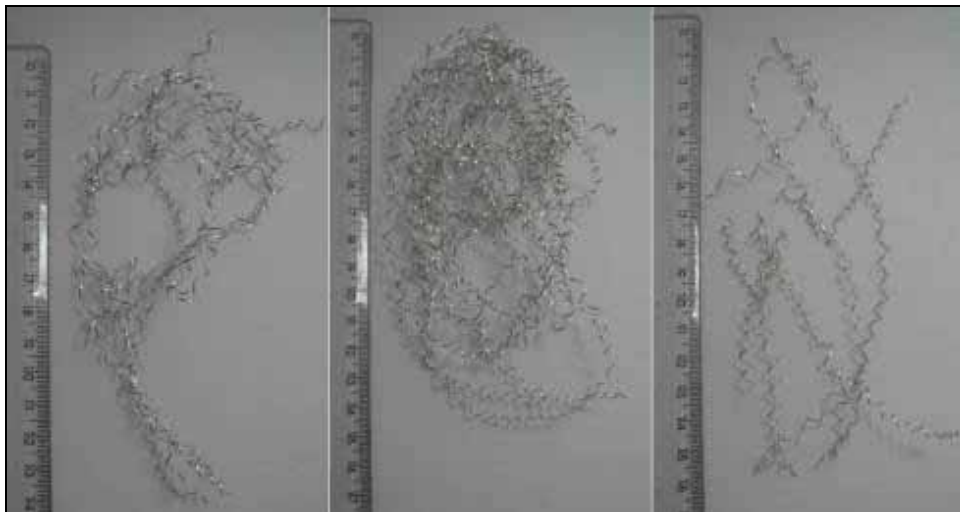


Fonte: (o autor).

- Corpo de prova 5: 1250 rpm; $V_{c2} = 102,10$ m/min.

Ainda com o mesmo comportamento observado anteriormente, na Figura 91 observa-se um cavaco longo para os três valores de avanço adotados.

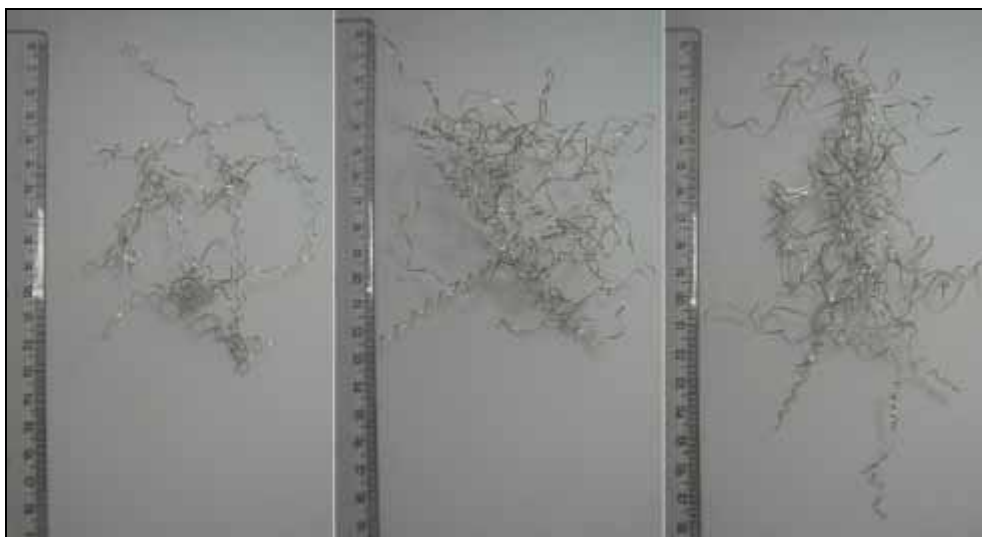
Figura 91 – Pastilha de metal duro recoberta com TiB_2 ; profundidade de corte de 0,50 mm; avanços de 40, 70 e 100 mm/min, respectivamente



Fonte: (o autor).

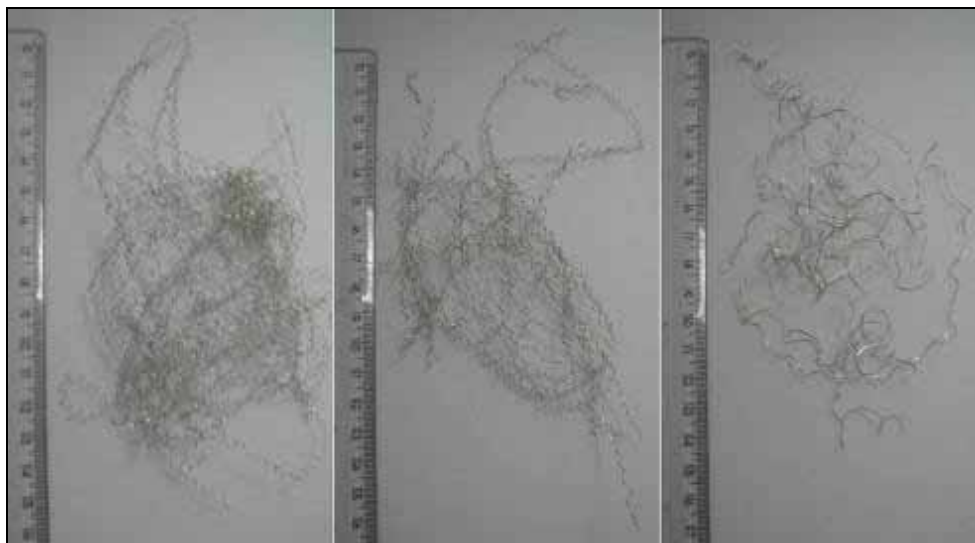
Nas Figuras 92 e 93 observa-se que o cavaco saiu emaranhado independente do avanço adotado.

Figura 92 – Pastilha de metal duro recoberta com TiB_2 ; profundidade de corte de 0,35 mm; avanços de 40, 70 e 100 mm/min, respectivamente



Fonte: (o autor).

Figura 93 – Pastilha de metal duro recoberta com TiB_2 ; profundidade de corte de 0,20 mm; avanços de 40, 70 e 100 mm/min, respectivamente



Fonte: (o autor).

○ Corpo de prova 6: 1500 rpm; $V_{c3} = 122,52$ m/min.

Já para o caso abordado na Figura 94, o cavaco saiu emaranhado no início mas para o maior avanço utilizado, obteve-se um cavaco em lascas.

Figura 94 – Pastilha de metal duro recoberta com TiB_2 ; profundidade de corte de 0,50 mm; avanços de 40, 70 e 100 mm/min, respectivamente



Fonte: (o autor).

Nos casos das Figuras 95 e 96, a forma predominante de cavaco obtido foi em fita e emaranhado, respectivamente.

Figura 95 – Pastilha de metal duro recoberta com TiB_2 ; profundidade de corte de 0,35 mm; avanços de 40, 70 e 100 mm/min, respectivamente



Fonte: (o autor).

Figura 96 – Pastilha de metal duro recoberta com TiB_2 ; profundidade de corte de 0,20 mm; avanços de 40, 70 e 100 mm/min, respectivamente

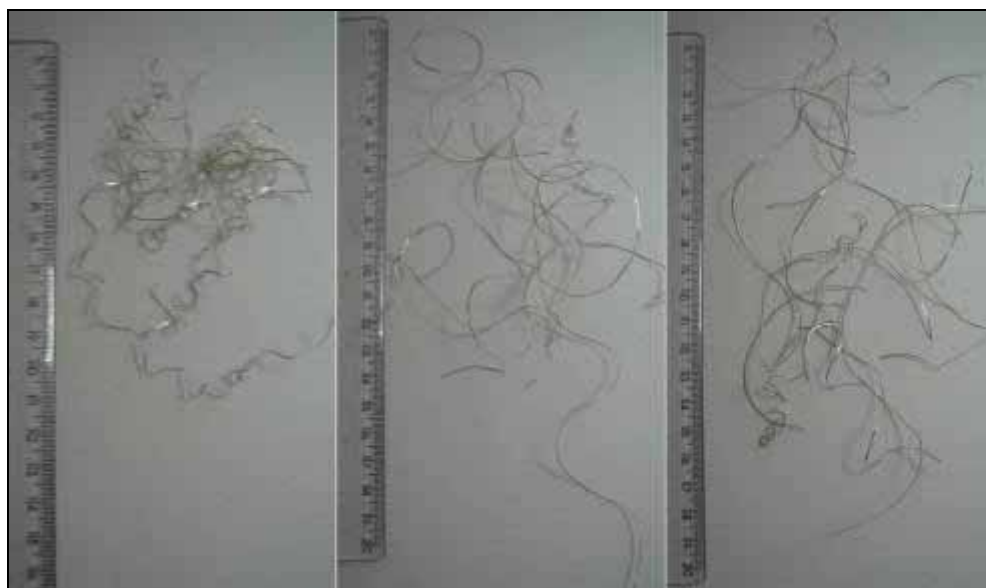


Fonte: (o autor).

- Corpo de prova 7: 1000 rpm; $V_{c1} = 81,68$ m/min.

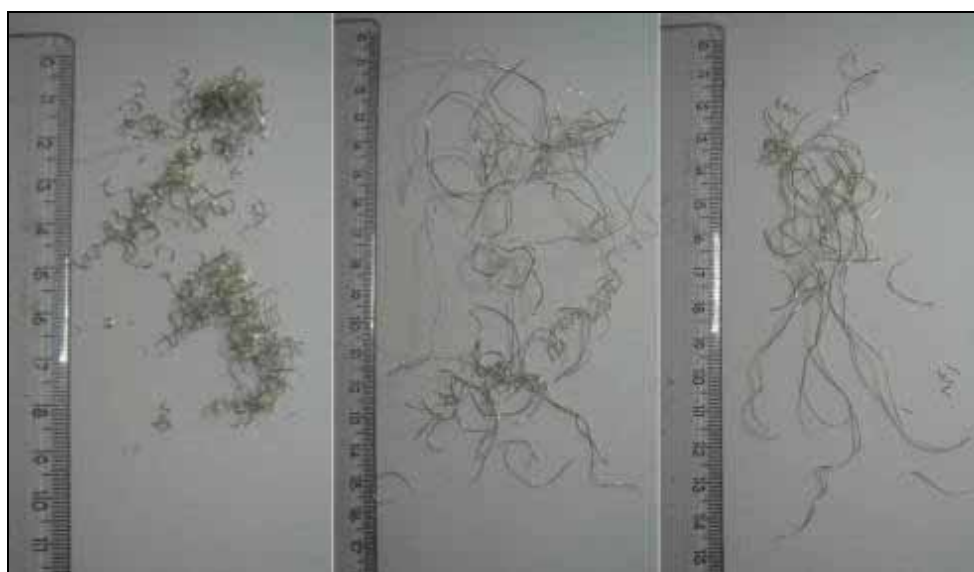
A ferramenta de aço rápido, assim como a anterior, também não promoveu a quebra de cavaco. Nas Figuras 97, 98 e 99 é possível perceber que predominaram as formas de cavaco em fita e emaranhado.

Figura 97 – Ferramenta de aço rápido; profundidade de corte de 0,50 mm; avanços de 40, 70 e 100 mm/min, respectivamente



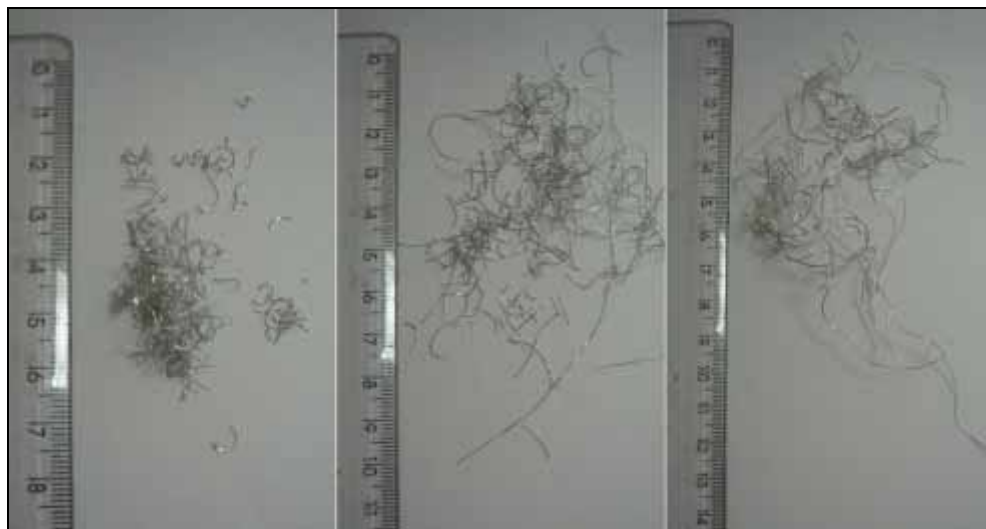
Fonte: (o autor).

Figura 98 – Ferramenta de aço rápido; profundidade de corte de 0,35 mm; avanços de 40, 70 e 100 mm/min, respectivamente



Fonte: (o autor).

Figura 99 – Ferramenta de aço rápido; profundidade de corte de 0,20 mm; avanços de 40, 70 e 100 mm/min, respectivamente

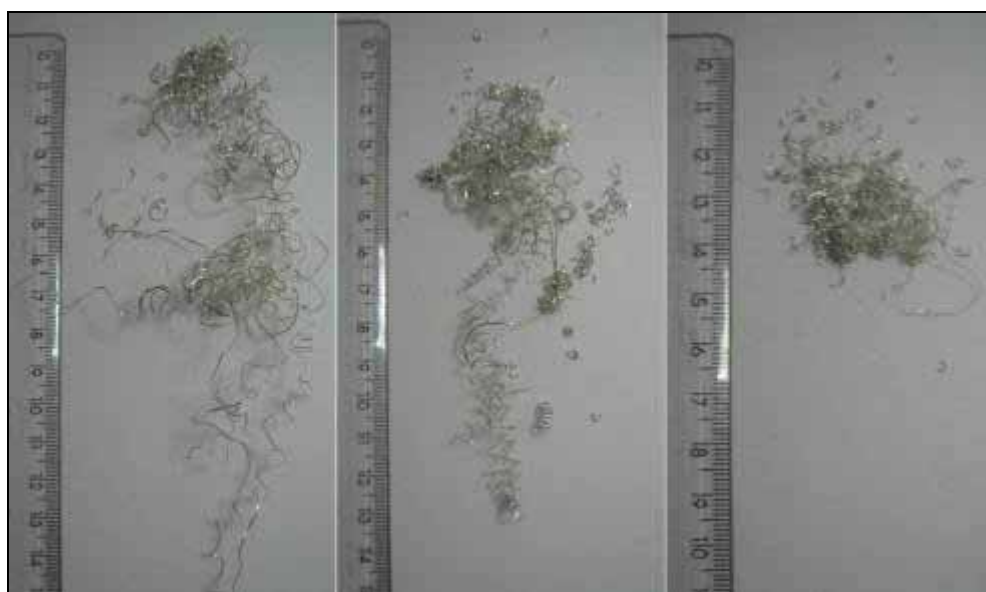


Fonte: (o autor).

○ Corpo de prova 8: 1250 rpm; $V_{c2} = 102,10$ m/min.

A partir da Figura 100 nota-se que houve fragmentação do cavaco conforme o avanço aumentou. Para este caso o cavaco saiu inicialmente emaranhado e para avanços maiores, em lascas.

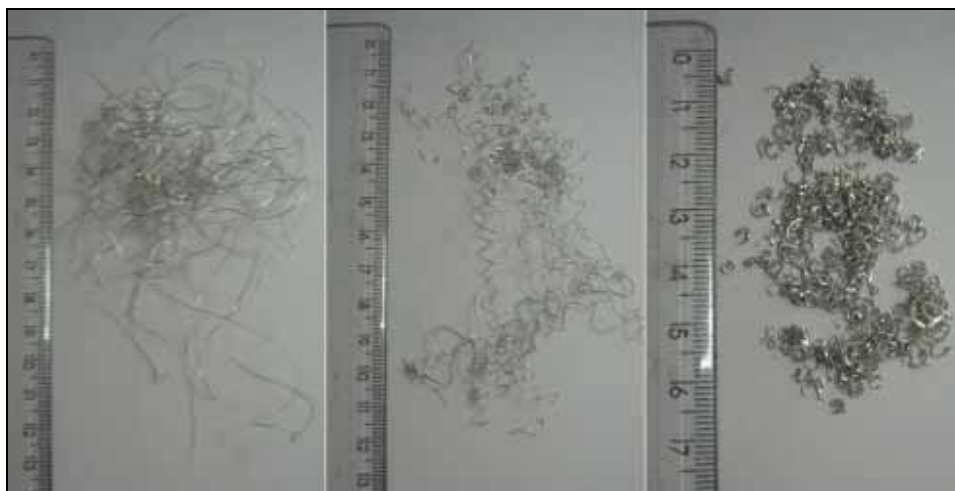
Figura 100 – Ferramenta de aço rápido; profundidade de corte de 0,50 mm; avanços de 40, 70 e 100 mm/min, respectivamente



Fonte: (o autor).

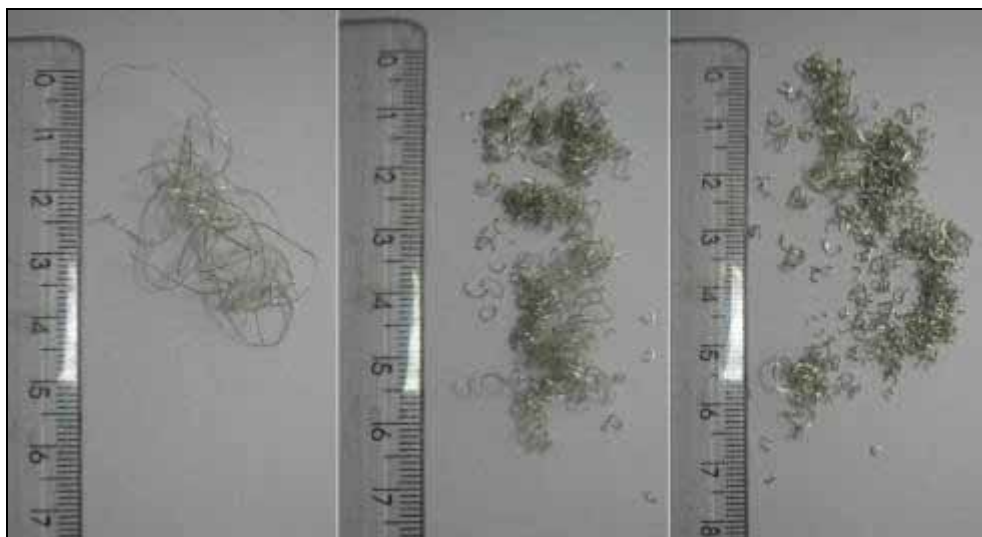
Assim como no caso anterior, observa-se nas Figuras 101 e 102, que ocorreu a fragmentação do cavaco conforme o avanço aumentou. No entanto, para o avanço mais baixo adotado obteve-se cavaco em forma de fita.

Figura 101 – Ferramenta de aço rápido; profundidade de corte de 0,35 mm; avanços de 40, 70 e 100 mm/min, respectivamente



Fonte: (o autor).

Figura 102 – Ferramenta de aço rápido; profundidade de corte de 0,20 mm; avanços de 40, 70 e 100 mm/min, respectivamente



Fonte: (o autor).

○ Corpo de prova 9: 1500 rpm; $V_{c3} = 122,52$ m/min.

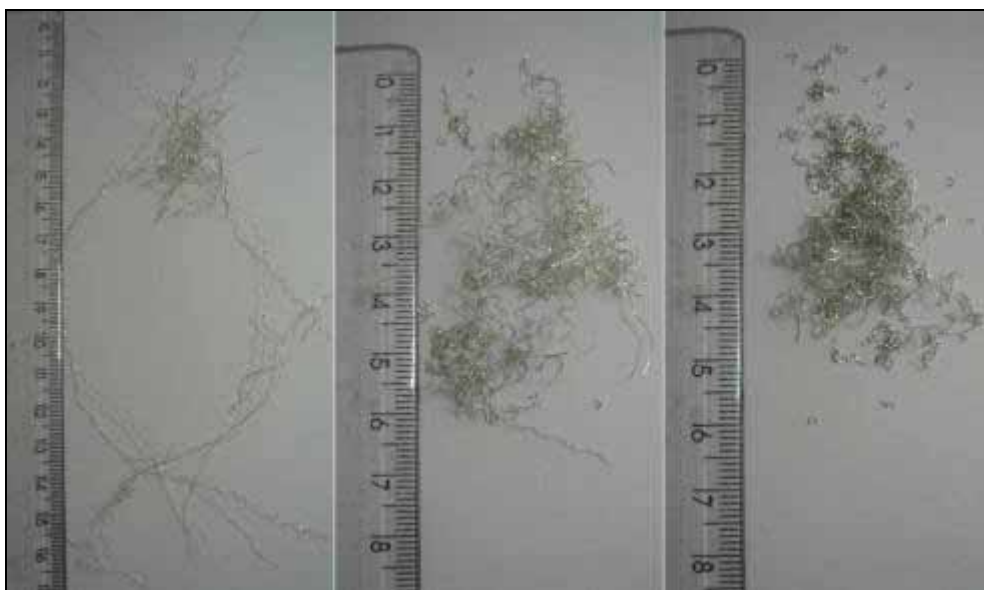
A partir das Figuras 103, 104 e 105 é perceptível que com o aumento do avanço houve a formação de cavaco fragmentado em lascas, que, para avanços menores saía emaranhado.

Figura 103 – Ferramenta de aço rápido; profundidade de corte de 0,50 mm; avanços de 40, 70 e 100 mm/min, respectivamente



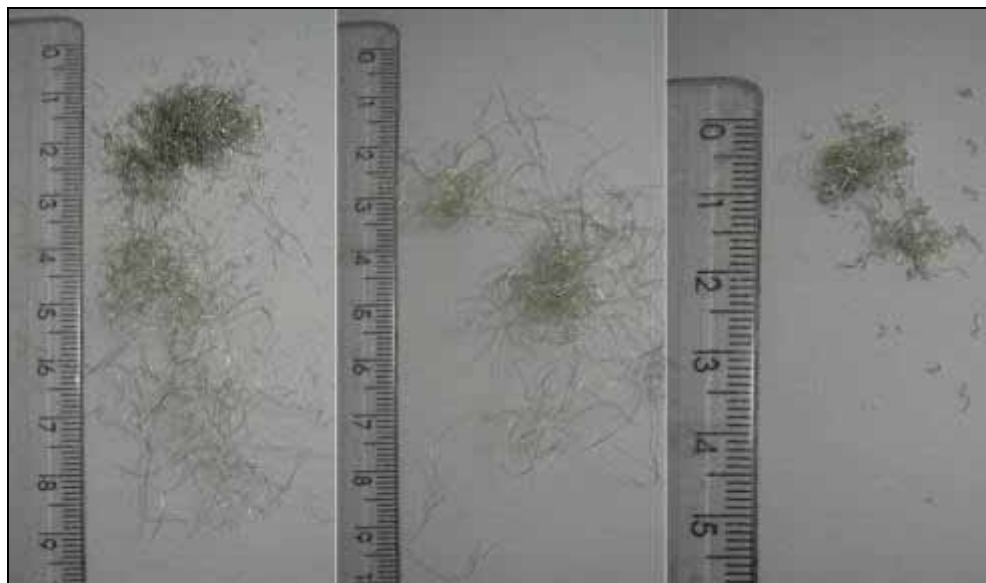
Fonte: (o autor).

Figura 104 – Ferramenta de aço rápido; profundidade de corte de 0,35 mm; avanços de 40, 70 e 100 mm/min, respectivamente



Fonte: (o autor).

Figura 105 – Ferramenta de aço rápido; profundidade de corte de 0,20 mm; avanços de 40, 70 e 100 mm/min, respectivamente



Fonte: (o autor).

6 CONCLUSÕES

Observou-se, conforme esperado e citado na literatura, que o acabamento superficial melhorou com o aumento da velocidade de corte, consequência de rotações mais altas.

De forma geral, concluiu-se que embora a pastilha com recobrimento de TiB_2 tenha promovido um melhor acabamento superficial, o que possivelmente ocorreu devido ao menor atrito causado entre ferramenta e cavaco, o cavaco obtido para a mesma apresentou em grande parte dos resultados o formato longo. Possivelmente a alta condutividade térmica fez com que o cavaco recebesse mais calor, retardando a quebra e aumentando o nível de deformação do mesmo, e o recobrimento da pastilha resultou em superfícies menos agudas na ferramenta, retardando também a quebra desse cavaco.

Foi possível concluir também que, independente da ferramenta utilizada, a relação obtida entre a potência requerida durante o processo e o avanço foi diretamente proporcional. Os maiores valores de potência requerida no torneamento foram encontrados para a ferramenta de metal duro polido, enquanto os menores, para a ferramenta de aço rápido. Resultado que era esperado e foi devido possivelmente ao fato de a ferramenta de aço rápido não apresentar raio de ponta, por causa da constante necessidade de afiação da mesma.

Por fim, não foi observado desgaste ferramental em nenhum dos casos, possivelmente pelo fato de o alumínio ser um material macio. No entanto, notou-se que em todos os casos analisados houve deposição de alumínio sobre a ferramenta, ou seja, formação de APC, fenômeno perceptível através das imagens das ferramentas usadas e do acabamento superficial obtido, que foi mais visível nos CDP's torneados com a ferramenta de aço rápido.

7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABAL - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DO ALUMÍNIO (Brasil). **LIGAS**. Disponível em: <http://www.abal.org.br/aluminio/caracteristicas-quimicas-e-fisicas/ligas/>>. Acesso em: 02 fev. 2015.

ALCOA – Aluminium Company Of America. **CATÁLOGO DE LIGAS E TÊMPERAS**. Disponível em: <https://www.ALCOA.com/brasil/pt/resources/pdf/industria/catalogo_ligas_temperas_2010.pdf>. Acesso em: 22 set. 2014.

AMORIM, 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. 131 f. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Rio Grande do Sul, 2002.

BRESCIANI FILHO, E. **SELEÇÃO DE METAIS NÃO FERROSOS**. Campinas: Editora da Unicamp, 1992.

CABRAL, S. C. **SINTERIZAÇÃO DE COMPÓSITOS SUPERABRASIVOS NO SISTEMA TiB₂-AlN ASSISTIDOS POR ALTAS PRESSÕES E ALTAS TEMPERATURAS**. 2012. 120 f. Tese (Pós-Graduação em Engenharia e Ciência dos Materiais) – Centro de Ciência e Tecnologia da Universidade Estadual do Norte Fluminense, Campos dos Goytacazes-RJ, 2012.

CALLISTER, Jr. W. D. **MATERIALS SCIENCE AND ENGINEERING: AN INTRODUCTION**. New York: John Wiley & Sons, Inc., 2007.

COSTA, E. S. **PROCESSOS DE USINAGEM**. Divinópolis: CEFET-MG, 2006. 85 p.

DIÓGENES, A. C. **ESTUDO DA USINAGEM POR TORNEAMENTO DE LIGAS DE ALUMÍNIO**. 2011. 69 f. Monografia (Graduação em Engenharia Mecânica) – UNESP, Guaratinguetá, 2011.

DINIZ, A. E.; MARCONDES, F. C.; COPPINI, N. L. **TECNOLOGIA DA USINAGEM DOS MATERIAIS**. 6. ed. São Paulo: Artliber, 2008. 262 p.

FERRARESI, D. **FUNDAMENTOS DA USINAGEM DOS METAIS**. São Paulo: Blucher, 1982. 751p.

GONÇALVES, M. T. T. **PROCESSAMENTO DA MADEIRA**. Bauru: USC, 2000. 242p.

GONÇALVES DOS SANTOS, E. **ESTUDO COMPARATIVO DO DESGASTE DE FERRAMENTAS CERÂMICAS DE Al_2O_3 em relação às de $B_4C + TiB_2$** . 2012. 53 f. Monografia (Graduação em Engenharia Mecânica) – UNESP, Guaratinguetá, 2012.

DOMINGUES, Jr. N. I. **ESTUDO DO COMPORTAMENTO MECÂNICO DA LIGA ALUMÍNIO COBRE 2024 SOLUBILIZADO E ENVELHECIDO PARA APLICAÇÕES AERONÁUTICAS**. 2011. 66 f. Dissertação de Mestrado (Pós-Graduação em Engenharia de Materiais) – Universidade Presbiteriana Mackenzie, São Paulo, 2011.

LOPES, K. S. S. **INFLUÊNCIA DOS PARÂMETROS DE USINAGEM NA RESISTÊNCIA À FADIGA DE AÇOS AISI 4140**. Disponível em: <http://www.biblioteca.pucminas.br/teses/EngMecanica_LopesKS_1.pdf>. Acesso em: 07 fev. 2015.

MACHADO, A. R.; ABRÃO, A. M.; COELHO, R. T.; SILVA, M. B. **TEORIA DA USINAGEM DOS MATERIAIS**. 2. ed. São Paulo: Blucher, 2011. 397 p.

MEHROTRA, P. K. **APPLICATIONS OF CERAMIC CUTTING TOOLS, KEY ENGINEERING MATERIALS** - Vols. 138- 140, Trans Tech Publications, Suíça, 1998.

MOREIRA, M. F. **LIGAS DE ALUMÍNIO CONFORMADAS: ALUMÍNIO E SUAS LIGAS**. Disponível em: < <http://www.dalmolim.com.br/educacao/materiais/biblimat/aluminioconf.pdf>>. Acesso em: 03 fev. 2015.

NIVERMETAL. Disponível em: <<http://www.nivertmetal.com/our-products/aluminum/>>. Acesso em: 03 fev. 2015.

OLIVEIRA, V. G. **A INFLUÊNCIA DO CAVACO NO PROCESSO DE USINAGEM COM FERRAMENTAS DE CORTE EM TORNO CNC**. Disponível em: <<http://www.ebah.com.br/content/ABAAAaamgAG/a-influencia-cavaco-no-processousinagem-com-ferramentas-corte-torno-cnc>>. Acesso em: 23 set. 2014.

PALMA, E. S. **DETERMINAÇÃO DE DANOS DE FADIGA EM VIDAS SUPER LONGAS (GIGA CICLOS)**. Disponível em: <http://www.biblioteca.pucminas.br/teses/EngMecanica_GomesDJ_1.pdf>. Acesso em: 02 fev. 2015.

SANDVIK. Sandvik. Disponível em: <<http://www.sandvik.com/>>. Acesso em: 24 set. 2014.

SANTOS, F. J. **SOLDAGEM DE ALUMÍNIO: INFLUÊNCIA DOS PARÂMETROS DE PULSO NA DISTORÇÃO ANGULAR**. 2009. 93f. Dissertação de Mestrado – UNESP/Faculdade de Engenharia, Bauru, 2009.

SANTOS, S. C.; SALES, W. F. **ASPECTOS TRIBOLÓGICOS DA USINAGEM DOS MATERIAIS**. São Paulo: Artliber, 2007. 246 p.

SHAW, M. C. **TOOL LIFE, CERAMIC CUTTING TOOLS – MATERIALS, DEVELOPMENT AND PERFORMANCE**. Noyes Publications, University of Florida, EUA, 1994.

SOARES, S. R. S. **SINTERIZAÇÃO TiB₂ EM ALTAS PRESSÕES**. 2003. 124 f. Tese (Pós-Graduação em Ciência dos Materiais) – UFRGS, Porto Alegre, 2003.

SOUZA, A. J. **PROCESSOS DE FABRICAÇÃO POR USINAGEM** (Parte 1). Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Escola de Engenharia, Departamento de Engenharia Mecânica, 2011.

FREIRE DE SOUZA, T. **USINAGEM DA LIGA DE NÍQUEL INCONEL 718 COM PASTILHAS DE CERÂMICA**. 2012. 60 f. Monografia (Graduação em Engenharia Mecânica) – UNESP, Guaratinguetá, 2012.

STOETERAU, R. L. **PROCESSOS DE USINAGEM – FABRICAÇÃO POR REMOÇÃO DE MATERIAL**. Disponível em: <<http://pt.scribd.com/doc/200644566/Usinagem-Apostila-Toda-Ilustrada-Ufsc#scribd>>. Acesso em: 5 fev. 2015.

STOETERAU, R. L. **INTRODUÇÃO AOS PROCESSOS DE USINAGEM**. Disponível em: <<http://www.lmp.ufsc.br/disciplinas/emc5240/Aula-01-U-2007-1-Introducao.pdf>>. Acesso em: 5 fev. 2015.

STOETERAU, R. L. **PROCESSOS DE USINAGEM**. Disponível em: <<http://www.lmp.ufsc.br/disciplinas/Stoterau/Aula-01-U-2007-1-introducao.pdf>>. Acesso em: 5 fev. 2015.

YOSHIKAWA, D. S. **EFEITO DE TRATAMENTOS DE MODIFICAÇÃO DA SUPERFÍCIE NA RESISTÊNCIA A CORROSÃO DO ALUMÍNIO 1050**. 2011. 1 v. Dissertação (Mestrado) – Instituto de Pesquisas Técnicas Energéticas e Nucleares - Ipen/cnen-sp, São Paulo, 2011. Disponível em: <<http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/85/85134/tde-16062011-142133/publico/2011YoshikawaEfeito.pdf>>. Acesso em: 22 set. 2014.

ZANGRANDI, A. **ALUMÍNIO E SUAS LIGAS: FUNDAMENTOS METALURGICOS E TECNOLÓGICOS**. Lorena: Ist, 2008.