

CENTRO FEDERAL DE EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA DE MINAS GERAIS



Dissertação de Mestrado

Manoel Amâncio Gomes

ESTUDO DO FRESAMENTO FRONTAL COM ALTA VELOCIDADE DE CORTE NO
AÇO FERRAMENTA (VH13ISO) ENDURECIDO NA OPERAÇÃO DE
SEMI-ACABAMENTO

Belo Horizonte
Outubro de 2015

Manoel Amâncio Gomes

ESTUDO DO FRESAMENTO FRONTAL COM ALTA VELOCIDADE DE CORTE NO
AÇO FERRAMENTA (VH13ISO) ENDURECIDO NA OPERAÇÃO DE SEMI-
ACABAMENTO

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Materiais do CEFET-MG, na Área de Concentração de Ciência e Desenvolvimento de Materiais, na Linha de Pesquisa em Seleção, Processamento e Caracterização como parte integrante dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Engenharia de Materiais.

Orientador: Prof. Dr. Leonardo Roberto da Silva - CEFET-MG

Belo Horizonte
Outubro de 2015

G633e Gomes, Manoel Amancio.
Estudo do fresamento frontal com alta velocidade de corte no aço H13ISO endurecido na operação semi-acabamento / Manoel Amancio Gomes. - 2015.
117 f. : il. ; tabs. ; graf. -

Orientador: Leonardo Roberto da Silva.

Dissertação (mestrado) - Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais, Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Materiais, Belo Horizonte, 2015.

Bibliografia.

1. Usinagem em alta velocidade. 2. Aço para ferramentas. 3. Ferramentas para cortar metais. 4. Asperidade de superfície. I. Silva, Leonardo Roberto da.

COO: 671.35



CENTRO FEDERAL DE EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA DE MINAS GERAIS
DIRETORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE MATERIAIS

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

***“ESTUDO DO FRESAMENTO FRONTAL COM ALTA
VELOCIDADE DE CORTE NO AÇO FERRAMENTA
(VH13ISO) ENDURECIDO NA OPERAÇÃO
DE SEMI-ACABAMENTO”***

Autor: Manoel Amancio Gomes

Orientador: Prof. Dr. Leonardo Roberto da Silva

A Banca Examinadora composta pelos membros abaixo aprovou esta Dissertação:

Prof. Dr. Leonardo Roberto da Silva (ORIENTADOR)
Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais - CEFET/MG

Prof. Dr. Ernane Rodrigues da Silva

Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais - CEFET/MG

Prof. Dr. Gilmar Cordeiro da Silva
Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais - PUC Minas

Belo Horizonte, 30 de Outubro de 2015.

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho aos meus pais, que sempre tiveram muita atitude, exemplos e carinho para me ensinar a trilhar o caminho certo da vida. E a todos que me apoiaram e torceram por mim.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a DEUS por me conceber forças e coragem para exercer as funções necessárias do dia-a-dia, sabedoria e vontade de aprender para continuar buscando novos conhecimentos.

Ao Professor e Orientador Leonardo Roberto da Silva que demonstrou e dedicou todo o esforço para que Eu caminhasse na direção certa do conhecimento.

Aos professores do CEFET MG pela dedicação, paciência e atenção em sala de aula.

À minha família por me apoiar e me incentivar a buscar novos conhecimentos, novos desafios que nos fazem crescer na vida.

Aos funcionários do CEFET MG pela atenção, apoio e auxílio nos assuntos extraclases.

À Empresa VILLARES METALS que demonstrou toda boa vontade em me auxiliar com o fornecimento das amostras, pois sem elas não seria possível a realização dos ensaios.

À empresa MAPAL do Brasil pelo apoio, dedicação, desenvolvimento e doação das ferramentas de corte de Nitreto Cúbico de Boro Policristalino.

Ao Engenheiro Gean especialista em tratamentos térmicos e proprietário da empresa Metaltemper especializada em tratamentos térmicos de metais, pela realização do processo de têmpera das amostras.

À empresa Nemak por possibilitar a minha ausência ao trabalho em determinados momentos.

Ao supervisor Nilson Lellis por incentivar e apoiar nos ensaios.

Aos colegas e técnicos da Nemak que se envolveram com a pesquisa e deram apoio na realização dos ensaios.

E a todos que de alguma forma me incentivaram.

RESUMO

Geralmente a usinagem dos aços ferramenta endurecidos nas formas complexas utilizados na indústria, típicas das partes de moldes e matrizes, oferecem dificuldade e custo elevado nas operações de fresamento de semi-acabamento e/ou acabamento. Com o mercado industrial cada vez mais competitivo, o fresamento com altas velocidades (HSM - *High Speed Machining* ou ainda *High Speed Milling*) e o uso de ferramentas com insertos intercambiáveis de metal duro, tem se tornado uma alternativa na realização da usinagem de acabamento, reduzindo ou às vezes até eliminando outras operações de usinagem como: eletro-erosão, retificação e polimento. Este trabalho visa estudo do fresamento frontal com alta velocidade de corte no aço ferramenta VH13ISO (AISI H13) endurecido com dureza média de 43HRc na operação de semi-acabamento, na condição a seco. Neste trabalho foi explorado o desempenho do fresamento frontal com alta velocidade utilizando ferramentas com insertos intercambiáveis de metal duro revestido por uma cobertura composta de Nitreto de Titânio de Alumínio (TiAlN) e ferramentas de Nitreto Cúbico de Boro Policristalino (PCBN). A avaliação do desempenho das diversas condições de usinagem, das ferramentas de metal duro e PCBN, consistiu na análise dos parâmetros: vida, desgaste de ferramenta, mecanismos de desgaste e integridade superficial (rugosidade, microestrutura e microdureza). Os resultados comparativos entre os efeitos do comportamento das ferramentas de metal duro revestido e PCBN, mostraram um rendimento superior do PCBN em relação ao volume de material removido, rugosidades e valores de desgaste de flanco. Os ensaios, através da análise de microdureza, não apresentaram mudança significativa da dureza sub-superficial. Também não foram detectadas mudanças microestruturais do material tratado, nas análises das imagens retiradas com o uso do Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV). As variações dos parâmetros de usinagem apresentaram valores de desgastes das arestas de corte diferentes, e a rugosidade das superfícies usinadas, não se comportaram de forma linear ao desgaste das ferramentas, nem ao aumento da velocidade de corte e/ou avanço das ferramentas de corte.

Palavras-chave: Usinagem com alta velocidade; Materiais endurecidos; Integridade superficial, Aço AISI H13, Ferramentas de PCBN.

ABSTRAT

Usually the machining of tool steels hardened in complex shapes used in industry, typical of parts of molds and dies, offer difficulty and high cost in milling operations to semi-finishing and / or finish. With the industrial market increasingly competitive, milling with high speed (HSM - High Speed Machining or High Speed Milling) and the use of tools with interchangeable inserts carbide, it has become an alternative in achieving the finish machining, reducing or sometimes even eliminating other machining operations such as electro-erosion, grinding and polishing. This work to study face milling with high cutting speed in VH13ISO tool steel (AISI H13) hardened with average hardness 43HRc in the semi-finishing operation in dry condition. This work explored the performance of milling with high speed using tools with carbide indexable inserts coated with a compound coating of titanium nitride of aluminum (TiAlN) and Nitride Cubic Boron Polycrystalline tools (PCBN). The evaluation of the performance of the various machining conditions, the hard metal tools and PCBN, was the analysis of the parameters: life, tool wear, wear mechanisms and surface integrity (roughness, microstructure and hardness). The comparative results between the behavioral effects of carbide tools coated PCBN and showed a superior performance of CBN relative to the volume of material removed and swarf flank wear values. The tests by hardness analysis showed no significant change in the sub-surface hardness. They were not detected microstructural changes of the treated material, the analysis of images taken using the Scanning Electron Microscope (SEM). Variations of machining parameters were wear values of the various cutting edges, and the roughness of the machined surfaces, do not behave in a linear fashion to tool wear, or increasing the cutting speed and / or advance of the cutting tools.

Keywords: High Speed Machining; Hardened materials; Surface integrity, AISI H13, PCBN Tools, face milling.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Curva de revenimento do aço ferramenta VH13ISO.....	26
Figura 2 - Fresamento tangencial.	28
Figura 3 - Fresamento concordante e discordante.	28
Figura 4 - Fresamento frontal.....	29
Figura 5 - Principais parâmetros de fresamento.	29
Figura 6 - Faixa de velocidade convencional e de alta velocidade de corte.....	31
Figura 7 - Materiais empregados para ferramentas de corte.....	35
Figura 8 - Micrografia de uma ferramenta de PCBN com alto teor de CBN (90%).	40
Figura 9 - Micrografia de uma ferramenta de PCBN com baixo teor de CBN (60%)....	40
Figura 10 - Comportamento do desgaste de uma ferramenta.....	43
Figura 11 - Geração de calor e distribuição de temperaturas na usinagem.	44
Figura 12 - Desgaste da ferramenta de corte.	46
Figura 13 - Quebra ou lascamento da aresta de corte.	47
Figura 14 - Trincas na aresta de corte.	48
Figura 15 - Desgaste de cratera da aresta de corte.	49
Figura 16 - Mecanismos de desgaste da ferramenta de corte.	50
Figura 17 - Diagrama clássico dos mecanismos de desgaste.....	52
Figura 18 - Desgaste de flanco da ferramenta de corte.....	53
Figura 19 - Desgaste em forma de entalhe.....	54
Figura 20 - Deformação plástica da aresta de corte.	55
Figura 21 - Rugosidade Média (R_a).	59
Figura 22 - Rugosidade total (R_t).	59
Figura 23 - Esquema do microscópio eletrônico de varredura.	60
Figura 24 - Indentador em forma de prisma.....	63
Figura 25 - Fresa com insertos intercambiáveis de diâmetro de 20mm.	66
Figura 26 - Insertos de Metal Duro (a) e PCBN (b).....	67
Figura 27 - Centro de usinagem MIKRON HSM 700.....	68
Figura 28 - Rugosímetro Marh Marsurf M300C.	68
Figura 29 - Lupa, dispositivo e conjunto de corte.	69
Figura 30 - Durômetro Galeleo.	70
Figura 31- Mandril de cone ISO HSK40 para fixação da fresa de insertos intercambiáveis.	72

Figura 32 - Identificação das arestas de corte.....	72
Figura 33 - Tool Adjusting Device SECA KELCH.....	73
Figura 34 - Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV) SHIMADZU SSX-550.....	74
Figura 35 - Fixação das ferramentas no carrossel do Microscópio Eletrônico de Varredura.....	74
Figura 36 - Amostra embutida e composto de ácido Nítrico.....	75
Figura 37 - Microdurometro Shimadzu.....	76
Figura 38 - Desenho das posições das medidas das microdurezas.....	77
Figura 39 - Desgaste de flanco das ferramentas de metal duro (MD) e de PCBN com $f_z= 0,05\text{mm}$ em função do volume removido.....	79
Figura 40 - Desgaste de flanco das ferramentas de metal duro (MD) e de PCBN com $f_z= 0,10\text{mm}$ em função do volume removido.....	81
Figura 41 - Desgaste de flanco das ferramentas de metal duro (MD) e de PCBN com $f_z= 0,20\text{mm}$ em função do volume removido.....	83
Figura 42 - Rugosidade R_a com ferramentas de metal duro e de PCBN, com $f_z= 0,05\text{mm}$ em função do volume removido.....	85
Figura 43 - Rugosidade R_t com ferramentas de metal duro e de PCBN, com $f_z= 0,05\text{mm}$ em função do volume removido.....	86
Figura 44 - Rugosidades R_a com ferramentas de metal duro e de PCBN, com $f_z= 0,10\text{mm}$ em função do volume removido.....	87
Figura 45 - Rugosidades R_t com ferramentas de metal duro e de PCBN, com $f_z= 0,10\text{mm}$ em função do volume removido.....	89
Figura 46 - Rugosidade (R_a) em relação ao volume removido com $f_z= 0,20\text{mm}$ ferramentas de metal duro (MD) e de PCBN.....	90
Figura 47 - Rugosidade (R_t) em relação ao volume removido com $f_z= 0,20\text{mm}$ ferramentas de metal duro (MD) e de PCBN.....	91
Figura 48 - Aspecto do desgaste no inserto com $f_z= 0,05\text{mm}$ e $v_c=150\text{m/min}$, com aumento de 100x (a) aumento de 500x (b).....	92
Figura 49 - Aspecto do desgaste no inserto com $f_z= 0,05\text{mm}$ e $v_c= 300\text{m/min}$, com aumento de 100x (a) e com aumento de 500x (b).....	93
Figura 50 - Aspecto do desgaste no inserto com $f_z= 0,05\text{mm}$ e $v_c= 450\text{m/min}$, com aumento de 100x (a) e com aumento de 500x (b).....	93
Figura 51 - Aspecto do desgaste no inserto com $f_z= 0,05\text{mm}$ e $v_c= 600\text{m/min}$,	93

Figura 52 - Aspecto do desgaste no inserto com $f_z= 0,10\text{mm}$ e $v_c= 150\text{m/min}$, com aumento de 100x (a) e aumento de 500x (b).....	94
Figura 53 - Aspecto do desgaste no inserto com $f_z= 0,10\text{mm}$ e $v_c= 300\text{m/min}$, com aumento de 100x (a) e com aumento de 500x.	94
Figura 54 - Aspecto do desgaste no inserto com $f_z= 0,10\text{mm}$ e $v_c= 450\text{m/min}$, com aumento de 100x (a) e com aumento de 500x (b).....	95
Figura 55 - Aspecto do desgaste no inserto com $f_z= 0,10\text{mm}$ e $v_c= 600\text{m/min}$, com aumento de 100x (a) e com aumento de 500x (b).....	95
Figura 56 - Aspecto do desgaste no inserto de PCBN com $f_z= 0,10\text{mm}$ e $v_c= 600\text{m/min}$, com aumento de 100x (a) e com aumento de 500x (b).....	96
Figura 57 - Aspecto do desgaste no inserto com $f_z= 0,20\text{mm}$ e $v_c= 150\text{m/min}$, com aumento de 100x (a) e aumento de 500x (b).....	96
Figura 58 - Aspecto do desgaste no inserto com $f_z= 0,20\text{mm}$ e $v_c= 300\text{m/min}$, com aumento de 100x (a) e com aumento de 500x (b).....	97
Figura 59 - Aspecto do desgaste no inserto com $f_z= 0,20\text{mm}$ e $v_c= 450\text{m/min}$, com aumento de 100x (a) e com aumento de 500x (b).....	97
Figura 60 - Aspecto do desgaste no inserto com $f_z= 0,20\text{mm}$ e $v_c= 600\text{m/min}$, com aumento de 100x (a) e com aumento de 500x (b).....	97
Figura 61 - Microestrutura na condição de corte com $f_z= 0,05\text{mm}$ e $v_c= 150\text{m/min}$, com ampliação de 1000x.....	99
Figura 62 - Microestrutura na condição de corte com $f_z= 0,05\text{mm}$ e $v_c= 300\text{m/min}$, com ampliação de 1000x.....	100
Figura 63 - Microestrutura na condição de corte com $f_z= 0,05\text{mm}$ e $v_c= 450\text{m/min}$, com ampliação de 1000x.....	100
Figura 64 - Microestrutura na condição de corte com $f_z= 0,05\text{mm}$ e $v_c= 600\text{m/min}$, com ampliação de 1000x.....	100
Figura 65 - Microestrutura na condição de corte com $f_z= 0,10\text{mm}$ e $v_c= 150\text{m/min}$, com ampliação de 1000x.....	101
Figura 66 - Microestrutura na condição de corte com $f_z= 0,10\text{mm}$ e $v_c= 300\text{m/min}$, com ampliação de 1000x.....	101
Figura 67 - Microestrutura na condição de corte com $f_z= 0,10\text{mm}$ e $v_c= 450\text{m/min}$, com ampliação de 1000x.....	102
Figura 68 - Microestrutura na condição de corte com $f_z= 0,10\text{mm}$ e $v_c= 600\text{m/min}$, com ampliação de 1000x.....	102

Figura 69 - Microestrutura dos insertos de PCBN na condição de corte com $f_z= 0,10\text{mm}$ e $v_c= 600\text{m/min}$, com ampliação de 1000x.	103
Figura 70 - Microestrutura na condição de corte com $f_z= 0,20\text{mm}$ e $v_c= 150\text{m/min}$, com ampliação de 1000x.	103
Figura 71 - Microestrutura na condição de corte com $f_z= 0,20\text{mm}$ e $v_c= 300\text{m/min}$, com ampliação de 1000x.	104
Figura 72 - Microestrutura na condição de corte com $f_z= 0,20\text{mm}$ e $v_c= 450\text{m/min}$, com ampliação de 1000x.	104
Figura 73 - Microestrutura na condição de corte com $f_z= 0,20\text{mm}$ e $v_c= 600\text{m/min}$; com ampliação de 1000x.	104
Figura 74 - Microdureza na superfície e sub-superfície com ferramenta de Metal Duro e PCBN utilizando $f_z= 0,05\text{mm}$ com diferentes velocidades de corte e com amostra sem usinagem (A.S.U).	105
Figura 75 - Microdureza na superfície e sub-superfície com ferramenta de Metal Duro e PCBN utilizando $f_z= 0,10\text{mm}$ com diferentes velocidades de corte e com amostra sem usinagem (A.S.U).	106
Figura 76 - Microdureza na superfície e sub-superfície com ferramenta de Metal Duro e PCBN utilizando $f_z= 0,20\text{mm}$ com diferentes velocidades de corte e com amostra sem usinagem (A.S.U).	106

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Composição química do aço ferramenta AISI H13 em peso (%).	23
Tabela 2 - Propriedades mecânicas do aço AISI H13 à temperatura ambiente.....	24
Tabela 3 - Características das ferramentas de PCBN.....	39
Tabela 4 - Composição química do aço ferramenta VH13ISO em peso (%).	65
Tabela 5 - Parâmetros de usinagem utilizados nos experimentos.	71

LISTA DE ABREVIATURAS E SÍMBOLOS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
AISI	American Iron and Steel Institute (Instituto Americano de Ferro e Aço)
a_p	Profundidade ou largura de penetração de corte
ASTM	American Society for Testing and Materials
CAD	Computer Aided Design (desenho auxiliado por computador)
CAM	Computer Aided Manufacturing (Manufatura Assistida por Computador)
CBN	Nitreto Cúbico de Boro
CNC	Comando Numérico Computadorizado
f_z	Avanço por dente
HRc	Dureza Rockwell – escala C
HSC	High Speed Cutting
HSM	High Speed Machining - High Speed Milling
ISO	International Organization for Standardization
MEV	Microscópio Eletrônico de Varredura
NADCA	North American Die Casting Association
PCBN	Nitreto Cúbico de Boro Policristalino
PVD	Deposição Física de Vapor
SAE	Society of Automotive Engineers (Sociedade de Eng. Automotiva)
v_c	Velocidade de corte (m/min)
v_f	Velocidade de avanço (m/min)
VB_B	Desgaste da aresta de Flanco
$VB_{BMÁX}$	Desgaste da aresta de Flanco máximo
R_a	Rugosidade média
R_t	Rugosidade total
ASU	Amostra sem usinagem
VB	Largura média de desgaste de flanco
$VB_{máx}$	Largura máxima de desgaste de flanco
SV_α	Deslocamento lateral do gume na direção de flanco
KB	Largura de cratera
KF	Largura do lábio no desgaste de cratera
KM	Distância da borda da ferramenta ao centro da cratera
KT	Profundidade de cratera
SV_y	Deslocamento lateral do gume na direção da face.

SUMÁRIO

DEDICATÓRIA -----	5
AGRADECIMENTOS -----	6
RESUMO -----	7
ABSTRAT -----	8
LISTA DE FIGURAS -----	9
LISTA DE TABELAS -----	13
SUMÁRIO -----	15
1 INTRODUÇÃO -----	17
2 OBJETIVO -----	21
2.1 Objetivos gerais -----	21
2.2 Objetivos específicos -----	21
3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA -----	22
3.1 Aços Ferramenta para trabalho a quente -----	22
3.2 Tratamentos térmicos do aço AISI H13 -----	25
3.3 Processo de fresamento -----	26
3.4 Usinagem com alta velocidade -----	30
3.5 Ferramentas de corte -----	34
3.5.1 Metal duro -----	35
3.5.2 Nitreto Cúbico de Boro Policristalino (PCBN) -----	39
3.6 Vida e desgastes das ferramentas de corte -----	41
3.6.1 Avarias na ferramenta de corte -----	46
3.7 Mecanismos de desgaste -----	49
3.7.1 Desgastes de flanco (VB_B) -----	53
3.7.2 Desgastes em forma de entalhe -----	54
3.7.3 Deformação plástica da aresta de corte -----	54
3.8 Integridades superficiais de peças usinadas -----	55
3.8.1 Rugosidade -----	57
3.8.2 Microestrutura -----	60
3.8.3 Microdureza -----	61
4 MATERIAIS E MÉTODOS -----	65
4.1 Material do corpo de prova e tratamento térmico -----	65

4.2 Ferramentas de corte-----	66
4.3 Equipamentos utilizados -----	67
4.4 Procedimento experimental-----	70
4.5 Análise dos mecanismos de desgaste -----	73
4.6 Preparação das amostras para análise microestrutural -----	75
4.7 Microdureza -----	76
5 RESULTADOS E DISCUSSÕES-----	78
5.1 Desgaste de flanco das ferramentas de metal duro (MD) e de PCBN com $f_z=0,05\text{mm}$ -----	78
5.2 Desgaste de flanco das ferramentas de metal duro (MD) e de PCBN com $f_z=0,10\text{mm}$ -----	81
5.3 Desgaste de flanco das ferramentas de metal duro (MD) e de PCBN com $f_z=0,20\text{mm}$ -----	83
5.4 Rugosidades R_a e R_t com ferramentas de metal duro (MD) e de PCBN com $f_z=0,05\text{mm}$ -----	84
5.5 Rugosidades R_a e R_t com ferramentas de metal duro (MD) e de PCBN com $f_z=0,10\text{mm}$ -----	87
5.6 Rugosidades R_a e R_t com ferramentas de metal duro (MD) e de PCBN com $f_z=0,20\text{mm}$ -----	89
5.7 Análise dos mecanismos de desgaste -----	92
5.8 Análises da microestrutura -----	99
5.9 Microdureza -----	105
6 CONCLUSÕES -----	108
SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS -----	112
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS -----	113

1 INTRODUÇÃO

“Historicamente, o desenvolvimento e o avanço das sociedades estão intimamente ligados às habilidades de seus membros em produzir e manipular materiais para satisfazer as suas necessidades” (CALLISTER, 2002, p.16).

Dentre todos os tipos de materiais disponíveis, o aço é o mais versátil e importante na construção mecânica, porque apresenta uma interessante combinação de propriedades que podem ser modificadas dentro de uma ampla faixa variando-se o tipo e a concentração dos elementos de liga e a microestrutura por meio de tratamentos térmicos (CHIAVERINI, 1977).

A usinagem é reconhecida como dos mais importantes processos de fabricação mecânica, dando origem a diversos tipos de peças e cavacos que abrangem grande parte da produção de metais. É um processo que pode se tornar complexo ou simples ao mesmo tempo, no qual se produz peças removendo material na forma de cavacos conforme a geometria que se queira fabricar e que gera empregos para milhões de pessoas em todo o mundo. A usinagem de materiais endurecidos em substituição a retificação tem sido fator determinante na sobrevivência das corporações quanto à competitividade e manutenção dos principais itens procurados pelo mercado: preço, prazo e qualidade. O Nitreto Cúbico de Boro Policristalino (PCBN) tem sido um dos materiais muito utilizados na usinagem de aços endurecidos para acabamento de peças conferindo baixas tolerâncias dimensionais, bom acabamento e forma geométrica satisfatória (ANEIRO et al., 2008).

A procura pelo desenvolvimento e aplicação da usinagem de materiais endurecidos surgiu inicialmente nas indústrias automotiva, aeroespacial e metalúrgica. Nestes três ramos industriais, ferramentas de CBN são comumente utilizadas, pois reduzem o custo na produção e melhoram a qualidade de acabamento do produto (ASPINWALL et al., 2002). Por isso, em muitos casos, o fresamento com este tipo de ferramenta pode substituir o processo de retificação na operação de acabamento (GRZESIK et al., 2006).

O fresamento é uma operação de usinagem que permite trabalhar peças com geometrias variadas movidas por um movimento uniforme de rotação da ferramenta. O fresamento, como vários trabalhos de usinagem, acontece com a

retirada progressiva de material na peça trabalhada na forma de cavaco. As condições ideais de usinagem para uma determinada operação de fresamento do aço é fundamental para obter uma fabricação de qualidade e economicamente viável (FERRARESI, 2012).

Atualmente os processos de usinagem de alta complexidade ou qualidade são realizados em máquinas automatizadas através do Comando Numérico Computadorizado (CNC) que possibilitam uma menor atuação do operador e aumento da produtividade. Tudo isso depende da correta seleção dos parâmetros de usinagem. A escolha inadequada dos parâmetros de corte pode ocasionar desgaste excessivo ou mesmo quebra de ferramentas, superaquecimento, retrabalhos, elevados gastos de insumos ou até mesmo a perda total da peça. Estes problemas podem levar a danos economicamente irrecuperáveis na superfície da peça, aumento do tempo inativo de fabricação e consequente aumento dos custos de produção (SANDVIK, 2002).

As transformações tecnológicas constituem o elemento-chave de sustentação e viabilização econômica da maioria das empresas nos negócios de médio e longo prazo, permitindo a melhoria da competitividade e a sustentabilidade da empresa. Entre as novas tecnologias que buscam competitividade em um curto espaço de tempo destaca-se a usinagem com alta velocidade HSM – High Speed Machining, que surge como um componente essencial na busca dos esforços de manutenção e aumento da competitividade global das empresas e se apresenta como importante instrumento para o desenvolvimento dos novos desafios que surgem nas tecnologias. Conforme Andrae (1999) apud Silva *et al.* (2004) o corte com altas velocidades pode ser usado para todos os processos de usinagem de metais leves, não ferrosos e plásticos, mas para materiais de difícil usinabilidade como os aços liga e ferros fundidos, ele é adequado apenas para o corte final. O material da ferramenta ainda é o fator limitante para usinagem com alta velocidade.

A usinagem com alta velocidade de corte (HSM) proporciona menor tempo no processo de fabricação com rápida remoção de material. A tecnologia empregada nas fresadoras de alta velocidade permite a usinagem com redução do tempo de aproximação e recuo da ferramenta, bem como do tempo de troca destas ferramentas, além da evidente redução do tempo de usinagem. Quanto à qualidade, os processos em HSM, na maioria das vezes, proporcionam superioridade em qualidade dimensional (tolerâncias de dimensão, forma e

posição) e superficial (rugosidades) comparado à de processos convencionais. Neste processo de usinagem os requisitos de rigidez e balanceamento são preponderantes na eliminação de vibrações durante a usinagem, que pode interferir na qualidade do acabamento superficial e na vida útil das ferramentas de corte. A usinagem de materiais duros vem sendo cada vez mais utilizada devido ao crescente aumento da demanda de produção e competitividade do mercado aliados à necessidade de redução dos custos de fabricação, exigindo assim o uso de novas tecnologias. Os materiais que necessitavam ser usinados em sua forma endurecidas, eram usinados somente pelo processo de retificação (GRZESIK et al., 2006).

Embora existam várias aplicações para HSM, a sua aplicação tem encontrado mais sucesso na indústria aeroespacial, principalmente pela necessidade de peças com perfis esbeltos e pequenas espessuras de parede e na fabricação de moldes, matrizes e estampos, principalmente se o emprego destes componentes for voltado para elevadas produções como a indústria automobilística e na fabricação de plásticos de qualidade, como lentes de faróis e lanternas (SCHUTZER e SCHULZ, 2003).

Atualmente devido ao desenvolvimento de materiais para ferramentas de elevada dureza e resistência ao desgaste em altas temperaturas e ao desenvolvimento de máquinas ferramentas de maiores rigidez e precisão dimensional em altas rotações, tornou-se possível a usinagem desses materiais pelos processos de fresamento e torneamento. Com isso, em muitos casos, a usinagem com esse tipo de ferramenta pôde substituir o processo de retificação na operação de acabamento, principalmente na produção seriada de peças de transmissão na indústria automotiva. Segundo Machado et al., (2009); Diniz et al., (2008) o custo por peça produzida pelo processo de torneamento de materiais endurecidos, quando comparado com o processo de retificação, pode ser reduzido em mais de 60%. Tonshoff et al. (1995) afirma ainda que o desgaste da ferramenta e a integridade superficial das peças usinadas são fortemente influenciados pela utilização ou não de fluidos de corte, uma vez que os mesmos agem no sentido de reduzir a carga térmica na aresta de corte, aumentando, assim, a vida da ferramenta quando comparado com o corte a seco.

A produção de peças que exigem grande remoção de metal, como peças para a indústria aeroespacial, ou fabricação de moldes e matrizes são aplicações típicas

do uso de HSM no fresamento. Tal processo, para peças de paredes finas, relativamente instáveis, é possível com alto nível de precisão dimensional, graças às forças de corte significativamente reduzidas. Com o aumento da velocidade há menos tempo para que o calor gerado no corte flua para a peça. Consequentemente, a maior parte do calor é transportada pelo cavaco para fora da região de corte possibilitando a usinagem praticamente sem o aquecimento da peça (GAMARRA, 2003).

Sendo a substituição do processo de retificação pelo fresamento de aço endurecido com alta velocidade de corte ainda uma grande dificuldade, buscam-se soluções através da combinação dos parâmetros de corte, ferramentas e métodos de usinagem.

Assim, acredita-se que este trabalho pode contribuir com o fornecimento de informações sobre o fresamento frontal com alta velocidade em Aços Ferramenta endurecidos, através do uso de ferramentas de corte intercambiáveis de metal duro revestido e Nitreto Cúbico de Boro Policristalino (PCBN) na condição de corte a seco.

2 OBJETIVO

Avaliar o fresamento frontal com alta velocidade de corte no aço ferramenta VH13ISO (AISI H13) endurecido, na operação de semi-acabamento na condição de corte a seco.

2.1 Objetivos gerais

Este trabalho visa como principais objetivos: a avaliação do fresamento frontal com alta velocidade de corte no aço ferramenta VH13ISO endurecido na operação de semi-acabamento com utilização de ferramentas de metal duro revestido por uma cobertura composta de Nitreto de Titânio de Alumínio (TiAlN) e Nitreto Cúbico de Boro Policristalino (PCBN) na condição de corte a seco.

Análises dos mecanismos de desgaste nas ferramentas de corte, da vida da ferramenta de corte, da rugosidade, da microdureza e da microestrutura dos corpos de prova após usinagem.

2.2 Objetivos específicos

- Avaliar o desempenho de ferramentas de metal duro e PCBN no fresamento do aço ferramenta VH13ISO endurecido em operação de semi-acabamento;
- Analisar a influência do desgaste da ferramenta de corte no acabamento superficial do aço endurecido;
- Analisar o comportamento dos possíveis danos causados na integridade superficial da peça através das solicitações térmicas e mecânicas na condição de usinagem convencional, transição e de alta velocidade de corte;
- Analisar a influência da velocidade de corte na rugosidade do aço AISI H13 (VH13ISO) durante o fresamento frontal com alta velocidade de corte;
- Estudar os mecanismos de desgaste das ferramentas sob diferentes parâmetros de usinagem;
- Melhor compreensão da usinagem com alta velocidade de corte no aço AISI H13 (VH13ISO) endurecido.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Este capítulo visa apresentar alguns tópicos de aços com ênfase no tratamento térmico e variações dos principais elementos de liga, processo de fresamento frontal com alta velocidade de corte, ferramentas de corte, desgastes e mecanismos de desgaste e integridade superficial.

3.1 Aços Ferramenta para trabalho a quente

O aço é uma liga de ferro e carbono com adição de elementos de liga. Dentre os elementos de liga mais usuais encontram-se: Cromo (Cr), Vanádio (V), Molibdênio (Mo), Níquel (Ni), Tungstênio (W), Cobalto (Co), Manganês (Mn), Silício (Si), Alumínio (Al), Fósforo (P) e Enxofre (S). Variando-se percentualmente esses elementos químicos é possível compor uma variada gama de propriedades (VAN VLACK, 1979; CALLISTER, 2002).

A presença destes aços-ferramenta é de elevada importância na fabricação de moldes para a indústria de produtos fundidos, plásticos, matrizes para forjamento e estamparias. Os aços ferramentas possuem características diferentes e sua escolha se dá em função de fatores como custo, usinabilidade, dureza, resistência ao desgaste, resistência mecânica, tenacidade, resistência à fadiga, etc.

Os Aços Ferramenta para trabalho a quente são geralmente destinados ao trabalho em situações normais de temperaturas superiores a 200°C. Estes aços em condições de trabalho devem apresentar determinadas características como: dureza, resistência ao desgaste, resistência mecânica, tenacidade, resistência à fadiga e resistência à formação de trincas oriundas de bruscas variações térmicas. São aplicados na fabricação de moldes para injeção e vazamento de ligas de alumínio e outras ligas, moldes para injeção de plásticos, matrizes, etc. (VILLARES METALS, 2006).

A usinagem dessa categoria de materiais tem atraído grande interesse da indústria, uma vez que se apresenta como uma alternativa aos processos convencionais de retificação em usinagem de precisão, reduzindo o tempo de produção, custos de ferramental e melhorando a qualidade dos produtos (RECH, et al., 2008).

Entre os aços para trabalho a quente destaca-se o aço ferramenta

VH13ISO, equivalente aos aços da família ABNT H13 e AISI H13, que é um aço-ferramenta utilizado na fabricação de moldes para a injeção de plásticos, ferramentas para corte a quente, tais como punções, matrizes para a fundição de ligas de alumínio, chumbo, zinco ou estanho e ferramentas para extrusão de ligas leves, entre outras aplicações. Tem como principais características elevada resistência à formação de trincas por fadiga térmica, excelentes propriedades mecânicas, boa tenacidade, boa polibilidade e boa usinabilidade. Tem ainda boa estabilidade dimensional durante os tratamentos térmicos, é um aço pouco sensível a choques térmicos, quando refrigerado por água e tem excelente resistência ao desgaste. Apresenta boa temperabilidade e mantém alta dureza e resistência a elevadas temperaturas (VILLARES METALS, 2006).

Os principais elementos de liga presentes no aço ferramenta AISI H13, são: Cromo (Cr), Vanádio (V), Molibdênio (Mo) e Silício (Si) conforme Tabela 1, e podem ser endurecível por têmpera em óleo ou ar.

Tabela 1 - Composição química do aço ferramenta AISI H13 em peso (%).

C	Mn	Si	Cr	Mo	V	S	P
0,32	0,2	0,8	4,75	1,1	0,8	0,03	0,03

Fonte: VILLARES, METALS, 2006.

Os efeitos da variação dos principais elementos de liga do aço, segundo a North American Die Casting Association (NADCA) são:

- O cromo (Cr) forma carbonetos que retardam o amolecimento da martensita e melhora a temperabilidade do aço.
- O vanádio (V) é um formador mais forte de carbonetos (VC) do que o Mo ou o Cr. Os VC são muito estáveis e possuem elevada dureza, auxiliando assim na resistência ao desgaste do material. Porém, necessitam de elevadas temperaturas de austenitização e se uma considerável parte não for dissolvida haverá diminuição na tenacidade microestrutural do aço.
- O molibdênio (Mo) melhora de forma significativa a temperabilidade, resistência mecânica a quente e condutibilidade térmica. Formam carbonetos que dão estabilidade microestrutural e assim retarda o amolecimento da martensita à

elevadas temperaturas reduz as possibilidades de fragilidade ao revenido.

➤ O silício (Si) é benéfico quando seu teor é reduzido, pois promove o retardamento da precipitação de carbonetos proeutóides (Mo, V e Cr) durante o revenimento e conseqüentemente seu coalescimento e fragilidade. Com isso aumenta a resistência ao revenido e tenacidade. Outros como o:

➤ O oxigênio (O) atua de forma negativa formando óxidos que fragiliza o aço, devendo ser mantido em valores inferiores a 8 ppm (0,0008%);

➤ O enxofre (S) atua de forma prejudicial formando MnS que diminuem a tenacidade do aço. Deve ser mantido abaixo de 0,003 (Conforme NADCA);

➤ O fósforo (P) age de forma negativa ao aço, pois segrega para contornos de grão e reduz a capacidade de tenacidade do aço. Deve ser mantido abaixo de 0,015.

As principais propriedades mecânicas do aço AISI H13, em função da temperatura de revenimento, após o processo de tratamento térmico medidas a temperatura ambiente, podem ser observadas na Tabela 2.

Tabela 2 - Propriedades mecânicas do aço AISI H13 à temperatura ambiente.

Temperatura de revenimento	Limite de resistência à tração	Limite de escoamento	Alongamento	Redução em área	Teste de impacto Charpy, entalhe V	Dureza
(°C)	(Mpa)	(Mpa)	(%)	(%)	(J)	(HRc)
527	1960	1570	13	46,2	16	52
555	1835	1530	13,1	50,1	24	50
575	1730	1470	13,5	52,4	27	48
593	1580	1365	14,4	53,7	28,5	46
605	1495	1290	15,4	54	30	44

➤ Barra redonda, resfriamento brusco em óleo a partir de 1010°C, revenido duplo, 2 + 2 h à temperatura indicada.

Fonte: METALS HANDBOOK, 1978.

Estas propriedades de resistência mecânicas para temperaturas de trabalho a quente do aço AISI H13, tem como objetivo evitar falhas por fadiga térmica, deformação plástica, propagação de trincas e desgaste que são influenciados pelos tratamentos térmicos.

Devido a sua composição química, as principais características apresentada pelo aço AISI H13 são: elevada temperabilidade, elevada resistência ao amolecimento pelo calor, boa resistência ao desgaste em temperaturas elevadas, excelente tenacidade, boa usinabilidade comparado com outros aços-ferramenta, excelente resistência a choques térmicos devidos aos aquecimentos e resfriamentos contínuos reduzindo o surgimento de trincas térmicas (VILLARES METALS, 2006).

3.2 Tratamentos térmicos do aço AISI H13

O aço AISI H13 quase que na totalidade das vezes em que é submetido a um processo de transformação em moldes e/ou matrizes, passam por alguns processos de tratamentos térmicos (sequências de operações envolvendo variáveis térmicas no material) para possibilitar um bom desempenho e boa qualidade final do produto. Os tratamentos térmicos são bastante utilizados em aços com alto teor de carbono ou quando contêm elementos de liga e possuem objetivos variados como:

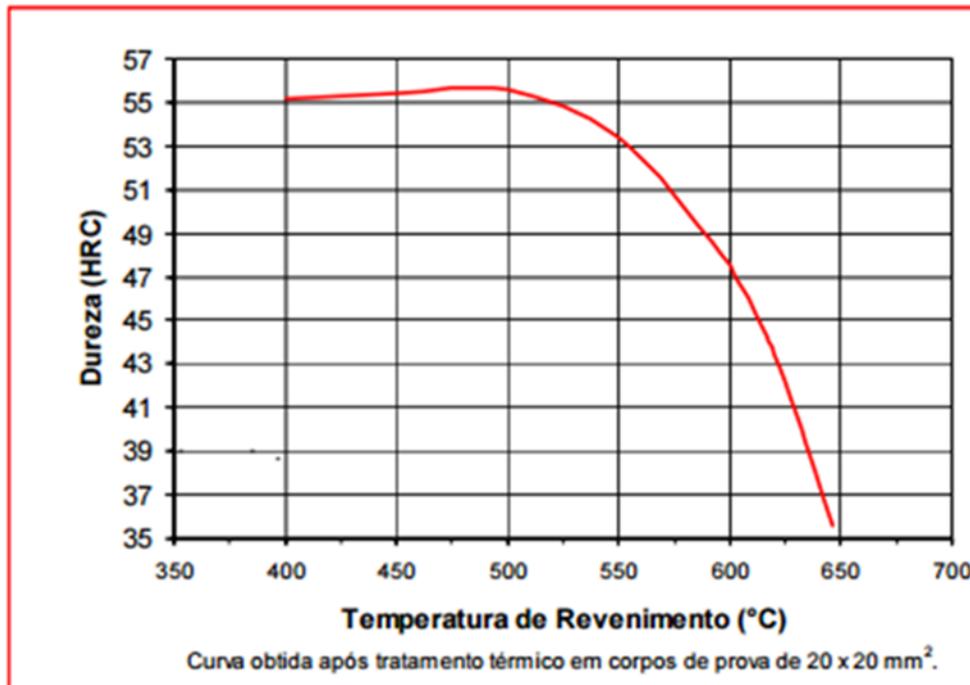
- Aumento ou diminuição da dureza;
- Aumento da resistência mecânica;
- Melhoria da resistência ao desgaste e à corrosão;
- Remoção de tensões internas;
- Melhoria da ductilidade.

Conforme recomendações da Villares Metals (2006) o tratamento térmico de têmpera do aço ferramenta VH13ISO deve ser realizado da seguinte forma:

- O aquecimento deve estar entre 1010 e 1030°C;
- Resfriamento rápido em óleo apropriado com agitação e aquecido entre 40 e 70°C, ou banho de sal mantido entre 500 e 550°C;
- Pode ser temperado em forno a vácuo.

As ferramentas (peças) devem ser revenidas imediatamente após a têmpera, tão logo atinjam 60°C. Fazer, no mínimo, dois revenimentos e entre cada revenimento as peças devem ser resfriadas lentamente até a temperatura ambiente. Temperaturas de revenimento entre 550 e 650°C conforme a dureza desejada, e que pode ser observada na Figura 1. O tempo de cada revenimento deve ser, de no mínimo, 2 horas. Para peças maiores que 70 mm, calcula-se o tempo em função de sua dimensão. Considerar 1 hora para cada polegada de espessura.

Figura 1 - Curva de revenimento do aço ferramenta VH13ISO.



Fonte: VILLARES, METAIS, 2006.

3.3 Processo de fresamento

A fresadora é uma máquina cuja ferramenta, denominada fresa, possui movimento de rotação e que permite movimentar a mesa, sobre a qual esta fixada a peça, em um, dois, três ou mais eixos (lineares ou angulares). Sendo assim, tem-se uma máquina especificamente criada para execução de peças prismáticas, ao contrário do torno, que executa principalmente peças rotacionais cujo perfil é de revolução. A fresa pode ser definida de forma bastante simplificada como sendo provida de arestas cortantes dispostas simetricamente em torno de um eixo (DINIZ et al, 2008).

O processo de fresamento é uma das formas de usinagem utilizada para fabricação de componentes na indústria podendo ser manual ou automático. É realizado de diversas formas e existem vários tipos de máquinas de fresagens conhecidas geralmente como fresadoras. Em alguns casos, o fresamento é utilizado como alternativa a outros processos de produção, como por exemplo, a retificação.

De acordo com a norma brasileira (NBR 6175, 2015) que trata dos assuntos relacionados aos processos mecânicos de usinagem, a definição de fresamento é “um processo destinado à obtenção de uma superfície qualquer com auxílio de

ferramenta, geralmente multicortante. Para tanto, a ferramenta gira e a peça ou a ferramenta se desloca segundo uma trajetória qualquer”.

O processo de fresamento de acabamento quase sempre é precedido pela realização do fresamento de desbaste que visa à máxima remoção de material e que as vezes promove uma topografia com grandes irregularidades. Em alguns casos, surge ainda a necessidade de uma operação de semi-acabamento tornando o sobremetal mais constante possível para melhor desempenho do corte durante o acabamento. Muitas geometrias de peças possuem a necessidade de redução das irregularidades deixadas pela operação de semi-acabamento e/ou desbaste. Para isso é usada a operação de acabamento que normalmente é realizada com alta velocidade de rotação da ferramenta de corte, isto exige boa estabilidade do conjunto da máquina, parâmetros de fresamento corretos, conhecimentos técnicos e resistência da ferramenta de corte.

Atualmente, o processo de fresamento tem sido muito utilizado para a usinagem de aços endurecidos, pois o desenvolvimento de materiais para ferramentas de elevada dureza e resistência ao desgaste em altas temperaturas, junto ao surgimento de máquinas e ferramentas de maiores rigidez e precisão dimensional em altas rotações permitiu a possibilidade de substituição do processo de retificação (ABRÃO & ASPINWALL, 1993; DEWES & ASPINWALL, 1997; MOMPER, 2000 e GRZESIK, 2008).

De acordo com alguns autores, o fresamento é também a área clássica de aplicação da tecnologia High Speed Machining (HSM) uma vez que o corte intermitente, ao invés de prejudicar a usinagem em função da fadiga térmica, gera um aumento da ductilidade na zona de corte devido a alta rotação imposta pela máquina (DEWES & ASPINWALL, 1997 e GAMARRA, 2003).

Segundo Ferraresi (2012) e Diniz et al., (2008) distinguem-se dois tipos fundamentais de fresamento: Tangencial e Frontal

Fresamento tangencial, aquele destinado à obtenção de superfície plana paralela ao eixo de rotação da fresa conforme mostra a Figura 2, e pode ser concordante ou discordante e/ou os dois simultaneamente.

Figura 2 - Fresamento tangencial.

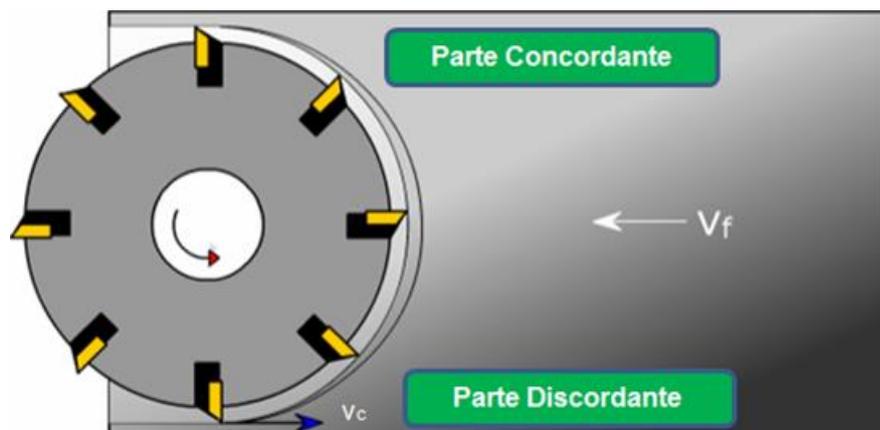


Fonte: SECO Fresamento, 2012.

O fresamento concordante é aquele em que o movimento de avanço da mesa apresenta o mesmo sentido de movimento de rotação da fresa, neste, o desgaste de ferramenta tende a ser menor, devido ao corte começar com o valor máximo da espessura o cavaco.

No fresamento discordante o sentido de movimento da mesa é diferente do de rotação da fresa. No caso do eixo da fresa interceptar o material da peça, tem-se simultaneamente a fresamento concordante e discordante, como é possível observar na Figura 3.

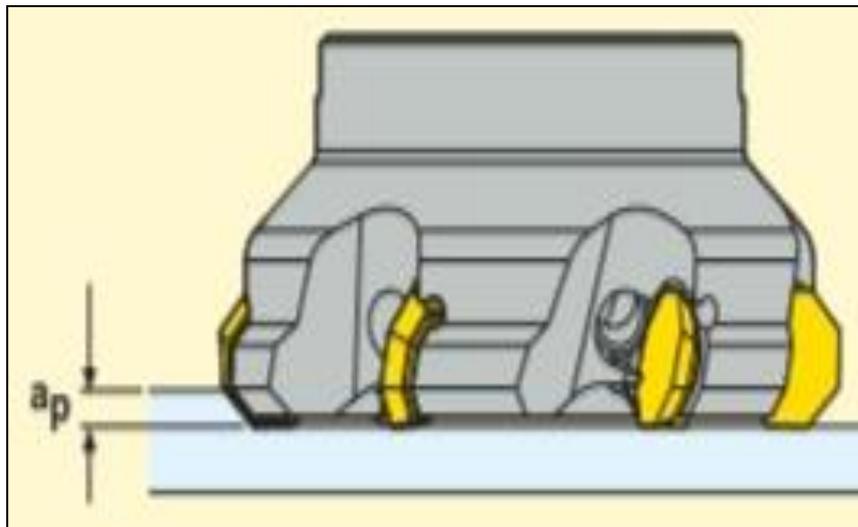
Figura 3 - Fresamento concordante e discordante.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Fresamento frontal é destinado à obtenção de superfície plana perpendicular ao eixo de rotação da fresa conforme Figura 4. Neste caso as fresas são chamadas frontais ou de topo.

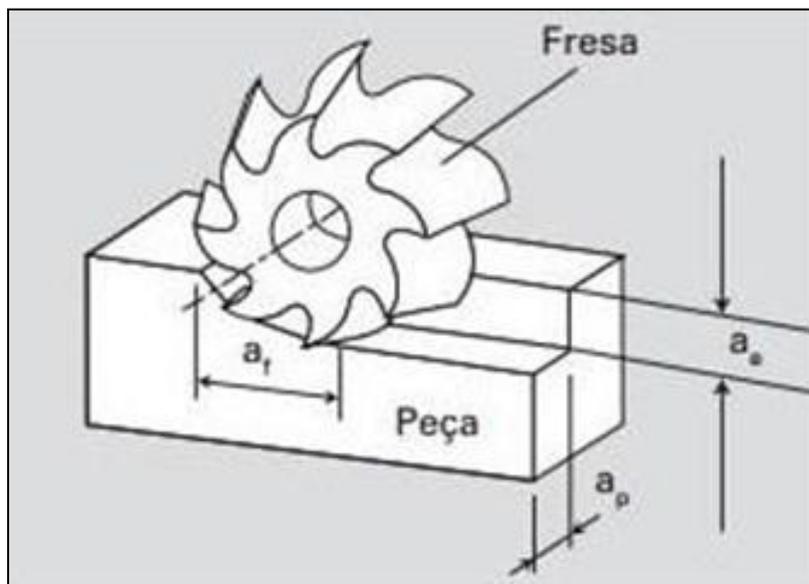
Figura 4 - Fresamento frontal.



Fonte: SECO Fresamento, 2012.

No fresamento tem-se como principais parâmetros o avanço, avanço por dente, profundidade de penetração, penetração de trabalho e penetração de avanço conforme exemplificado na Figura 5.

Figura 5 - Principais parâmetros de fresamento.



Fonte: MACHADO et al., 2009.

- O avanço (f) é a distância deslocada pela fresa a cada volta completa, medida no plano de trabalho. É dado em milímetros por rotação.
- O avanço por dente (f_z) é a distância dada em milímetros (mm) entre a

superfície já usinada e a que está em processo de usinagem, medida no plano de trabalho e na direção do avanço, para cada aresta cortante da ferramenta.

- Profundidade de penetração (a_p) é a penetração da ferramenta na peça, medida perpendicularmente em relação ao plano de trabalho.
- Penetração de trabalho (a_e) é quanto à ferramenta penetra em relação à peça, medida no plano de trabalho e em uma direção perpendicular à direção de avanço.
- Penetração de avanço (a_f) é a indicação da penetração da ferramenta medida no plano de trabalho e na direção de avanço.

3.4 Usinagem com alta velocidade

A usinagem com alta velocidade (HSM - High Speed Machining ou HSC - High Speed Cutting) é um processo muito usado na indústria, e pode ser viável para todo processo de usinagem de metais leves, não ferrosos e plásticos, sendo adequado apenas para o corte final. Sua participação no custo final dos componentes mecânicos pode ser muito alta e por isso nos últimos anos a usinagem com alta velocidade (HSM) tem ganhado importância. Assim, tem sido dada maior atenção ao desenvolvimento e à disponibilização no mercado das tecnologias para velocidades de avanço e rotações muito elevadas. Mas, antes que a tecnologia HSM possa ser empregada de uma forma econômica, todos os componentes envolvidos no processo de usinagem, incluindo a estrutura da máquina, o eixo-árvore, as ferramentas e as pessoas envolvidas precisam estar alinhados com as peculiaridades do processo. As máquinas devem ainda satisfazer requisitos particulares de segurança. Por isso, há sempre a necessidade de se buscar inovações tecnológicas nesse processo (SOUZA, 2012).

Quando se fala em usinagem com altas velocidades, a maioria das pessoas tende a associar tal processo ao fresamento. A explicação é simples: o fresamento é de fato a operação em que a HSM/HSC ganhou maior destaque, mas não está restrito a essa operação. Altas velocidades de corte também são empregadas no torneamento de ferros fundidos, alumínio ou outros não ferrosos, superligas resistentes ao calor e em especial no torneamento de materiais endurecidos. A HSM/HSC é utilizada, sobretudo para a produção de

componentes automotivos e componentes das indústrias de engenharia em geral e tem como vantagem principal a alta produtividade e, em algumas aplicações, o acabamento da superfície também aparece como fator extremamente positivo, como no caso do torneamento de materiais endurecidos (LANDI, 2003).

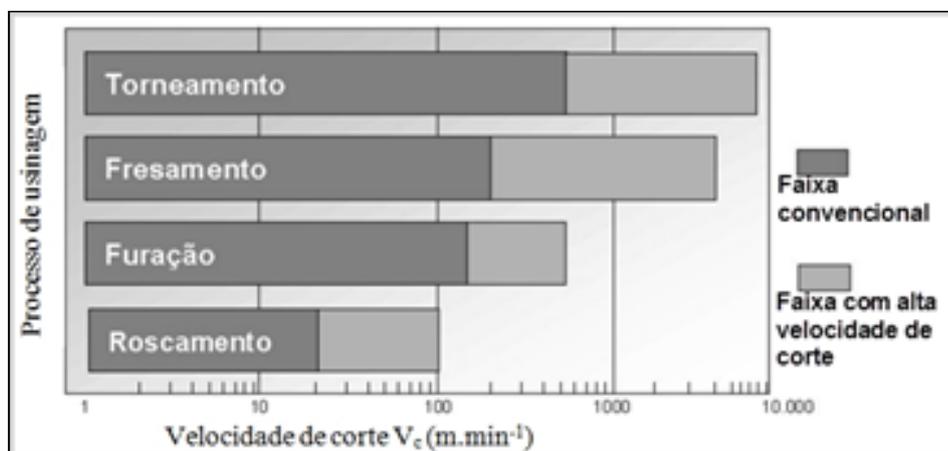
Segundo Oliveira (2003) a velocidade que caracteriza a usinagem em altas velocidades ainda é discutida entre os pesquisadores porque depende diretamente do material a ser usinado e existem diferenças muito grandes nos valores, especialmente quando se trata da usinagem dos materiais pertencentes ao grupo de aços temperados e ligas termorresistentes.

Para Brandão e Coelho (2011), deve-se considerar que a usinagem a altas velocidades pode variar substancialmente de duas formas:

A primeira variação depende do material a ser usinado, como no caso do fresamento ou torneamento de ligas de titânio, nos quais as velocidades de corte entre 100 e 500 m/min são consideradas altas. Por outro lado, para ligas de alumínio, essa faixa de velocidade é considerada convencional, pois para este material a velocidade de corte pode atingir 10000m/min. A segunda consideração a ser feita está direcionada ao processo de retificação, em que a faixa de velocidade de corte convencional varia de 1200 a 3600 m/min. A alta velocidade, essa faixa aumenta significativamente e pode oscilar entre 12000 e 36000 m/min.

Dessa forma, ainda existe a necessidade de uma definição precisa do marco divisório entre a velocidade convencional e altas velocidades de corte, já que para cada processo de usinagem há lacunas a serem preenchidas para adequações dentro de normalizações ou definições mais precisas (BRANDÃO; COELHO, 2011). De acordo com Müller e Soto (1999), a faixa de velocidade de corte também está relacionada a cada aplicação específica, conforme mostra a Figura 6.

Figura 6 - Faixa de velocidade convencional e de alta velocidade de corte.



Fonte: MÜLLER; SOTO, 1999.

De acordo com Ferraresi (2012), com o aumento da velocidade de corte pode-se ter um aumento no volume de material removido, uma redução das forças de corte e a melhoria na qualidade superficial. Porém, um fator negativo que o processo apresenta é uma redução da vida útil da ferramenta de corte. As ferramentas também devem estar à altura das condições severas que se originam com as altas velocidades de corte.

Apesar de a qualidade da superfície do material ser melhor nesse tipo de usinagem, a força empregada e a vida útil da ferramenta utilizada decrescem à medida que a velocidade de corte aumenta. Logo, algumas medidas devem ser tomadas para que a razão custo-benefício ainda seja favorável às perspectivas de uma determinada indústria. Então, o material da ferramenta de corte deve ser de alta dureza e sua resistência ao calor elevada, para que a vida útil esteja em um nível aceitável (ERDEL, 1997).

Além disso, conforme acontece a penetração da ferramenta na peça que está sendo usinada, uma pequena parte do material é recalçada. Essa é denominada cavaco e seu volume produzido na usinagem com alta velocidade é maior. Entretanto, a HSM possui várias vantagens. O tempo necessário para que uma peça seja usinada é bem menor, o que garante uma produtividade muito maior para as empresas. E conseqüentemente, outros processos industriais, que dependem direta ou indiretamente de peças usinadas, vão ter uma eficiência maior (ERDEL, 1997).

Do mesmo modo, não é necessário utilizar fluidos de corte, porque esses servem para diminuir o dano causado pelo calor que o atrito gera na ferramenta e na peça. Já que o tempo de contato entre essas é pequeno, não acontece um aquecimento considerável (FERRARESI, 2012).

Segundo Schützer e Schulz (2003), dentre as vantagens enumeradas da HSM estão a possibilidade de utilizar velocidades de corte entre cinco e dez vezes superiores às que normalmente se utilizam nos processos convencionais, conforme conclusões do "*Institut für Produktionsmanagement, Technologie und Werkzeugmaschinen*" - PTW (Instituto de Gerenciamento da Produção, Tecnologia e Máquinas-Ferramenta) da "*Technische Universität Darmstadt*" (Universidade Técnica de Darmstadt) da Alemanha, mas com profundidades de corte e avanços bem menores. O PTW reavaliou as pesquisas de Salomon e pôde comprovar que, acima de certas velocidades de corte, as temperaturas de corte diminuem, em valores que

variam em função dos materiais estudados, sendo que estes valores de temperatura de corte se situam em valores bem menores em bronze, alumínio e outros metais não-ferrosos e sofrem menores variações, portanto permanecendo em valores mais elevados que nestes materiais, quando na usinagem dos aços e ferros fundidos.

Na usinagem em altíssimas velocidades, o aumento das velocidades de corte produz: aumento da quantidade de material removido, melhoria da qualidade superficial das peças usinadas e diminuição das forças de corte. Entretanto, há uma substancial diminuição da vida das ferramentas, fazendo-se necessária uma avaliação do custo destas ferramentas por peça produzida ou um balanço de custos em que se justifique compensar o custo das ferramentas com os ganhos em termos de produtividade e qualidade (SCHÜTZER e SCHULZ, 2003).

A usinagem com alta velocidade também apresenta uma precisão dimensional maior comparada à usinagem convencional e as peças trabalhadas possuem uma rugosidade baixa, ou seja, a superfície do material é muito lisa, o que é bastante importante para o manuseio de alguns materiais. Por ser uma técnica que apresenta uma produtividade significativa, as indústrias demandam pesquisas que melhorem o desempenho da HSM, principalmente no que se refere às máquinas e ferramentas de corte (OLIVEIRA, 2003).

O conhecimento dos mecanismos de desgaste permite um melhor desempenho nas operações de usinagem, porque haverá uma seleção mais adequada da ferramenta e das condições de usinagem. Além disso, o estudo das características do material, que compõe a peça que será usinada, também é fundamental. Sabe-se que as características mecânicas, metalúrgicas e térmicas de certas ligas, por exemplo, não são favoráveis aos processos de usinagem, o que eleva seu nível de desgaste. Portanto, o desenvolvimento de inovações tecnológicas em máquinas e ferramentas de corte, mecanismos de desgaste e características do material usinado são de extrema importância para que o processo de usinagem em alta velocidade tenha uma produtividade adequada. (SILVA et al., 2004).

Até o momento, não existem uma única concepção sobre o que vem a ser usinagem com altas velocidades. Portanto pode-se definir como uma combinação de altas velocidades de rotação com altas velocidades de avanço, dependendo do material que se está usinando, tendo por finalidade aumentar a velocidade de corte e de avanço por dente em até 10 vezes sobre os dados

convencionais, além de proporcionar melhor acabamento superficial juntamente com significativas reduções de custos (HELLENO, 2004).

Neste tipo de usinagem muitos aspectos mudam, pois não basta somente adquirir uma máquina que tenha alta velocidade de rotação do eixo-árvore. É necessário todo um treinamento e formação de pessoal que esteja capacitado a operar tais equipamentos e dominar toda a nova tecnologia envolvida, que vai desde o uso de desenho auxiliado por computador e manufatura assistida por computador (CAD/CAM) juntamente com o processo de usinagem auxiliado por comando numérico computadorizado (CNC) com detalhes tais como, parâmetros de corte, sistemas de interpolação do trajeto da ferramenta de corte, ferramentas de corte, bem como o sistema de porta-ferramentas que será adotado. De forma que esta tecnologia permita dar resposta às variáveis envolvidas no ambiente de usinagem, tais como, material e tratamento térmico da peça a ser usinada, geometria da peça, sistema de fixação da peça junto a máquina e ferramentas de corte (HELLENO, 2004).

Com o processo de usinagem HSM, no qual as tensões de usinagem são bem menores que no fresamento convencional, a fabricação de matrizes e moldes pode ser substancialmente mais rápida, partindo-se do bloco de aço já temperado, eliminando-se assim a etapa de têmpera e revenido na peça usinada, momento de grande preocupação dos ferramenteiros, pela possibilidade de deformação durante esse tratamento (SILVA, 2007).

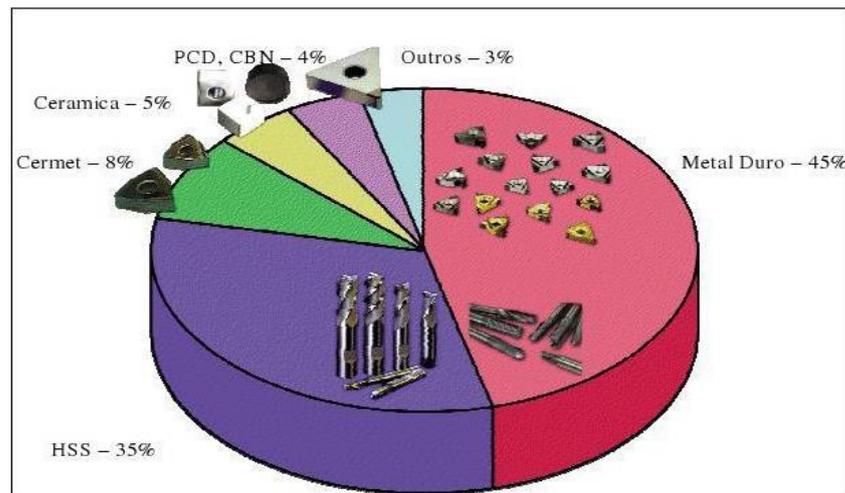
3.5 Ferramentas de corte

Algumas ferramentas utilizadas em processos convencionais, podem ser usadas em HSM com bons resultados. Este fenômeno se baseia no fato de que na usinagem em altas velocidades a ferramenta se desloca de forma muito rápida, porém removendo pequenas porções de material em cada passe realizado. Assim são obtidos altos valores de velocidade de corte e de avanço, porém baixos valores de profundidade de cortes radiais e axiais, bem como baixas espessuras médias de cavaco. As altas velocidades de corte criam uma tendência de aumento do calor gerado, enquanto as pequenas profundidades e avanços de corte criam uma tendência à redução do calor gerado. Tal situação

acaba levando a um nível térmico suportável pela aresta de corte da ferramenta (OLIVEIRA, 2003).

Considera-se uma série de fatores na seleção do tipo de ferramenta de corte a ser utilizado na fresamento como: a microestrutura e a dureza do material, o processo de usinagem, condições da máquina operatriz, forma e dimensões da própria ferramenta, custo do material da ferramenta, condições de usinagem e características do material da ferramenta como alta dureza a quente, resistência ao desgaste, tenacidade e estabilidade química. As ferramentas mais utilizadas atualmente são feitas de compostos de matriz metálica e carbonetos, conhecidas como metal duro (ISCAR 2011). A Figura 7 evidencia os percentuais dessas ferramentas usadas nos processos de usinagem.

Figura 7 - Materiais empregados para ferramentas de corte.



Fonte: ISCAR, 2011.

3.5.1 Metal duro

O metal duro é um produto da metalurgia do pó muito utilizado na fabricação das ferramentas de corte. Possui características importantes para a realização de fresamento como, resistência ao desgaste necessária no processo de acabamento e tenacidade exigida no processo de desbaste. Inicialmente se apresentam em diversas formas de pós-metálicos que são misturados, prensados e sinterizados, formando um material de alta densidade, composto de carbonetos de tungstênio, usualmente combinados com carbonetos de titânio, tântalo ou nióbio incrustado no metal ligante, gerando resistência ao desgaste e tenacidade (DINIZ et al., 2008).

O metal duro foi desenvolvido a partir de 1923 na Alemanha, contendo apenas carboneto de tungstênio e cobalto – WC/Co (MITSUBISHI, 2001). Foi sendo aperfeiçoado, tornando-se um dos mais notáveis materiais para a construção de ferramentas de usinagem mecânica. Com a chegada do metal duro, as velocidades de corte atingiram valores em torno de oito vezes, chegando a valores entre 250 e 300 m/min. Valores estes que eram em torno de 35 m/min, com o uso dos aços-rápidos (MACHADO et al., 2009).

Ao final da década de 1920, conseguiu-se produzir em laboratório o carboneto de tungstênio (WC) em pó pela primeira vez e este, misturado com o cobalto (Co) também sob a forma de pó de granulometria bastante fina, permitiu que fosse lançado comercialmente, e ficou conhecida como “WidiaTM”, contração das palavras alemãs “Wie Diamond” ou “Como o Diamante”, devido à sua extrema dureza. A composição original do metal duro continha somente 81% WC, 6% C e 13% Co, como ligante, o que foi sendo aperfeiçoado com o desenvolvimento de pesquisas (STEMMER, 1995). Ainda na década de 1930, o metal duro recebeu aditivos para melhoria de suas qualidades superficiais. Os primeiros estudos sugeriram a adição de carboneto de titânio (TiC), carboneto de tântalo (TaC) e carboneto de nióbio (NbC) ao WC/Co para reduzir efeitos de desgaste de cratera durante a usinagem de aços. Sua excelente resistência ao desgaste, elevada resistência mecânica e altos níveis de tenacidade fez com que rapidamente seu uso se propagasse, principalmente para a usinagem de ferros fundidos e materiais não ferrosos, apresentando resultados ruins na usinagem de aço, devido ao acelerado desgaste de cratera. Outra de suas características é a manutenção da dureza a quente, em torno de 400 HV a 1000 °C, (ABRÃO, 2005 apud SILVA 2007).

Atualmente pode-se definir o metal duro como uma liga composta fundamentalmente pelo carboneto de tungstênio (WC) e cobalto (Co). Este material contém também a adição de carbonetos de tântalo (TaC), de nióbio (NbC) e de titânio (TiC). Entretanto, o carboneto de tungstênio é o principal constituinte e influencia diretamente a dureza do composto, sendo o cobalto o elemento aglomerante que influencia diretamente a tenacidade. Os carbonetos são adicionados para melhorar propriedades como a dureza a quente, a resistência ao desgaste químico e a resistência à deformação (SECO, 2012).

A utilização de metal duro em ferramentas de corte para usinagem representou uma guinada neste processo, pois substituía matrizes de diamante, que

eram muito caras. O metal duro é um material que apresenta elevada resistência ao desgaste, e por isso pode ser aplicado no fresamento a altas velocidades, além de ser refratário, sendo assim ele se apresenta como uma das melhores alternativas para este processo que possui ambiente agressivo (UPADHYAYA, 1998 apud OLIVEIRA, 2007).

A norma ISO 513:2004 (International Organization for Standardization) normalizou a classificação de grupos de ferramentas por letra as quais foram usadas as letras (K, M e P) devido às características básicas do metal duro (DINIZ et al., 2008; FERRARESI, 2012). Posteriormente segundo Walter, 2000, 2004; Sandvik, 2002 mais três grupos de letras foram usadas (H, N e S) que relacionam além do metal duro, outros materiais para ferramenta e definem outras aplicações. Conforme descrito a seguir:

- ✓ Classe H – metais duros e cerâmicas ($Al_2O_3 + TiC$ e PCBN), para aplicações que incluem os materiais endurecidos como aço temperado; ferro fundido temperado; ferro fundido coquilhado e aço manganês;
- ✓ Classe K – este grupo foi o primeiro a ser desenvolvido, e é composto principalmente por carboneto de tungstênio aglomerado por cobalto. Como este metal duro não é resistente ao desgaste de cratera, são aplicados na usinagem de metais frágeis e ligas ferrosas que apresentam cavacos curtos e ainda em materiais não-metálicos;
- ✓ Classe M – neste grupo encontram-se os metais duros com propriedades intermediárias, destinados a ferramentas que tenham múltiplas aplicações. São aplicados na usinagem de metais e ligas ferrosas que apresentam tanto cavacos contínuos como cavacos curtos. São empregados na usinagem de aços inoxidáveis austeníticos, ferríticos e martensíticos; aços fundidos; aços-manganês; ferros fundidos e ferros fundidos maleáveis;
- ✓ Classe N – os metais duros e PCD, deste grupo, são aplicados em vários tipos de alumínio e outros metais não-ferrosos; plásticos e madeira;
- ✓ Classe P – compreendem os metais duros com elevado teor de TiC e TaC , o que confere elevada dureza a quente e resistência ao desgaste. São aplicados na usinagem de metais e ligas ferrosas que apresentam cavacos contínuos (ou longos) e dúcteis. As ferramentas desta classe são empregadas na usinagem de aços não ligados; aços de alta liga; aços fundidos e ferros maleáveis de cavacos longos. Por formarem uma grande área de atrito entre o cavaco e a superfície de saída da

ferramenta desenvolvem temperaturas elevadas e grande desgaste de cratera. Não são indicadas para aços inoxidáveis com estrutura austenítica;

✓ Classe S – neste grupo se encontram os metais duros e cerâmicas ($\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{SiC}$), indicados para a usinagem de ligas resistentes ao calor; ligas especiais à base de níquel ou cobalto; titânio e suas ligas; aços de alta liga e demais materiais de difícil remoção de cavacos.

Os revestimentos em ferramentas de metal duro possuem a finalidade de prolongar a vida útil da ferramenta através do aumento da resistência ao desgaste da camada superior que entra em contato com o cavaco e com a peça. Vários destes revestimentos são de carboneto de titânio e/ou óxido de alumínio, nitreto de titânio e carbonitreto de titânio e são geralmente aplicadas pelo processo de deposição química de vapor (GRAHAM, 1994). Abaixo são citados alguns tipos:

- Revestimentos de Carbonitreto de Titânio - TiCN é um revestimento cerâmico aplicado por deposição física de vapor. O TiCN é mais duro que o TiN e tem coeficiente de atrito menor. A dureza e tenacidade combinadas com a boa resistência ao desgaste são indicadas para ferramentas de fresar;
- Revestimento de Nitreto de Titânio-Alumínio - TiAlN consiste de deposição de camadas múltiplas aplicadas pela técnica de deposição física de vapor. Possui alta tenacidade e estabilidade à oxidação. É ideal para uso em altas velocidades de corte e avanço, com melhoria da vida da ferramenta. É usada para brocas e machos para corte sem lubri-refrigeração;
- Revestimento de TiAlN-X é uma variação do revestimento descrito acima. A deposição é feita em camadas ainda mais finas (nano camadas), que confere ao material simultaneamente alta resistência à temperatura, dureza e tenacidade elevada. É indicada para ferramentas de fresar em operações a seco e para corte de materiais mais duros;
- Revestimentos de Nitreto de Cromo (CrN) é um revestimento para ligas de alumínio e aços de baixa liga. Tem baixa tendência à formação de gume postiço;
- Revestimento de Nitreto de Zircônio (ZrN) é um revestimento cerâmico aplicado por deposição de vapor. É usado para ferramentas de usinagem de alumínio e suas ligas;
- Revestimentos de Diamante são formados por uma camada de diamante amorfo com baixíssimo coeficiente de atrito e alta tenacidade. É usado em ferramentas para usinar ligas de alumínio de baixo silício.

3.5.2 Nitreto Cúbico de Boro Policristalino (PCBN)

A crescente necessidade de se reduzir os tempos principais de usinagem, através do incremento da velocidade de corte, do avanço e da profundidade de corte, tem levado não só à otimização dos materiais para ferramentas já existentes, mas também tem motivado a busca de novos materiais (BOEHS; BET, 1994).

Usualmente o Nitreto Cúbico de Boro Policristalino (PCBN) tem sido muito usado nas ferramentas de usinagem para materiais endurecidos. As principais características das referidas ferramentas são apresentadas na Tabela 3. Conforme o elevado teor de CBN nas ferramentas (aproximadamente 90% em massa) aumenta a dureza e tenacidade, porém acarreta maior tendência à difusão quando comparado às ferramentas com baixo teor (aproximadamente 60% em massa) (SANDVIK, 1994 apud DINIZ e OLIVEIRA, 2008).

Tabela 3 - Características das ferramentas de PCBN.

	PCBN baixo	PCBN alto
Tenacidade à fratura [MPa m ^{-1/2}]	3,7	6,4
Condutividade térmica em [W/m-1K-]	–	100
Resistência à compressão [GPa]	3,5	2,73
Dureza [HV]	–	–
Dureza [Knoop - Pa]	27,5 Gpa	31,5 Gpa

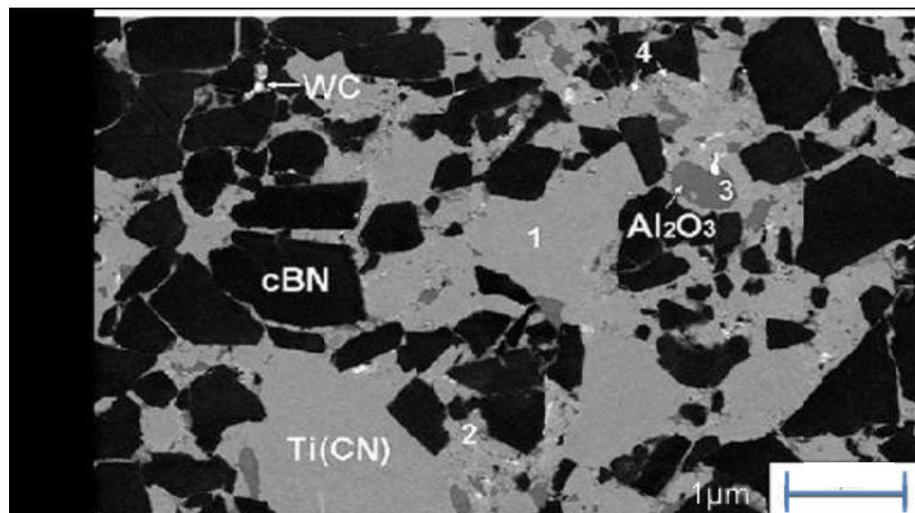
Fonte: GRZESIK, 2008.

As principais características das ferramentas de PCBN são os valores de dureza e de condutividade térmica. A dureza nas ferramentas de PCBN proporciona maior resistência ao desgaste abrasivo, ação de calor da região do corte através de gradiente de temperatura na ferramenta. Por outro lado, a maior condutividade térmica sugere maior afinidade química com o material usinado, proporcionando condições favoráveis ao surgimento do mecanismo de desgaste e de difusão (GRZESIK, 2008; SMITH, 2008).

As ferramentas de PCBN são classificadas em baixo teor de CBN conforme Figura 8 e alto teor de CBN conforme Figura 9. São constituídas em grãos

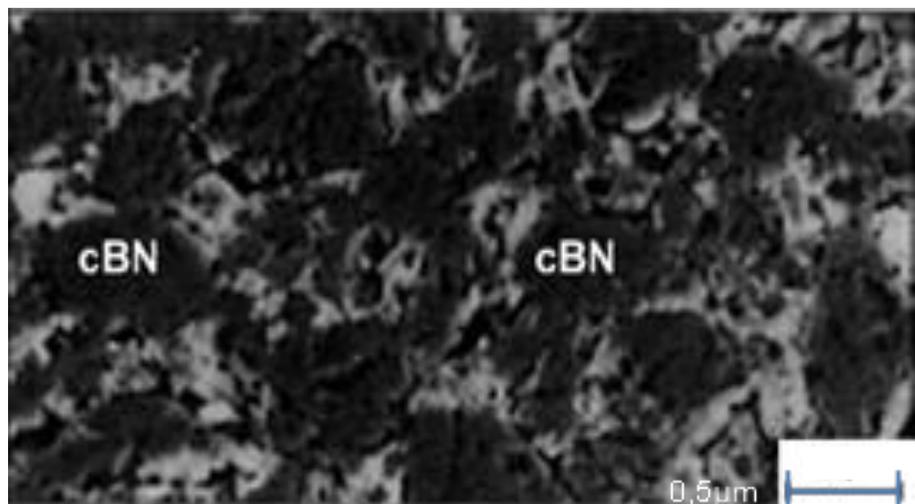
micrométricos de CBN dispersos em uma matriz composta de carbonetos metálicos, nitretos e óxidos, conforme apresentado abaixo (GRZESIK, 2008; TRENT e WRIGHT, 2000).

Figura 8 - Micrografia de uma ferramenta de PCBN com alto teor de CBN (90%).



Fonte: GRZESIK, 2008.

Figura 9 - Micrografia de uma ferramenta de PCBN com baixo teor de CBN (60%).



Fonte: GRZESIK, 2008.

Conforme Grzesik, 2008, a Figura 8 representa uma micrografia de uma ferramenta de PCBN alto teor, a qual possui uma fase cerâmica como aglomerante, geralmente TiC ou TiN que corresponde a uma ferramenta de alto teor de CBN, sendo que, nestas a fase aglutinante é geralmente metálica e possui os grãos nas ferramentas de PCBN são menores do que 1 μm.

3.6 Vida e desgastes das ferramentas de corte

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, sempre ocorrerão processos de desgaste na ferramenta, que mais cedo ou mais tarde exigirá a sua substituição. O estudo e o entendimento desses processos são fundamentais, pois permitem ações coerentes e efetivas para amenizá-lo, prolongando a vida da ferramenta. Além disso, o conhecimento do processo fornecerá subsídios para que ocorra a evolução dos materiais das ferramentas, tornando-as mais resistentes aos fenômenos negativos que ocorrem durante o processo de usinagem (MACHADO et al., 2009).

De acordo com Pigari (1995), três fatores contribuem para o fim da vida da ferramenta de corte: esforços mecânicos (forças de corte), vibrações do sistema e atrito dinâmico entre peça/ ferramenta e cavaco/ferramenta. E existem três fenômenos que ocasionam a perda de eficácia da ferramenta: avaria, desgaste e deformação plástica (MACHADO et al, 2009).

Segundo Machado et al (2009), avaria é o fenômeno que ocorre de maneira repentina e inesperada, causado pela quebra, lascamento ou trinca da aresta de corte. Ferraresi (2012) definiu quebra como a ruptura da ponta ou da aresta cortante da ferramenta e é originada pela ação de grandes forças de usinagem em alguns casos, como:

- Corte interrompido
- Raio de ponta, ângulo da peça ou ângulo de cunha pequeno;
- Parada do movimento de corte sem a retirada prévia da ferramenta da peça;
- Ferramenta muito dura, que proporciona alta fragilidade aos choques mecânicos;
- Carga excessiva sobre a ferramenta.

Por outro lado, as trincas são originadas pela variação de temperatura e dois fatores contribuem para sua ocorrência:

- Variações bruscas de temperatura;
- Solda da pastilha no cabo da ferramenta.

Pigari (1995) caracterizou lascamento como o fenômeno em que partículas relativamente grandes são retiradas de uma só vez da ferramenta. É mais comum em ferramentas de material frágil ou em processos em que a aresta de corte é pouco

reforçada. O lascamento pode ocasionar à quebra da ferramenta além de deteriorar o acabamento superficial da peça.

De acordo com Machado et al (2009), deformação plástica é a mudança de geometria da aresta de corte pelo deslocamento de material. Ocorre principalmente em ferramentas com resistência relativamente baixa ao cisalhamento e com maior tenacidade, como o aço rápido, as ligas fundidas e o metal duro. Maior dureza e maior resistência à deformação plástica são propriedades indicadas para evitar a deterioração do acabamento superficial da peça e deficiência no controle de cavacos. Outros exemplos de desgaste são: desgaste de flanco, desgaste de cratera e desgaste em forma de entalhe.

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”.

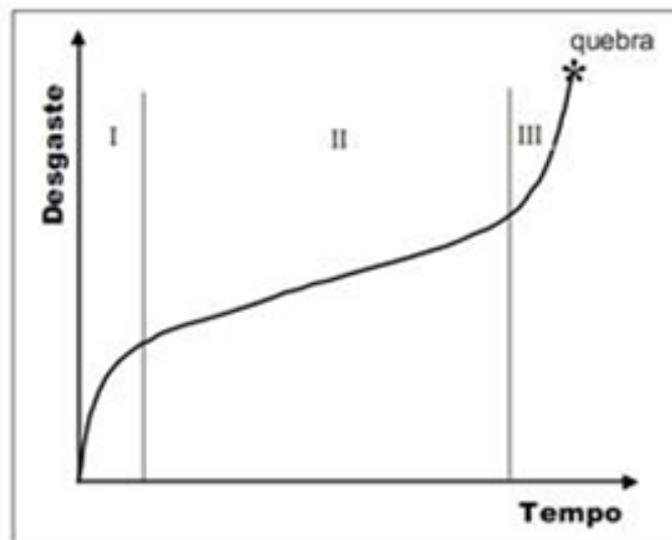
Em um processo de usinagem, existem duas causas fortes para a substituição da ferramenta de corte, encerrando sua vida:

- Ocorrência de uma avaria (trinca, lascamento ou quebra). Isso é muito raro de ocorrer no corte contínuo (torneamento), a não ser que as condições de corte usadas estejam acima das máximas recomendadas para cada tipo de ferramenta; ou a geometria da ferramenta seja inapropriada; ou, mais raro ainda, quando a ferramenta de corte já possuir algum defeito de fabricação. As avarias são mais comuns no corte interrompido (fresamento) devido aos choques mecânicos e térmicos inerentes a tais processos de usinagem;
- O desgaste ou a deformação atinge proporções elevadas que podem comprometer a usinagem dentro das especificações. O desgaste e a deformação acontecem tanto nas superfícies de folga como na superfície de saída das ferramentas, em cortes contínuos ou interrompidos (MACHADO et al.,2009).

O desgaste ocorre de maneira progressiva, implicando na perda de material tanto da superfície de saída como da superfície de folga. Pode ocorrer tanto no corte interrompido como no contínuo, quando ocorre o desgaste, que pode atingir níveis elevados e comprometer a qualidade do processo de usinagem. Uma ferramenta de corte, mesmo possuindo tenacidade suficiente para resistir as variações cíclicas durante o trabalho, não estará livre de uma perda progressiva de material. Esta perda progressiva ou desgaste fará com que a ferramenta aos poucos comprometa o processo. Portanto, sua reafiação ou substituição irá se tornar necessário (TRENT; e WRIGHT, 2000).

A evolução do desgaste da ferramenta até atingir o final de vida segue, na maioria das vezes, um padrão de comportamento como o mostrado na Figura 10, onde é possível verificar três estágios no desenvolvimento do desgaste na ferramenta. Segundo Machado et al., (2009) no primeiro trecho (estágio I) a ferramenta apresenta um rápido crescimento do desgaste, que é o resultado de uma acomodação tribológica do sistema. No final deste estágio há uma inflexão da curva que mostra uma diminuição da taxa de desgaste. Esta inflexão que ocorre no primeiro estágio irá se refletir no segundo trecho (estágio II), em que há uma acomodação da evolução do desgaste que cresce muito lentamente e com uma taxa praticamente constante. O último trecho (estágio III) começará quando no estágio anterior houver uma nova inflexão na curva, indicando que a taxa de desgaste está aumentando. Neste estágio a ferramenta atinge rapidamente o seu final de vida. Se neste estágio a ferramenta não for reafiada ou substituída, poderá rapidamente falhar, pois sua geometria de corte está comprometida devido ao desgaste, o que acarreta grandes níveis de atrito, geração de calor e elevadas tensões.

Figura 10 - Comportamento do desgaste de uma ferramenta.



Fonte: MACHADO et al., 2009.

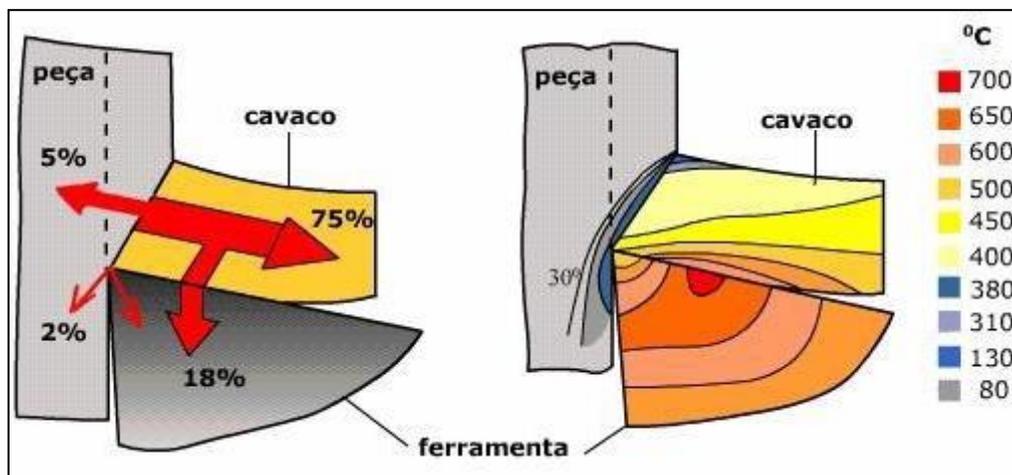
A substituição da ferramenta de corte no momento adequado, muitas vezes esta ligado ao bom conhecimento operacional do operador da máquina, pois a observação do corte de material durante a usinagem lhe possibilita detectar variações no processo como cor e formato do cavaco que podem estar ligados ao desgaste da ferramenta.

O desgaste de uma ferramenta de corte tem como um dos fatores de

influência o calor no processo de corte, o qual é gerado diretamente na aresta de corte na região de contato ferramenta-peça. Uma boa parte da energia despendida no trabalho realizado pela ferramenta ao cortar material é transformada em calor que por sua vez, tende a ser removido pelos cavacos em aproximadamente 80%. Os 20% restantes vão para a peça, a ferramenta e o fluido de corte conforme pode ser observado na Figura 11. “A temperatura na região de contato ferramenta-peça pode atingir 1400°C, sendo este o fator predominante para o referido desgaste da ferramenta” (STEMMER, 2006).

Segundo KONIG e KLOCKE (2002) citado por Tedesco, p 69, 2007. O trabalho mecânico efetivo empregado para a usinagem é transformado, em sua maior parte, em energia térmica. Existem fontes de calor na região de cisalhamento e nas regiões de atrito da ferramenta. O calor gerado é absorvido pela peça, pelo cavaco e pela ferramenta. Para uma ferramenta de metal duro na velocidade de corte de 60 metros por minuto, o cavaco absorve aproximadamente 75% do calor gerado, a ferramenta 18% e 7% vão para o material (peça).

Figura 11 - Geração de calor e distribuição de temperaturas na usinagem.



Fonte: ISCAR, 2011.

Nos processos de corte sob altas velocidades a formação do cavaco se dá de forma mais segmentada do que nos processos convencionais. Isto pode explicar, em parte, a menor transmissão do calor para a peça e ferramenta. Estima-se que aproximadamente 80% do calor gerado neste processo de usinagem sejam removidos pelos cavacos e o restante distribuído entre peça e ferramenta (OLIVEIRA, 2003).

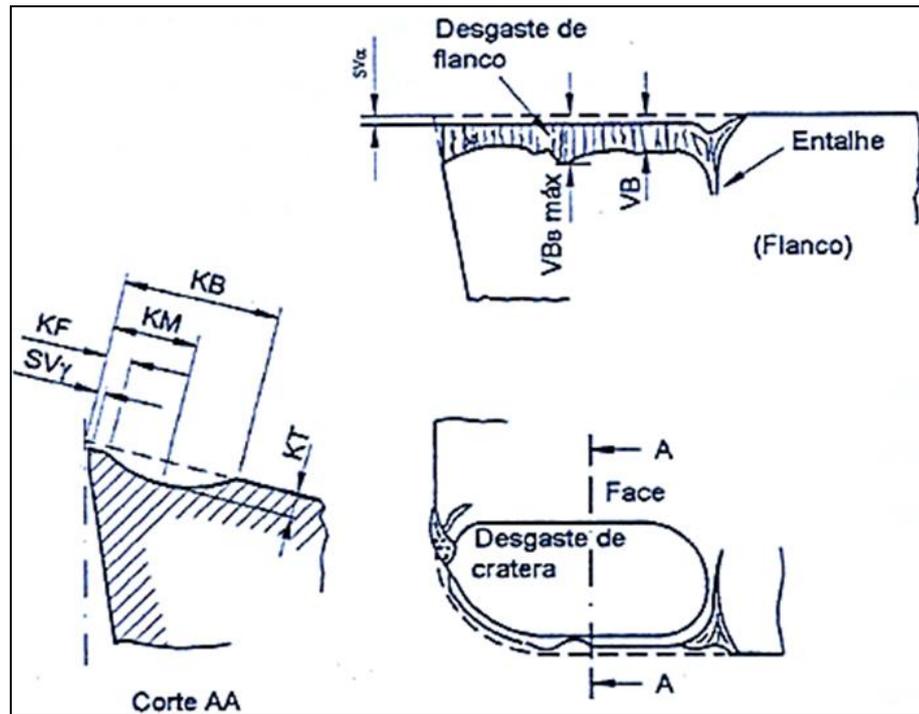
Devido ao caráter progressivo do desgaste de ferramentas de corte, é necessário, para evitar danos causados por falhas catastróficas e gastos excessivos por operação inadequada da máquina operatriz, que se defina até onde uma ferramenta de corte pode ser útil, e quando esta começa a perder suas características operacionais, ou seja, quando a ferramenta deverá ser reafiada ou substituída. A forma mais usual de determinar este ponto é dada pela norma ISO 3685 (1993). Esta norma estabelece ensaios de usinabilidade para determinar o período de tempo no qual uma ferramenta de corte pode trabalhar, até que seja necessária a sua substituição. Este período, denominado de “tempo de vida da ferramenta de corte” (T), é determinado através do tempo de trabalho necessário para que se desenvolva um defeito crítico. Segundo a norma, os critérios que devem ser adotados para ferramentas de metal duro, são:

- Desgaste de flanco médio, $VB_B = 0,3 \text{ mm}$;
- Desgaste de flanco máximo, $VB_{B_{\text{máx}}} = 0,6 \text{ mm}$, no caso do desgaste não ocorrer de forma regular ao longo do flanco;
- Profundidade da cratera, $KT = 0,06 + 0,3f$, (onde f representa o avanço);
- Distância frontal entre cratera e flanco, $KF = 0,02 \text{ mm}$;
- Falha catastrófica;

E podem ser observados na Figura 12, onde:

VB	Largura média de desgaste de flanco
$VB_{\text{máx}}$	Largura máxima de desgaste de flanco
$SV\alpha$	Deslocamento lateral do gume na direção de flanco
KB	Largura de cratera
KF	Largura do lábio no desgaste de cratera
KM	Distância da borda da ferramenta ao centro da cratera
KT	Profundidade de cratera
SVy	Deslocamento lateral do gume na direção da face.

Figura 12 - Desgaste da ferramenta de corte.



Fonte: MACHADO et al., 2009.

Durante a usinagem, a ferramenta é submetida a um processo no qual o desgaste depende da forma da solicitação e tempo de utilização da ferramenta. Dependendo das solicitações de corte e do conjunto “material a ser usinado/material da ferramenta de corte”, o desgaste de flanco pode ter seu máximo na periferia da zona de contato da ferramenta com a superfície transitória da peça. Esse desgaste surge através de solicitações térmicas e mecânicas, do caráter abrasivo e do contato direto com a atmosfera. O desgaste da ferramenta é relativamente rápido devido às solicitações térmicas e mecânicas elevadas, principalmente quando as condições do processo de usinagem são muito severas (WEINGAERTNER; SCHROETER, 2002).

3.6.1 Avarias na ferramenta de corte

Segundo Machado et al., 2009, as avarias são mais comuns nos processos de corte interrompido, onde as ferramentas estão submetidas a exigências extremas, principalmente com relação a choques térmicos e mecânicos, e pode acontecer de maneira repentina e inesperada. As avarias ocorrem geralmente sob a forma de:

- Quebra

- Lascamento
- Trinca
- Desgaste de cratera

Quebra e/ou Lascamento

Durante o processo de fresamento dos metais ocorrem esforços mecânicos (forças de corte), vibrações do sistema e atrito dinâmico entre peça/ferramenta e cavaco/ferramenta, os quais levam a ferramenta de corte ao fim de sua vida, que pode ocorrer subitamente através de quebra ou lascamento da aresta de corte, ou continuamente ao longo do tempo através de um desgaste progressivo. Alguns destes fatores são agravados pelo corte interrompido da ferramenta no material. A quebra ou lascamento da aresta de corte pode acontecer devido a alguns fatores, como: ferramenta muito dura, que proporciona alta fragilidade aos choques mecânicos; carga excessiva sobre a ferramenta; geometria inadequada da ferramenta; corte interrompido; parada instantânea do movimento de corte sem prévia retirada da ferramenta; velocidade de corte inadequada, etc. Partículas relativamente grandes são retiradas de uma só vez da ferramenta conforme pode ser visto na Figura 13, provocando a deterioração do acabamento superficial da peça e podem levar a quebra da ferramenta. O lascamento e também as trincas são mais comuns no corte interrompido, (FERRARESI, 2012).

Figura 13 - Quebra ou lascamento da aresta de corte.



Fonte: SANDVIK, 2002.

A quebra da ferramenta é um acontecimento muito danoso para o processo de

usinagem, pois normalmente causa a perda na peça usinada, que pode ser de custo elevado e às vezes danifica até o porta ferramenta, podendo ainda causar problemas à máquina ferramenta. Ainda, algumas vezes a quebra faz com que o porta-ferramenta saia da sua posição original, ocasionando tempos passivos de reposicionamento e zeramento da ferramenta (MACHADO et al., 2009).

Trincas

As trincas são causadas por variações bruscas de temperatura e/ou pela variação dos esforços mecânicos conforme pode ser visto na Figura 14. O calor gerado no processo de corte é em parte dissipado pela ferramenta. A região da ferramenta na qual a temperatura é mais alta é a que está em contato com o cavaco. Nas zonas mais distantes desta, a temperatura é bastante inferior (FERRARESI, 2012). Em consequência disto a ferramenta se dilata e se deforma desigualmente. Esta dilatação se agrava nas ferramentas de metal duro, pois o coeficiente de dilatação térmica é aproximadamente a metade do coeficiente de dilatação térmica do aço (material que é construído o porta-ferramenta). Os insertos soldados deformam diferentemente dos suportes, e são sujeitos as tensões na superfície de contato ferramenta/suporte, que poderão conduzir a formação de trincas, as quais em geral se localizam no meio do inserto e se desenvolvem perpendicularmente à aresta cortante. (FERRARESI, 2012). O corte interrompido e variações na espessura de corte são os principais causadores de trincas por esforços mecânicos, as quais se desenvolvem paralelamente à aresta de corte.

Figura 14 - Trincas na aresta de corte.



Fonte: SANDVIK, 2002.

Desgaste de cratera

O atrito entre ferramenta e material durante o processo de corte, pode causar reações químicas que geram o desgaste de cratera. Ocorre na superfície de saída da ferramenta e é aumentada pela velocidade de corte, conforme a Figura 15. A craterização excessiva provoca enfraquecimento da aresta de corte, que pode romper-se e ocasionar o fim de vida da ferramenta (DINIZ, et. al., 2008).

Figura 15 - Desgaste de cratera da aresta de corte.



Fonte: SANDVIK, 2002.

3.7 Mecanismos de desgaste

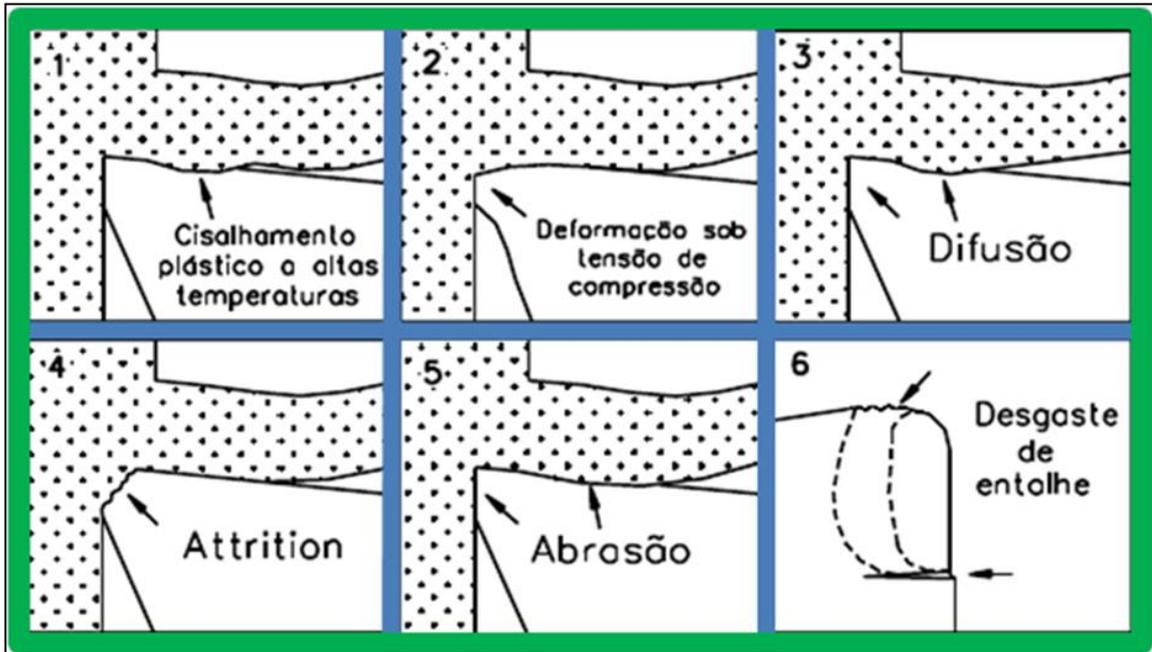
O desgaste da ferramenta de corte é um dos motivos da necessidade de sua troca ou reafiação. Este desgaste ocorre gradativamente e faz com que a ferramenta perca material e assim a ferramenta pode perder eficiência (SOUTO, 2007). De acordo com Trent e Wright (2000) os mecanismos de desgaste da ferramenta existentes (Figura 16) são:

- Deformação por tensões de cisalhamento plástico a altas temperaturas;
- Deformação por tensões de compressão;
- Attrition;
- Desgaste abrasivo;
- Desgaste difusivo;
- Desgaste de entalhe.

A literatura apresenta variações na classificação dos mecanismos de desgaste, porém, grande parte dos trabalhos existentes considera pelo menos seis mecanismos

diferentes e o surgimento desses mecanismos pode acontecer de forma isolada ou no mesmo instante durante o fresamento, o que muitas vezes dificulta a identificação precisa do mecanismo predominante (MACHADO et al., 2009).

Figura 16 - Mecanismos de desgaste da ferramenta de corte.



Fonte: MACHADO et al., 2009.

Ainda segundo Machado et al., 2009, todas as formas de desgaste acontecem devido aos mecanismos de desgaste como:

Abrasão

É uma das principais causas de desgaste da ferramenta. Tanto o desgaste de flanco quanto o desgaste de cratera podem ser gerados por abrasão. É proveniente do atrito entre a peça e a ferramenta, provocando arrancamento de partículas. É frequentemente causado pelas partículas duras do material da peça, sendo influenciado também pela temperatura, que reduz a dureza da ferramenta. Assim, quanto maior a dureza a quente da ferramenta, maior será sua resistência ao desgaste por abrasão.

Adesão

Ocorre quando da ruptura de microcaldeamentos na superfície da ferramenta de corte, os quais surgem devido à temperatura e pressão na zona de corte. O que contribui para a adesão é o fato da superfície inferior do cavaco, recém-retirado, estar livre de camadas protetoras de óxido, apresentando-se, portanto, muito ativa quimicamente. As partículas microcaldeadas representam barreiras que dificultam o escoamento e o deslizamento do cavaco sobre a ferramenta. Este fato provoca arrancamento das partículas soldadas, levando consigo, muitas vezes, pequenas porções do material da ferramenta de corte, causando o fim de vida da ferramenta. A utilização adequada de fluido de corte, principalmente com efeito lubrificante, bem como o revestimento da ferramenta, tem grande influência na diminuição do desgaste causado por tal mecanismo.

Aresta postiça

É causado pelo caldeamento do material da peça sobre a aresta postiça da ferramenta, essa camada de cavaco já presa à ferramenta se deforma e se encrua, aumentando a sua resistência mecânica e fazendo às vezes de aresta de corte. A aresta postiça de corte tende a crescer gradualmente, até que, em certo momento, se rompe, causando uma perturbação dinâmica. Partículas da aresta postiça podem se desprender e deslizar entre o flanco e a superfície de corte. Isto conduz a um desgaste excessivo do flanco por abrasão e a piora no acabamento da superfície usinada da peça.

Difusão

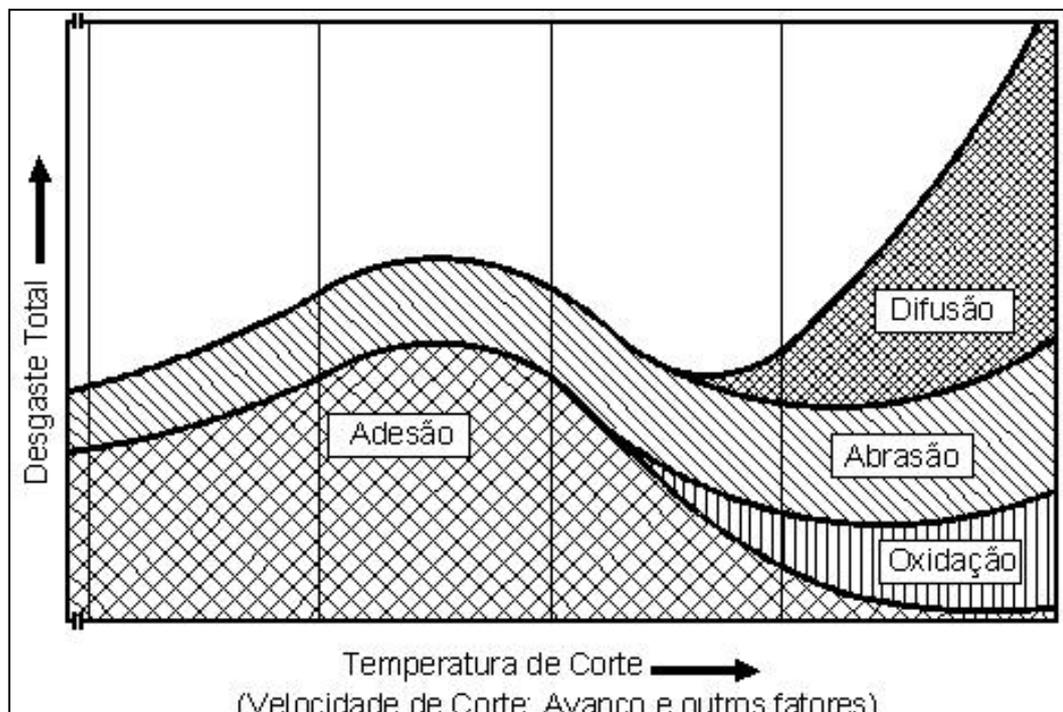
É um mecanismo fortemente dependente da alta temperatura e combinação de materiais presentes na zona de corte. As propriedades químicas do material da ferramenta e sua afinidade com o material da peça são determinantes para o surgimento deste mecanismo.

Oxidação

Ocorre a altas temperaturas e na presença de ar, com a formação típica de

carepas. Metal-duro já inicia sua oxidação na faixa de temperatura de 700 a 800°C, onde os metais duros apenas compostos de carboneto de tungstênio e cobalto oxidam mais facilmente do que aquelas ferramentas com adição de óxido de titânio e outros carbonetos. Este tipo de desgaste gerado pela oxidação se forma especialmente nas extremidades do contato cavaco-ferramenta em função do acesso de ar nesta região, sendo esta uma possível explicação para o surgimento do desgaste de entalhe. A Figura 17 apresenta um diagrama clássico com os diversos mecanismos de desgaste, que depende fortemente da temperatura e dos parâmetros de usinagem, sendo a velocidade de corte o mais importante, seguida pelo avanço e pela profundidade (MACHADO et al., 2009).

Figura 17 - Diagrama clássico dos mecanismos de desgaste.



Fonte: MACHADO et al., 2009.

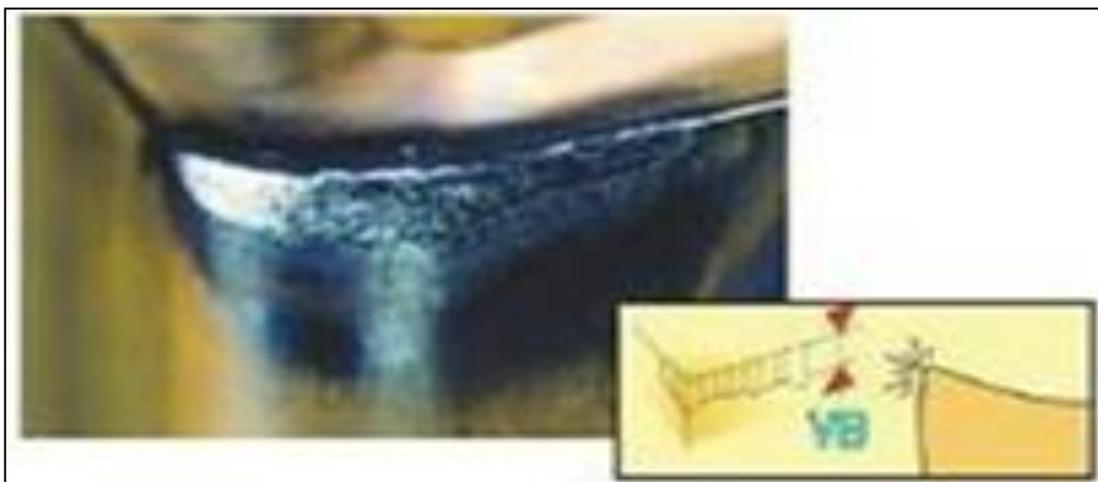
O mecanismo de desgaste mais frequente é o de desgaste por abrasão, em que partículas duras estão presentes entre as superfícies e é o principal causador do desgaste de flanco da ferramenta. Um jeito para se aumentar a vida útil da ferramenta de corte é determinar o mecanismo de desgaste atuante nela e evitá-lo ou então interrompê-lo caso este já ocorra (AMORIM, 2002).

A ferramenta de corte possui algumas áreas em que o desgaste ocorre com mais frequência, são elas as superfícies de saída e de folga. Nelas podem ocorrer os desgastes do flanco, cratera e entalhe, sendo o primeiro o mais importante na determinação da utilidade da ferramenta (SOUTO, 2007).

3.7.1 Desgastes de flanco (VB_B)

No desgaste de flanco há uma perda do ângulo de folga, promovendo um aumento dos níveis de contato entre a ferramenta e peça, ocasionando como consequência um aumento no atrito (SOUTO, 2007). Esse tipo de desgaste ocorre comumente na superfície de folga da ferramenta, atingindo a aresta principal de corte, a secundária, ou mesmo ambas. Quando a aresta principal de corte é atingida, o resultado é o aumento na temperatura e forças de corte, podendo ocasionar vibrações tanto na ferramenta como na peça a ser usinada. Já quando o mesmo se dá na aresta secundária, os resultados de um desgaste excessivo deste tipo são superfícies mal acabadas e peças com dimensões fora das especificações. Todo processo de usinagem gera desgaste de flanco, e em condições normais esse tipo de desgaste é o que pode apresentar maior risco de danos à peça e que exige maior potência de corte, sendo por isso o mais usado quando deseja-se avaliar os critérios de vida útil da ferramenta (AMORIM, 2012; DINIZ et al., 2008). A Figura 18 exemplifica o desgaste de flanco de uma ferramenta de corte.

Figura 18 - Desgaste de flanco da ferramenta de corte.

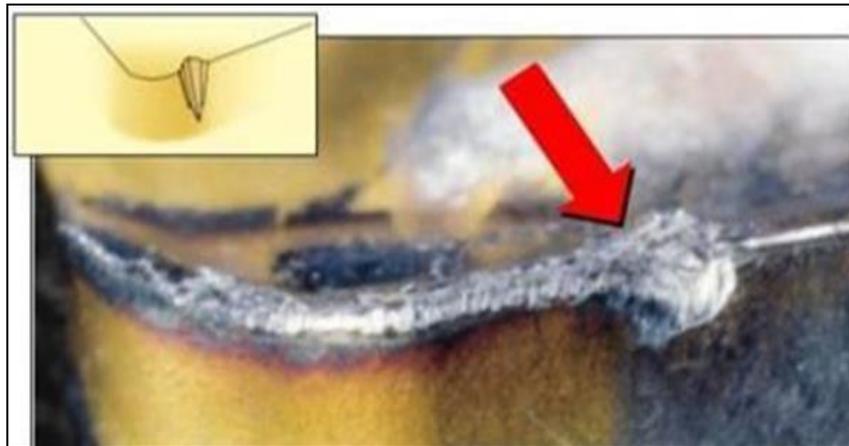


Fonte: SANDVIK, 2014.

3.7.2 Desgastes em forma de entalhe

Desgaste com característica de aderência de material caracterizado por dano excessivo localizado na face de saída e no flanco da inserto na linha da profundidade de corte. Causado pela adesão (solda por pressão de cavacos) e uma deformação na superfície endurecida um tipo comum de desgaste ao usinar aços inoxidáveis. Um entalhe pode ocorrer na extremidade da superfície principal de incidência ou vários entalhes podem ser formados na superfície secundária de incidência, sendo prejudicial ao acabamento superficial da peça como mostrado na Figura 19.

Figura 19 - Desgaste em forma de entalhe.

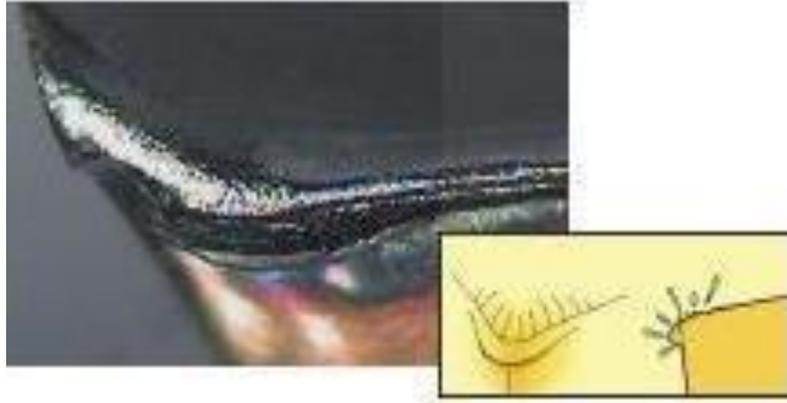


Fonte: SANDVIK, 2014.

3.7.3 Deformação plástica da aresta de corte

A deformação plástica da aresta de corte é um desgaste de característica térmica e ocorre quando o material da ferramenta é amolecido. Devido a elevada temperatura de corte para uma determinada classe. A pressão aplicada à ponta da ferramenta somada à alta temperatura pode gerar uma deformação plástica na aresta de corte, conforme mostrado na Figura 20. Tal deformação provoca deficiência do controle de cavacos e deterioração do acabamento superficial da peça. Se for permitido o crescimento desta deformação até valores altos, gera a quebra da aresta de corte. Isto pode ser evitado com uma ferramenta com maior dureza a quente e maior resistência a deformação plástica (DINIZ et al., 2008).

Figura 20 - Deformação plástica da aresta de corte.



Fonte: SANDVIK, 2002.

A compreensão dos fenômenos tribológicos nos processos de usinagem é de fundamental importância para correta definição do material de ferramenta, dos parâmetros tecnológicos e das estratégias de usinagem. A escolha do material de ferramenta e a melhoria no processo podem ser alcançadas com o entendimento dos mecanismos de desgaste e o posterior ajuste dos parâmetros tecnológicos (SCHULZ, 1999).

3.8 Integridades superficiais de peças usinadas

O termo Integridade da Superfície (IS) foi criado em 1964 por FIELD; KAHLES (1971) definido como: condição inerente de uma superfície produzida em uma usinagem ou outra operação de geração de superfície. Para esses autores a integridade da superfície (IS) envolve o estudo e controle de dois fatores:

- Rugosidade ou topografia da superfície;
- Metalurgia da superfície.

De acordo com Griffiths (2001) a “integridade superficial pode ser definida como o conjunto de características topográficas, mecânicas, químicas e metalúrgicas de uma superfície e suas relações com o desempenho funcional”. As condições básicas para que a integridade superficial seja caracterizada são o acabamento superficial, a macroestrutura e microestrutura. Porém as alterações mecânicas como: deformação plástica, alteração na dureza; tensões residuais, micro ou macro trincas; introdução de inclusões de processamento; vazios; rebarbas ou materiais estranhos aderidos à superfície; apresenta grande importância para o desempenho do material.

Para Hioki (2006) a maioria dos trabalhos se restringe à caracterização mínima ou padrão de superfícies usinadas; apenas alguns se aprofundam na relação dos parâmetros de corte sobre a integridade da superfície. Até 2001, a Organização Internacional para Normalização (ISO) tratava das características da integridade da superfície e topografia em normas separadas.

As alterações superficiais de um componente usinado são resultantes da combinação de diversos fatores, que podem se divididos em rugosidade, ondulações e falhas (SHAW, 1997).

De acordo com Machado et al., 2009 as ondulações se constituem de irregularidades superficiais ou erros geométricos cujos espaçamentos são maiores que as irregularidades consideradas rugosidades. Elas podem ser originadas por vibrações, flexões da ferramenta (devido às forças de corte), temperatura de corte, erros de fixação da peça (ou da ferramenta). Já as falhas são definidas como interrupções na topografia típica de uma superfície. Podem ser causadas por defeitos inerentes ao material da peça, como inclusões, trincas, bolhas, ou podem surgir também durante o processo de corte.

O acabamento superficial é influenciado por diversos fatores que incluem: geometria da aresta de corte, parâmetros de corte adotados, microdureza presente no material usinado que pode gerar vibrações no sistema máquina-ferramenta, dispositivo-peça, rigidez e estabilidade da máquina operatriz, deformação elástica e plástica de superfície da peça, propriedades mecânicas do material da peça e da ferramenta de corte, (WILKINSON et al., 1997; BODZLAK; et al., 2013).

Segundo Hioki (2006) na fabricação, o termo topografia da superfície é utilizado para descrever as características da superfície da peça que consiste da ondulação, rugosidade, marcas e falhas. As superfícies das peças apresentam irregularidades quando observadas em detalhes. Estas irregularidades são provocadas por sulcos ou marcas deixadas pela ferramenta durante a fresamento na superfície da peça. O acabamento superficial tem seus valores expressos em microns (μm) e é medido através do processo de medição da rugosidade.

O aumento da velocidade de rotação (rpm) do eixo arvore da máquina, nas operações de fresamento de acabamento superficial, normalmente proporciona uma qualidade superficial menos rugosa nos materiais metálicos. No entanto, à esta situação esta vinculada as condições mecânicas do conjunto máquina/ferramenta como capacidades e folgas, formato e afiação da ferramenta, condições de refrigerações, comprimento e esforço de corte, para que no momento da retirada do

material não ocorram vibrações que interfiram na estabilidade da operação.

A melhoria é rápida até que se alcance uma determinada velocidade crítica, devido à redução das dimensões da aresta de corte, que por sua vez, aumenta o esforço durante a retirada de material. Quando a aresta se reduz a um tamanho insignificante pouca melhora é obtida com o aumento da velocidade, e muitas vezes começam a surgir vibrações no conjunto máquina/ferramenta que podem causar ou favorecer o aumento de rugosidade devido ao surgimento das condições de corte forçado, ocasionadas pelo desgaste na aresta de flanco (VB_B) e aresta secundária, (STEMER, 1995; DEGNER e BOTTEGER, 1979 apud HIOKI, 2006).

A profundidade de corte afeta indiretamente a qualidade superficial, pois forças de corte, vibração e temperatura de corte são aumentadas com maiores profundidades de corte. Outros fatores que também exercem influência na rugosidade são o aumento do avanço, raio de ponta e desgaste da ferramenta, estratégias de corte, o sistema de CAM e o caminho de ferramenta usado na usinagem, material da peça, condição de refrigeração/lubrificação, bem como os parâmetros dinâmicos da usinagem, como força de corte, deflexão da ferramenta e vibração, e até alguns fenômenos térmicos, (STEPHENSON e AGAPIOU, 1996 apud AGUIAR, 2012).

No entanto cada função mecânica exige um tipo de acabamento superficial e a produção das superfícies onde se exige um acabamento superficial mais rigoroso exige, em geral, custo de fabricação mais elevado.

3.8.1 Rugosidade

As superfícies, por mais perfeitas que sejam, apresentam irregularidades que são erros de forma e de dimensões conhecidos como macrogeométricos e podem ser verificadas através de instrumentos convencionais de medição como: relógios comparadores, projetores de perfil, micrômetros, paquímetro, trenas etc., e erros microgeométricos conhecidos como rugosidade, caracterizados em uma superfície como um conjunto de pequenas saliências e podem ser avaliados com o uso de rugosímetros (FACCIO, 2002).

O parâmetro mais difundido e usado para a inspeção e tolerância de superfícies usinadas é o R_a (rugosidade média) embora alguns autores afirmem que o parâmetro R_z (rugosidade de profundidade média) pode fornecer dados da

superfície considerando os erros de forma, uma vez que é mais sensível à presença de grandes picos e vales, fornecendo uma melhor noção dos desvios (STEPHENSON e AGAPIOU, 1996 apud AGUIAR, 2012).

A rugosidade desempenha um papel importante no comportamento dos componentes mecânicos durante a montagem e ao longo do desempenho de trabalho do equipamento. A rugosidade é o conjunto de irregularidades, isto é, pequenas saliências e reentrâncias que caracterizam uma superfície (FACCIO 2002). Outro aspecto levantado por Faccio (2002) apresenta diversos fatores que são influenciados pela rugosidade do material que se deseja usar. Nesse contexto Rosa (2009) afirma que:

A rugosidade desempenha um papel importante no comportamento dos componentes mecânicos. Ela influi na: qualidade de deslizamento; resistência ao desgaste; possibilidade de ajuste do acoplamento forçado; resistência oferecida pela superfície ao escoamento de fluidos e lubrificantes; qualidade de aderência que a estrutura oferece às camadas protetoras; resistência à corrosão e à fadiga; na vedação e na aparência (ROSA, 2009).

Faccio (2002) aponta que a rugosidade é um fator de suma importância e sempre deve ser considerada ao se iniciar um processo de usinagem em determinado material. Ao se analisar um material visando determinar a causa de este possuir menor ou maior rugosidade devem ser levados em consideração fatores como a grandeza, a orientação e o grau de irregularidade da rugosidade.

Rosa (2009) salienta que durante a realização do processo de usinagem a rugosidade na sua grande maioria é causada por imperfeições nos mecanismos das máquinas-ferramenta, vibrações no sistema, desgaste das ferramentas, e pelo próprio método de conformação das peças.

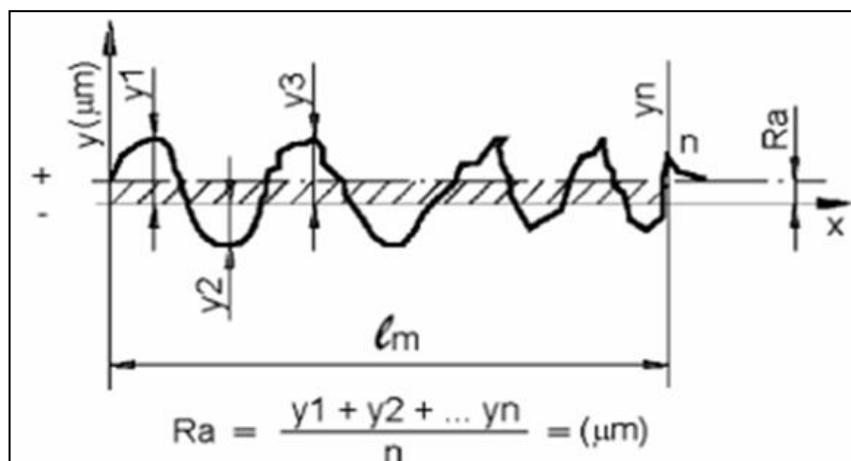
A rugosidade média (R_a) é a média aritmética dos valores absolutos das ordenadas de afastamento (y_1), dos pontos do perfil de rugosidade em relação à linha média, dentro do percurso de medição (l_m). Essa grandeza pode corresponder à altura de um retângulo, cuja área é igual à soma absoluta das áreas delimitadas pelo perfil de rugosidade e pela linha média, tendo por comprimento o percurso de medição (l_m). Na Figura 21, pode-se observar a região correspondente a esta medição.

Segundo Faccio (2002), a rugosidade média (R_a) pode ser utilizada no controle da rugosidade na linha de produção e em superfícies de pouca responsabilidade, onde sejam necessários acabamentos apenas para fins estéticos,

e pode ser medida através de um aparelho conhecido como rugosímetro. Filho (2011) define o rugosímetro como sendo um aparelho para determinação do perfil da rugosidade, com contato. Este é composto por agulha com ponta de diamante, com movimento em um eixo.

Além da rugosidade média os parâmetros de amplitude ainda se dividem em rugosidade máxima (R_{max}), rugosidade total (R_t) e rugosidade quadrática (R_q) (FACCIO, 2002).

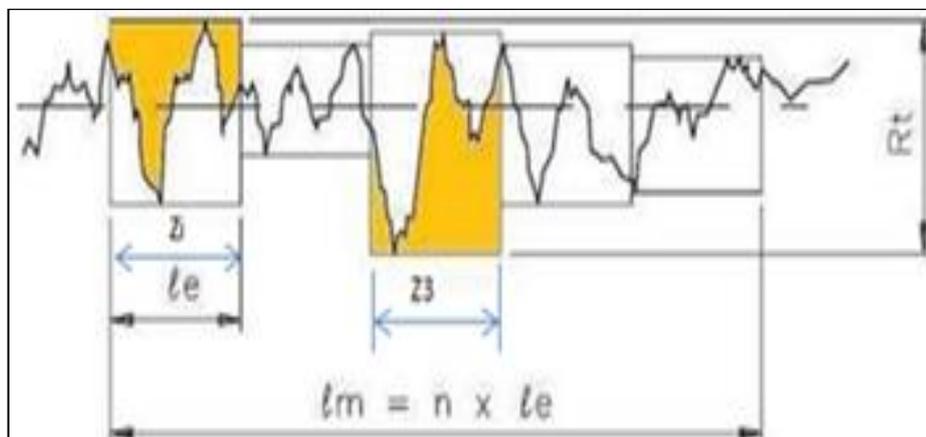
Figura 21 - Rugosidade Média (R_a).



Fonte: ROSA, 2009.

A rugosidade total (R_t) (Figura 22) é definida como a distância entre duas linhas paralelas à linha média que tangencia o perfil no pico mais elevado e no vale mais profundo, em um comprimento de medição (l_m) (MELLO et al., 2012).

Figura 22 - Rugosidade total (R_t).



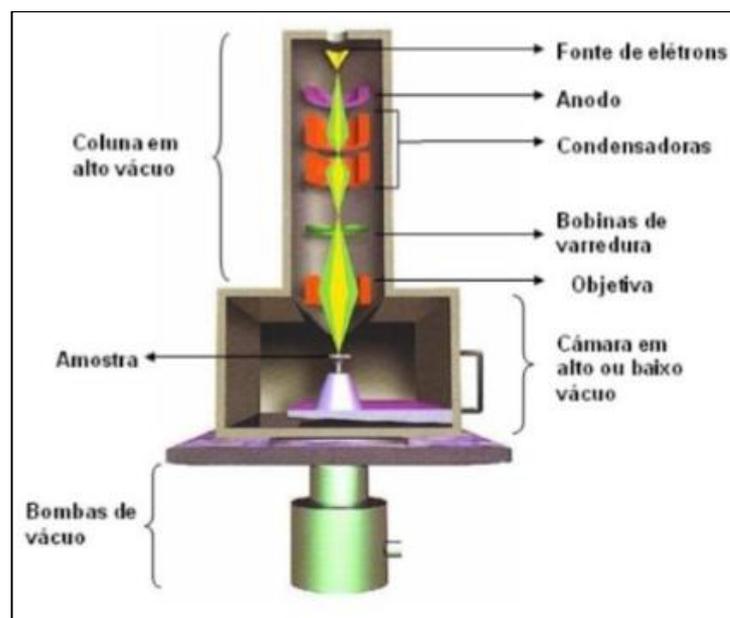
Fonte: Rosa, 2009.

3.8.2 Microestrutura

O conhecimento dos aspectos microestruturais de um material é de fundamental importância para o conhecimento das suas propriedades mecânicas. A identificação da microestrutura de um material permite um controle melhor da qualidade do mesmo. Isso é feito pela metalografia, que é o estudo das características estruturais ou da constituição dos metais e suas ligas, para assim relacioná-los com suas propriedades mecânicas, físicas ou químicas. Para se conseguir essa relação entre a estrutura observada, com auxílio de microscópio, deve-se seguir uma linha de procedimentos necessários à análise metalográfica (COUTINHO, 1980).

São diversas as técnicas para a realização da análise microestrutural também conhecida pelo nome de micrografia. Em geral, a análise metalográfica é composta pelo corte do material a ser estudado, pelo embutimento, pelo lixamento, pelo polimento, pelo ataque químico e pela análise ao microscópio. Um método comumente empregado para realizar a análise da superfície de uma amostra sólida é por meio da Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) (CATAI et al., 2006). O Microscópio Eletrônico de Varredura, esquematizado na Figura 23. Consiste basicamente de um canhão de elétrons, de uma lente condensadora e outra objetiva, de bobinas de varredura, do detector de elétrons e detector de raios-x, este último possibilita a microanálise química dos materiais (SKONG; HOLLER; NIEMAN, 2002).

Figura 23 - Esquema do microscópio eletrônico de varredura.



Durante o ensaio, ocorre uma interação entre o feixe de elétrons e a superfície da amostra gerando vários tipos de sinais, incluindo elétrons espalhados, secundários e Auger, fótons de fluorescência de raios-x e fótons de várias energias. Na câmara da amostra existem vários detectores que estão localizados para capturar estes sinais e enviá-los ao CRT (tubo de raios catódicos) levando a formação da imagem da microestrutura, (SKONG; HOLLER; NIEMAN, 2002).

Segundo Braghini (2002), Hioki (1998) e Zeren (2002) a HSM não produz alterações significativas nas camadas abaixo da superfície e a razão disto, é que as alterações ocorrem numa região muito mais próxima da superfície.

Para o aço AISI H13 endurecido, segundo Hioki (2006) o fresamento HSM altera a integridade da superfície mesmo com a utilização de ferramentas novas. Para avaliação das alterações são necessários métodos especiais para observação de bordas, uma vez que os efeitos provocados apresentam dimensões menores que 0,03mm.

3.8.3 Microdureza

Além da técnica de medição conhecida como macrodureza, existe duas outras técnicas de testes de dureza que são Knoop e Vickers (às vezes também denominado pirâmide de diamante). Para cada teste um indentador de diamante muito pequeno tendo geometria piramidal é forçado para dentro da superfície da amostra, e aplicado uma pequena carga que varia entre 1 e 1000 g. A resultante impressão é observada sob um microscópio e medida. Uma cuidadosa preparação superficial da amostra (lixamento e polimento) pode ser necessária para assegurar uma bem definida indentação que possa ser precisamente medida. Os números de dureza Knoop e Vickers são designados por HK e HV, respectivamente e escalas de dureza para ambas as técnicas são aproximadamente equivalentes. Knoop e Vickers são referidos como métodos de testes de microdureza com base na carga e no tamanho do indentador. Ambos são bem adequados para medição de durezas de selecionadas regiões pequena (CALLISTER, 2002).

Dureza pode ser definida, como sendo a resistência à deformação plástica localizada de um material. Essa resistência à deformação pode ser avaliada por vários tipos de escalas e métodos, os quais possuem a mesma concepção: um penetrador é forçado contra a superfície do material a ser testado, sob condições

controladas de carga e taxa de aplicação, faz-se a medição da profundidade ou do tamanho da impressão resultante, a qual por sua vez é associada a uma escala com um índice de dureza. Quanto mais macio um material, maior será a impressão e a profundidade, e menor será o índice de dureza. Cada método possui ferramentas distintas e respectivos índices de dureza, não sendo possível a comparação direta entre uma e outra escala de dureza (CALLISTER, 2002).

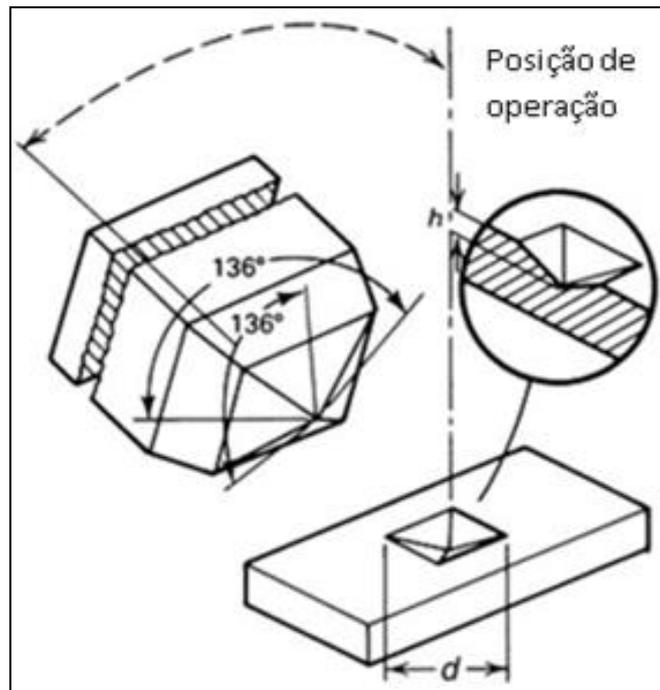
Segundo ASM International (2000) a correlação da tensão de escoamento e a dureza dependem do mecanismo de resistência do material. O teste de dureza pode ser uma maneira útil para estimar a resistência mecânica e características de alguns materiais. Pode ser uma ferramenta indispensável para avaliar materiais e estimar outras propriedades mecânicas de dureza.

Testes de dureza podem ser classificados de acordo com as grandezas de cargas de indentação. Há, portanto, macrodureza, microdureza, e nanodureza. Para realizar o teste de microdureza tem-se o Knoop e o Vickers (ASM INTERNATIONAL, 2000).

O ensaio de dureza Vickers consiste no cálculo das diagonais da indentação resultantes da compressão de um penetrador de forma definida sobre o material a ser testado. O teste Vickers usa um penetrador de diamante em forma de prisma, que permite ensaios de materiais mais duros, como aços de alta resistência. A Figura 24 apresenta o indentador em forma de prisma (ASM INTERNATIONAL, 2000).

Quando o penetrador incide numa região muito pequena fazendo com que a avaliação da dureza seja referente a áreas muito restritas de material, como por exemplo, precipitados, grãos de uma dada fase, películas de revestimentos muito delgadas, um grão específico chamamos o ensaio de microdureza. Segundo Machado et al., (2009), durante as operações de usinagem, as alterações microestruturais são inevitavelmente acompanhadas por alterações de dureza, sendo muitas das vezes necessário realizar ensaios de microdureza.

Figura 24 - Indentador em forma de prisma.



Fonte: ASM INTERNATIONAL, 2000.

A Indentação gera uma deformação plástica e elástica e um campo de tensão considerável em torno da medida realizada e, portanto, se uma segunda medida é feita muito perto da medida anterior, a sua forma pode se apresentar distorcida e isso produz resultados errôneos. Por isso é preciso respeitar um espaçamento entre as medidas de pelo menos 2,5 vezes o comprimento da diagonal (d) para o teste Vickers. O espaçamento mínimo entre a borda de uma amostra e o centro da medida também deve respeitar $2,5d$, contudo, valores baixos, como $1,8d$, têm se apresentado aceitáveis (ASM INTERNATIONAL, 2000).

De acordo com Boehs (1999), os estudos de microdureza são importantes para a identificação dos defeitos que podem estar presentes nas zonas afetadas pelo calor causado por operações de remoção de material. Exemplos de efeitos na superfície afetada, que podem ser identificados pela variação da microdureza, são os seguintes:

- Áreas de martensita destemperada ou super temperada;
- Amolecimento a partir da austenita resolucionaada;
- Amolecimento químico;
- Zonas termicamente afetada;
- Deformação plástica ou zonas endurecidas pelo trabalho.

As condições oferecidas pelos processos de usinagem afetam a dureza da superfície e da sub-superfície do corpo de prova, através da deformação plástica e elástica e da temperatura originada na remoção do material (ASM INTERNATIONAL, 1989; GHANEM et al., 2002; EKMEKCI, ELKOCA e ERDEN, 2005; SHAW, 2005).

No fresamento, o endurecimento da superfície e sub-superfície pode se originar por deformações plásticas ou sob elevadas temperaturas. Esforços mecânicos recalcam o cavaco na superfície usinada, fornecendo movimento às discordâncias que por sua vez, provocam o endurecimento da superfície, fenômeno conhecido como encruamento. Sob condições mais severas de usinagem a temperatura no corte pode ser tal que provoque alterações microestruturais, como a formação da camada branca (TRENT e WRIGHT, 2000; SHAW, 2005;).

Conforme Souza (2012) para correlacionar e validar as observações feitas anteriormente relativas à microestrutura e constatar se as condições de usinagem com alta velocidade de corte comprometem a integridade na camada logo abaixo da superfície, foram feitas medições de dureza a fim de se estabelecer um perfil dos valores de dureza a 50, 100, 150 μ m e também no centro da amostra, com base nos resultados dos ensaios de usinagem com velocidades de corte entre 400m/min, e 1400m/min, relativos aos experimentos de torneamento no ferro fundido cinzento FC 250, submetido à usinagem em altas velocidades de corte, utilizando ferramentas de nitreto de silício (Si₃N₄) que ele realizou. Segundo as observações feitas por ele, não houve uma variação expressiva da dureza nas diversas profundidades avaliadas.

4 MATERIAIS E MÉTODOS

A realização dos objetivos foi possível através de uma metodologia própria de ensaios. Os testes de usinagem foram realizados na Empresa Nematik Alumínio do Brasil e as análises de Laboratórios de Metalografia e de Caracterização foram realizadas no Departamento de Engenharia de Materiais do CEFET/MG (DEMAT). Para alcançar uma confiabilidade aceitável dos testes, foram realizadas três repetições para as condições de usinagem a seco com Metal Duro e PCBN. Dessa forma, desenvolveu-se o trabalho comparativo dos efeitos do comportamento de ferramentas de metal duro revestido e PCBN às condições de fresamento frontal com alta velocidade no aço ferramenta VH13ISO endurecido na operação de semi-acabamento.

4.1 Material do corpo de prova e tratamento térmico

O aço ferramenta VH13ISO foi fornecido pela empresa VILLARES METALS S.A.; nas dimensões de 101,6 x 20 x 50,8mm conforme solicitado e no estado recozido. Os corpos de prova foram temperados e revenidos pela empresa Metal Temper e após o processo de tratamento térmico tiveram a dureza alterada para 43 HRc. A Tabela 4 apresenta a composição química em peso (%) do aço utilizado nas amostras dos corpos de provas.

Tabela 4 - Composição química do aço ferramenta VH13ISO em peso (%).

C	Mn	Si	Cr	Mo	V	S	P
0,32	0,2	0,8	4,75	1,1	0,8	0,03	0,03

Fonte: VILLARES, METALS, 2006

As amostras foram tratadas ao mesmo tempo conforme o procedimento para maior homogeneidade da dureza. Em um forno de tratamento térmico as amostras tiveram a temperatura elevada gradativamente por um tempo de 180 minutos até atingir 500°C. Mantiveram-se as amostras à temperatura de 500°C por um período de 50 minutos. Após este tempo, elevou-se novamente a temperatura por um período de 210 minutos até atingir 1020°C. Posteriormente, manteve-se a 1020°C

por um período de 20 minutos. Concluído o ciclo de aquecimento, resfriou-se no óleo até atingir 100°C e iniciou-se o 1º revenimento. Novamente as amostras foram aquecidas por um tempo de 180 minutos até atingir 550°C. Mantiveram-se as amostras à temperatura de 550°C por um período de 120 minutos e após resfriou-se no forno. Para o 2º revenimento as amostras foram aquecidas por um tempo de 180 minutos até atingir 612°C. Manteve-se a 612°C por um período de 120 minutos e em seguida resfriou-se em ambiente aberto. Após atingir a temperatura ambiente iniciou-se o procedimento de medição da dureza, com o esmerilamento da superfície para obtenção de uma área lisa para medição da dureza. Realizou-se a medição da dureza Rockwell em três pontos diferentes para uma melhor confiabilidade da medida.

4.2 Ferramentas de corte

Realizou-se operação de fresamento frontal de semi-acabamento com o uso de insertos de metal duro revestidos e PCBN em uma fresa de diâmetro 20mm com capacidade de montagem de dois insertos, conforme pode ser visto na Figura 25. Foi utilizado inserto de metal duro cuja composição contém elementos de liga como W (Tungstênio), Co (Cobalto), Cr (Cromo) e C (Carbono) e uma cobertura composta de Nitreto de Titânio Alumínio (TiAlN). O inserto possui as arestas com raio de 0,8mm e ângulo de saída com 1º, conforme o código ISO XOMX 120408TR-D14.

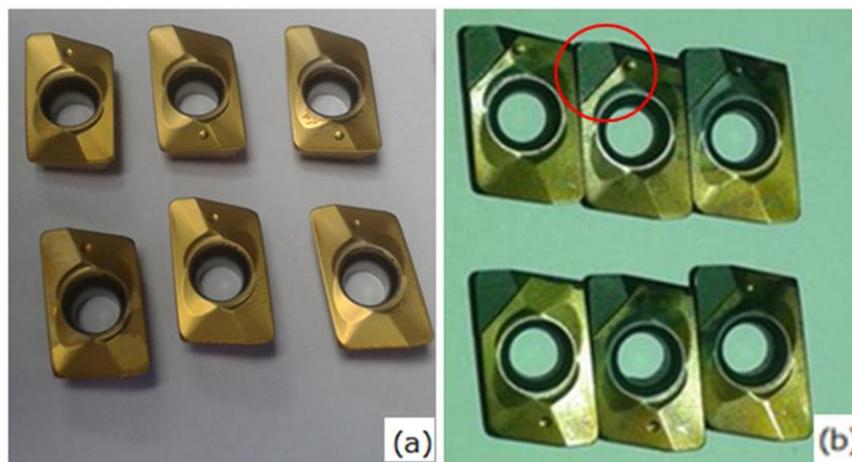
Figura 25 - Fresa com insertos intercambiáveis de diâmetro de 20mm.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Para a usinagem com o PCBN, foi adicionado um inserto de PCBN na aresta de corte, no formato triangular com 4mm de lados e 1mm de espessura mantendo o mesmo perfil original no inserto de metal duro conforme pode ser observado na Figura 26. Para manter as mesmas variáveis dos dois tipos de insertos, o procedimento foi realizado com um inserto de metal duro Figura 26 (a), nele fixado o inserto de PCBN na aresta de corte, através do processo de brasagem, conforme a Figura 26 (b). Este procedimento foi necessário devido não existir a ferramenta de PCBN conforme o código ISO XOMX 120408TR-D14.

Figura 26 - Insertos de Metal Duro (a) e PCBN (b).



Fonte: Elaborado pelo autor.

4.3 Equipamentos utilizados

Os experimentos foram realizados em um Centro de Usinagem MIKRON HSM 700 (Figura 27) que possibilita um valor mínimo de giro da ferramenta de 100rpm e máximo de 42000rpm. O Centro de Usinagem trabalha com o deslocamento da ferramenta e possui áreas de deslocamento nos eixos de $X = 700\text{mm}$; $Y = 550\text{mm}$; $Z = 450\text{mm}$ e capacidade de suportar uma carga na mesa de até 700kg. Os experimentos foram realizados com as seguintes rotações: 2387rpm, 4775rpm, 7162rpm e 9550rpm.

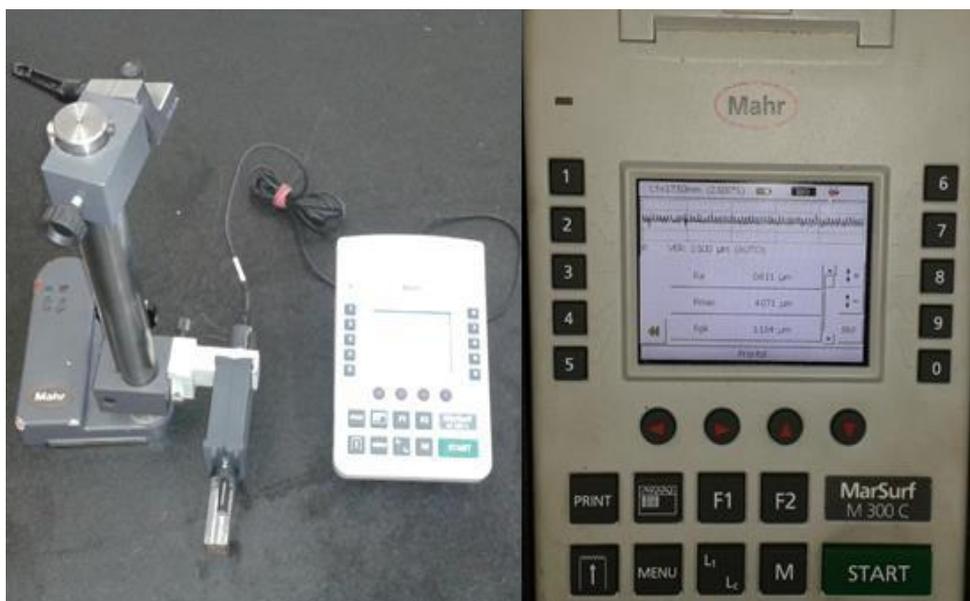
Figura 27 - Centro de usinagem MIKRON HSM 700.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Para medição da rugosidade utilizou-se o rugosímetro modelo Mahr Mar Surf 300C. A cada sequência de passes o corpo de prova foi retirado do centro de usinagem e medido a rugosidade média (R_a) e rugosidade total (R_t) com cut-off de 2,5mm. O rugosímetro pode ser visto na Figura 28.

Figura 28 - Rugosímetro Marh Marsurf M300C.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Para avaliação do desgaste nas arestas de corte do inserto, foi considerado o desgaste de flanco máximo ($VB_{Bm\acute{a}x} = 0,6\text{mm}$) conforme a Norma ISO 3685, 1999. O desgaste de flanco foi medido com uma lupa LH-10 20x, com resolução de 0,05mm do fabricante Holtermann Comercial e Técnica Ltda, após cada sequência de passes de fresamento. Esta lupa possui uma escala interna graduada em centésimos e regulagens de foco para melhor visualização. A visualização acontece na interface do material com a lupa por isso foi construído um dispositivo em Nylon com o mesmo comprimento do conjunto de corte para tornar possível a visualização das arestas de corte no mesmo plano de visualização da lupa conforme pode ser visto na Figura 29.

Figura 29 - Lupa, dispositivo e conjunto de corte.



Fonte: Elaborado pelo autor.

A dureza dos corpos de prova foram realizadas com o durômetro Galeleo (Figura 30) e foram medidas após a tempera, e após cada sequência de passes para verificação da dureza. Foi encontrado a dureza inicial e no término da usinagem de 43HRc.

Figura 30 - Durômetro Galeleo.



Fonte: Elaborado pelo autor .

4.4 Procedimento experimental

Cada ensaio foi realizado três vezes, mantendo os parâmetros de velocidade de corte e avanço por aresta para confirmação dos resultados. Na Tabela 5 é possível observar os parâmetros dos ensaios sob condição de corte a seco. Realizou-se a usinagem mantendo constantes as variáveis como: comprimento do conjunto de ferramentas de corte, altura do material preso na morsa, posição das arestas de cortes dos insertos, sentido de corte e quantidade de material por incremento de passe ($a_p = 0,25\text{mm}$) para evitar as possíveis variações que podem causar interferência na força de corte e conseqüentemente no desgaste da ferramenta. Definiu-se retirar no máximo 25mm na usinagem de cada amostra para evitar possíveis danos à microestrutura do material, e tornar-se possível uma análise confiável da estrutura do material. As amostras foram apoiadas sobre um calço apropriado e fixadas por uma morsa mecânica a fim de manter a parte a ser usinada 26 mm de altura excedente os mordentes da morsa e evitar a movimentação durante o corte.

Tabela 5 - Parâmetros de usinagem utilizados nos experimentos.

Ferramentas	v_c (velocidade de corte) m/min	f_z (avanço por aresta) mm
Metal Duro	150	0,05
Metal Duro	150	0,10
Metal Duro	150	0,20
Metal Duro	300	0,05
Metal Duro	300	0,10
Metal Duro	300	0,20
Metal Duro	450	0,05
Metal Duro	450	0,10
Metal Duro	450	0,20
Metal Duro	600	0,05
Metal Duro	600	0,10
Metal Duro	600	0,20
PCBN	600	0,05
PCBN	600	0,10
PCBN	600	0,20

Fonte: Elaborado pelo autor.

A fresa, porta inserto, foi fixada através de pinça em um mandril de cone ISO HSK40, exemplificada na Figura 31. Manteve-se a fresa porta inserto fixa com o comprimento de 100mm e a substituição dos insertos foram feitas sem a desmontagem da fresa porta inserto para se evitar variações no comprimento, o que poderia causar mais variáveis durante o processo de usinagem.

Figura 31- Mandril de cone ISO HSK40 para fixação da fresa de insertos intercambiáveis.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Os insertos foram montados sempre com a primeira aresta de corte para uso no fresamento, as arestas são identificadas pelo fabricante com uma pequena marca conforme pode ser observado na Figura 32. Mesmo possuindo duas arestas cortantes, foi utilizada somente uma aresta para comparação do corte e desgaste sob a mesma condição de usinagem.

Figura 32 - Identificação das arestas de corte.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Para verificação das dimensões de alinhamento dos insertos usou-se um equipamento de ajuste de ferramenta (*pré-setting*) conhecido como *Tool Adjusting Device* SECA KELCH, mostrado na Figura 33, que controla as possíveis diferenças dos insertos através de laser. Os insertos foram fixados na fresa porta inserto e o

conjunto fresa/inserto foi montado no dispositivo de ajuste de ferramenta (*pré-setting*) para conferir as alturas, concordância da aresta de corte e possíveis danos que à fresa porta inserto poderia sofrer durante o fresamento. O equipamento realiza as medições do inserto nas três dimensões (X, Y, Z) e raios comparando os lados cortantes.

Figura 33 - Tool Adjusting Device SECA KELCH.



Fonte: Elaborado pelo autor.

4.5 Análise dos mecanismos de desgaste

Para análise dos mecanismos de desgaste selecionou as amostras dos insertos que usinaram com os parâmetros mostrados na Tabela 5 e que apresentaram o maior desgaste de flanco (VB_{Bmax}) para facilitar as análises das imagens. Os mecanismos de desgaste da ferramenta foram avaliados por meio da análise de imagens geradas pelo Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV) mostrado na Figura 34, sobre os insertos utilizados após o fresamento atingir o valor máximo de retirada de material, ou o valor máximo do desgaste de flanco. O objetivo deste ensaio foi identificar os mecanismos de desgaste da ferramenta envolvidos durante o processo de fresamento frontal com alta velocidade. O equipamento de MEV utilizado é da marca Shimadzu, modelo SSX 550, Superscan.

Foram analisados os insertos com maior desgaste de cada velocidade de corte e avanço por aresta, através das ampliações das imagens de 100 e 500 vezes.

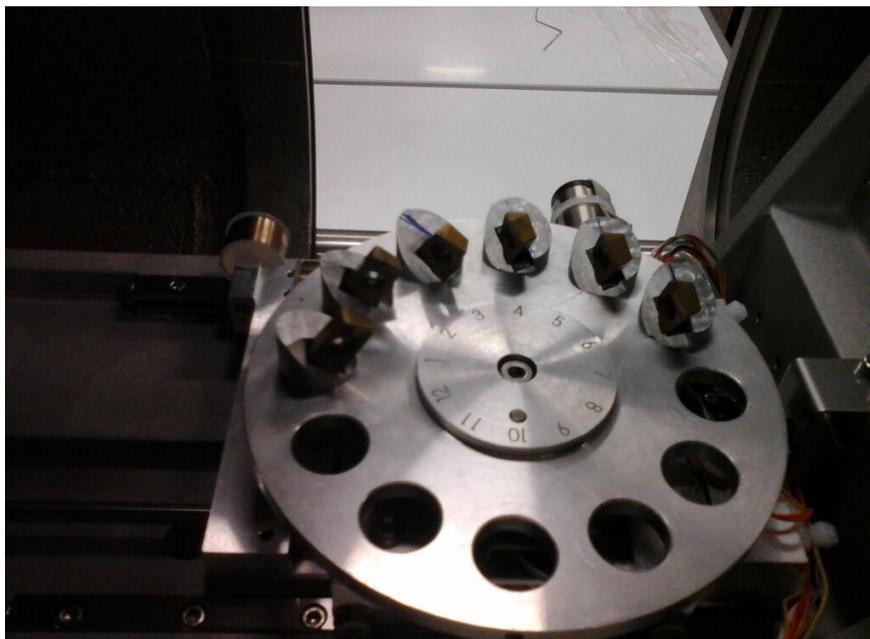
Figura 34 - Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV) SHIMADZU SSX-550.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Para análise dos mecanismos de desgaste nos insertos foram construídos seis suporte em alumínio com ângulos que possibilitaram um apoio padronizado dos insertos. Estes suportes tiveram os insertos fixados em sua face angular e foram encaixados no carrossel do Microscópio Eletrônico de Varredura conforme mostra a Figura 35.

Figura 35 - Fixação das ferramentas no carrossel do Microscópio Eletrônico de Varredura.



Fonte: Elaborado pelo autor.

4.6 Preparação das amostras para análise microestrutural

Para as análises metalográfica, as amostras (parte do material) foram cortadas dos corpos de provas e devidamente identificadas. Para se evitar o trabalho mecânico a frio, o corte foi realizado com o uso de um equipamento abrasivo conhecido como *cut-off* ou policorte com discos abrasivos finos (normalmente de alumina ou oxido de silicato), intensamente refrigerados evitando deformações devido ao aquecimento. O corte abrasivo oferece a melhor solução para este seccionamento, pois elimina por completo o trabalho mecânico a frio, resultando em superfícies planas com baixa rugosidade, de modo rápido e seguro. Para uma melhor preparação da amostra a ser analisada, os corpos de prova retirados das amostras foram embutidas no baquelite com pressão de compactação de 180Kgf no processo de embutimento a quente.

Após o embutimento, a superfície das amostras foram cuidadosamente lixadas usando lixas de diferentes granulometrias (#400 e #600) e polidas em uma máquina politriz com pasta de diamante para polimento metalográfico com os seguintes tamanhos de partículas: 3 μ m e 9 μ m e submetidas a um processo de ataque químico revelador com um composto de ácido nítrico, conhecido como Nital 3%, conforme pode-se observar na Figura 36.

Figura 36 - Amostra embutida e composto de ácido Nítrico.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Para as análise da microestrura, utilizou as imagens das amostras embutidas com o uso do MEV e ampliação de 1000, 2000 e 3000 vezes, onde possibilitou a visualização da microestrutura.

4.7 Microdureza

As medições de microdurezas foram realizadas utilizando um microdurômetro da marca Shimadzu, modelo HMV, com disponibilidade de carga: 0,01; 0,025; 0,05; 0,1; 0,2; 0,3; 0,5; 1 e 2kgf, conforme mostrado na Figura 37.

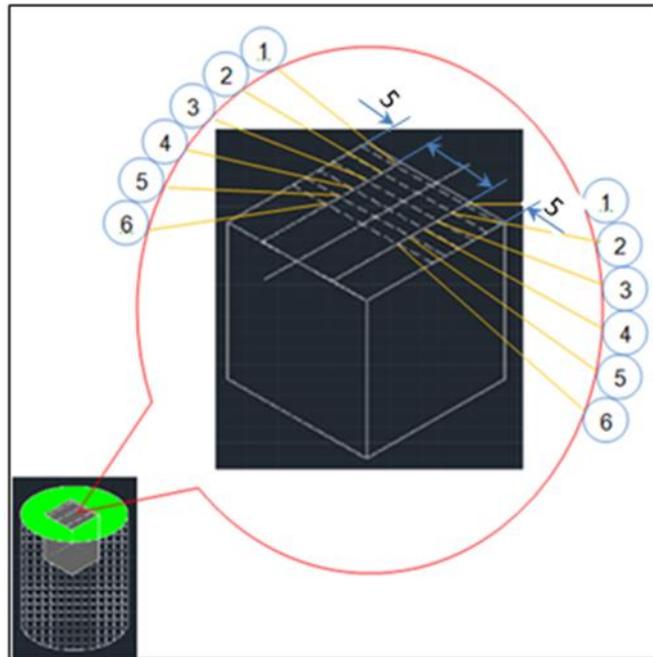
Figura 37 - Microdurometro Shimadzu.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Foram realizados 14 medições, em cada amostra com aplicação da carga de 0,2kgf por um período de 10s em 2 regiões diferentes do material para se obter valores de microdureza em diferentes profundidades. Os deslocamentos entre as medições respeitou um valor mínimo de 2,5 vezes a medida encontrada na diagonal e um alinhamento de 5mm das faces lateral do material, conforme se observa na Figura 38. As medições foram realizadas na sub-superfície da face usinada, sendo a primeira na linha 1 μ m (o mais próximo possível da face usinada) e as demais logo após respeitando os valores citados acima. Também foram realizados duas medições da microdureza na superfície usinada, sendo considerado ponto zero.

Figura 38 - Desenho das posições das medidas das microdurezas.



Fonte: Elaborado pelo autor.

5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

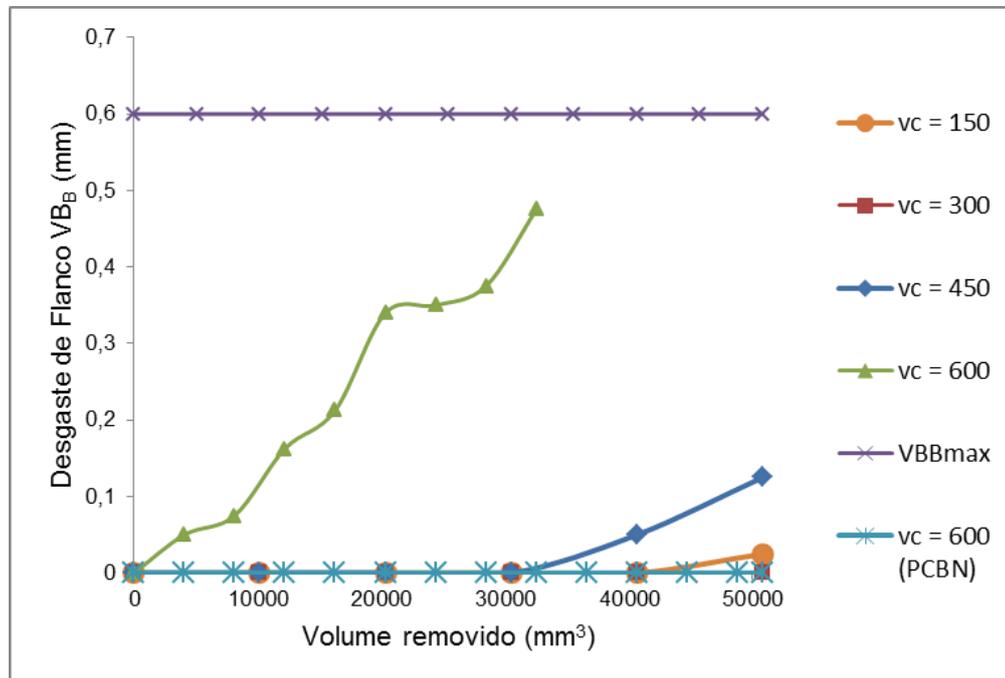
A operação de usinagem de alta velocidade de corte, na condição de semi-acabamento/acabamento é normalmente realizada na confecção de moldes e matrizes onde existe a necessidade de ganhos de tempo e qualidade superficial. Esta operação é precedida pela operação de desbaste a qual possui como objetivo remover a maior quantidade possível de material e pode influenciar de forma negativa na vida da ferramenta e na rugosidade do produto. Ao ser realizada, deve-se manter o mais uniforme possível a quantidade de sobremetal para ser retirado pela operação de semi-acabamento.

O tempo de usinagem está diretamente relacionado com os parâmetros de usinagem que influenciam na rugosidade e vida da ferramenta, e muitas vezes na usinagem de moldes e matrizes, a vida útil da ferramenta pode chegar ao fim durante o percurso de fresamento. Os parâmetros de corte (velocidade de corte, avanço e profundidade de usinagem) foram selecionados mediante recomendação do fabricante dos insertos e ensaios preliminares. Conforme se aplica em várias indústrias de construção de moldes de fundição com material VH13ISO endurecido, realizou-se o fresamento de semi-acabamento com os avanços por aresta de 0,05; 0,10 e 0,20; profundidade de usinagem de 0,25mm e com velocidades de corte de 150; 300; 450 e 600 m/mim. Cada ensaio foi repetido por 3 vezes sob as mesmas condições de corte para maior confiabilidade dos resultados. Os experimentos foram planejados para retirar 25 mm do corpo de prova ou desgaste na ferramenta de $VB_{B_{max}} = 0,6\text{mm}$, sendo mandatório o que ocorresse primeiro. A análise dos desgastes nas arestas das ferramentas de corte foi em função do volume removido.

5.1 Desgaste de flanco das ferramentas de metal duro (MD) e de PCBN com $f_z = 0,05\text{mm}$

A Figura 39 apresenta o comportamento do desgaste de flanco em função do volume removido com f_z de 0,05mm nas velocidades de corte de 150m/min; 300m/min; 450m/min e 600m/min, utilizando ferramentas de Metal Duro e velocidade de corte de 600m/min, também com ferramenta de PCBN.

Figura 39 - Desgaste de flanco das ferramentas de metal duro (MD) e de PCBN com $f_z = 0,05\text{mm}$ em função do volume removido.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Observa-se que com $f_z = 0,05\text{mm}$ os resultados de desgaste foram variados, demonstrando uma grande relação entre a velocidade de corte e o desgaste da aresta de corte. Nos ensaios com velocidade de corte de 150m/min , o fresamento removeu 50.800mm^3 do material, completando a retirada prevista de material no corpo de prova. O inserto demonstrou uma boa estabilidade no corte do material, e até os 40000mm^3 não se detectou nenhum desgaste na aresta de corte. Após os 40000mm^3 , o inserto começou a apresentar um pequeno desgaste na aresta de corte, no entanto, não se detectou nenhuma alteração durante fresamento que impossibilitasse o corte. O desgaste de flanco (VB_B) da ferramenta de corte detectado nas medições realizadas foi de aproximadamente $0,03\text{mm}$.

Com velocidade de corte de 300m/min , o fresamento removeu os 50.800mm^3 previstos como quantidade de material a ser retirado no corpo de prova. A ferramenta teve uma boa estabilidade no corte e não sofreu nenhum desgaste de flanco na aresta de corte perceptível com o instrumento de medição que foi utilizado.

Nos ensaios com velocidade de corte de 450m/min , o fresamento completou a retirada prevista de material no corpo de prova. O inserto demonstrou uma boa estabilidade no corte do material, e até os 30000mm^3 não se detectou nenhum

desgaste na aresta de corte. Após os 30000mm³, o inserto começou a apresentar um pequeno desgaste na aresta de corte, no entanto, as alterações durante o fresamento não impossibilitaram o corte. O desgaste de flanco máximo ($VB_{Bm\acute{a}x}$) da ferramenta de corte teve uma tendência linear de fim de vida útil na aresta de corte, a qual começou a surgir após a retirada de 60% do material estabelecido. O inserto finalizou a retirada de material e apresentou um desgaste de aproximadamente 0,13mm, ou seja, 22% do estabelecido como fim da vida útil do inserto na aresta de corte. Pode-se ver também na Figura 39, com $f_z = 0,05\text{mm}$ e velocidade de corte de 600m/min, que o inserto atingiu o desgaste de flanco (VB_B) de 0,47mm durante o fresamento do corpo de prova, apresentando uma grande tendência a aumentar. Devido à sequência de passes de fresamento nos quais o inserto era retirado e medido o desgaste, optou-se por paralisar o ensaio, para preservar o conjunto máquina ferramenta, devido à proximidade do desgaste de flanco máximo ($VB_{Bm\acute{a}x}$) de 0,6mm previamente estabelecido.

As ferramentas de PCBN, as quais usinaram com $f_z = 0,05\text{mm}$ e velocidade de corte de 600m/min, apresentaram boa estabilidade no corte do material e completou a retirada dos 50800mm³ previstos para cada corpo de prova usinado, sem a detecção de nenhum desgaste de flanco com o equipamento utilizado na medição.

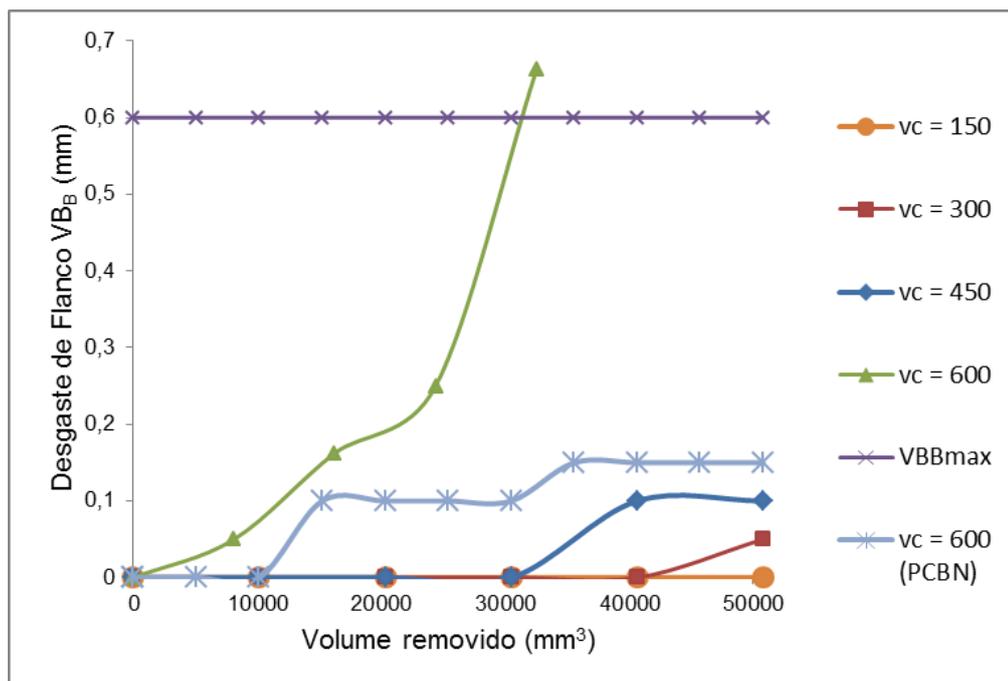
Conclui-se ainda que para fresamento com baixo avanço por aresta de corte como mostrado na Figura 39 do ensaio com $f_z = 0,05\text{mm}$, que nem sempre a menor velocidade de corte é a que resulta em uma vida mais longa da ferramenta de corte. Isto pode ser explicado quando se analisa o tempo de contato do inserto com o material a ser removido, por isso, a análise dos parâmetros para gerar o corte no tempo “ideal” pode ajudar na economia e no tempo durante o processo de usinagem. O ensaio também mostra, que na velocidade de corte de 600m/min e $f_z = 0,05\text{mm}$ o inserto de Metal Duro foi pouco eficiente na retirada do material. Assim, nos casos de fabricação de moldes e matrizes ou onde necessitar de uma retirada maior de material, a necessidade de troca do inserto durante o fresamento poderia ser inevitável, e isto poderia causar variação dimensional e/ou marcas na peça usinada. No entanto, quando analisado a Figura 39, quanto a usinagem de alta velocidade de corte com inserto de PCBN, percebe-se que a ferramenta retirou todo o material previsto com o menor tempo de corte e sem detecção de desgaste na aresta de corte. Assim, pode-se concluir que para o fresamento com $f_z = 0,05\text{mm}$, o melhor

resultado foi com as ferramentas de PCBN devido à não detecção de desgaste e ao menor tempo de usinagem, quando comparado aos resultados dos outros ensaios.

5.2 Desgaste de flanco das ferramentas de metal duro (MD) e de PCBN com $f_z=0,10\text{mm}$

A Figura 40 apresenta o comportamento do desgaste de flanco em função do volume removido com f_z de 0,10mm nas velocidades de corte de 150m/min; 300m/min; 450m/min e de 600m/min utilizando ferramentas de Metal Duro e de PCBN com velocidade de corte de 600m/min.

Figura 40 - Desgaste de flanco das ferramentas de metal duro (MD) e de PCBN com $f_z=0,10\text{mm}$ em função do volume removido.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Nota-se que com $f_z = 0,10\text{mm}$ e velocidade de corte de 150m/min, o fresamento teve um tempo efetivo de corte de 25,5 minutos para cada corpo de prova. O inserto completou a remoção dos 50.800mm^3 de material previsto e demonstrou boa instabilidade no corte. Nenhum desgaste de flanco da ferramenta de corte, não foi detectado nas medições realizadas com a lupa utilizada nas medições. O resultado reforça o teste realizado com o $f_z=0,05\text{mm}$ e velocidade de corte de 150m/min, demonstrando boa estabilidade de corte no material. Neste, o

contato da aresta de corte com o material, foi metade do tempo do ensaio com $f_z = 0,05\text{mm}$, o que concluiu-se que o tempo de contato associado à outros parâmetros influencia no desgaste da aresta de corte da ferramenta.

Na velocidade de corte de 300m/min , o fresamento teve o tempo efetivo bem menor quando comparado ao ensaio de velocidade de corte de 150m/min , e apresentou boa estabilidade de corte até a retirada de 40000mm^3 de material do corpo de prova, onde não havia sido detectado nenhum desgaste na aresta de corte da ferramenta nas medições com a lupa. Na retirada dos últimos 10000mm^3 do material (equivalente a 20% restante) a ferramenta apresentou um desgaste de flanco de aproximadamente $0,05\text{mm}$, mas não demonstrou nenhuma dificuldade no corte do material.

À velocidade de 450m/min , o inserto apresentou desgaste de flanco de $0,10\text{mm}$, após retirar 30000mm^3 do material previsto no corpo de prova. Após este volume removido estabilizou-se o desgaste completando o fresamento previsto sem aumento do desgaste na aresta de corte. Associando tempo e quantidade de desgaste, percebe-se que o inserto submetido ao avanço por aresta $f_z = 0,10\text{mm}$ e velocidade de corte de 450m/min apresentou um bom rendimento nos ensaios.

O avanço por aresta de $f_z = 0,10\text{mm}$ na velocidade de 600 m/min , o resultado do fresamento evidencia que o inserto atingiu o desgaste de flanco máximo (VB_{Bmax}) de $0,60\text{mm}$ entre 25000 e 30000mm^3 retirados do corpo de prova. O ensaio foi finalizado devido a atingir o desgaste de flanco máximo pré-estabelecido. O que levou a concluir que tais parâmetros não são recomendados para uma usinagem mais longa no aço Ferramenta endurecido, devido à baixa remoção de material.

Os ensaios com insertos de PCBN com avanço por aresta de $f_z = 0,10\text{mm}$ e velocidade de corte de 600m/min , demonstram boa estabilidade de corte, apesar do desgaste de $0,10\text{mm}$ detectado nos primeiros 15000mm^3 do material fresado, e do aumento deste desgaste para $0,15\text{mm}$ após os 35000mm^3 . O desgaste do PCBN foi característico de ruptura na aresta de corte. Após a usinagem do primeiro corpo de prova, decidiu-se prosseguir com a usinagem e fresou-se mais 4 corpos de provas com o mesmo inserto, para forçar um outro possível mecanismo de desgaste na aresta de corte da ferramenta. O inserto totalizou a retirada de 250000mm^3 do material e nos corpos de provas adicionais, não se detectou nenhum desgaste a mais que o já evidenciado no primeiro corpo de prova com base no instrumento utilizado na

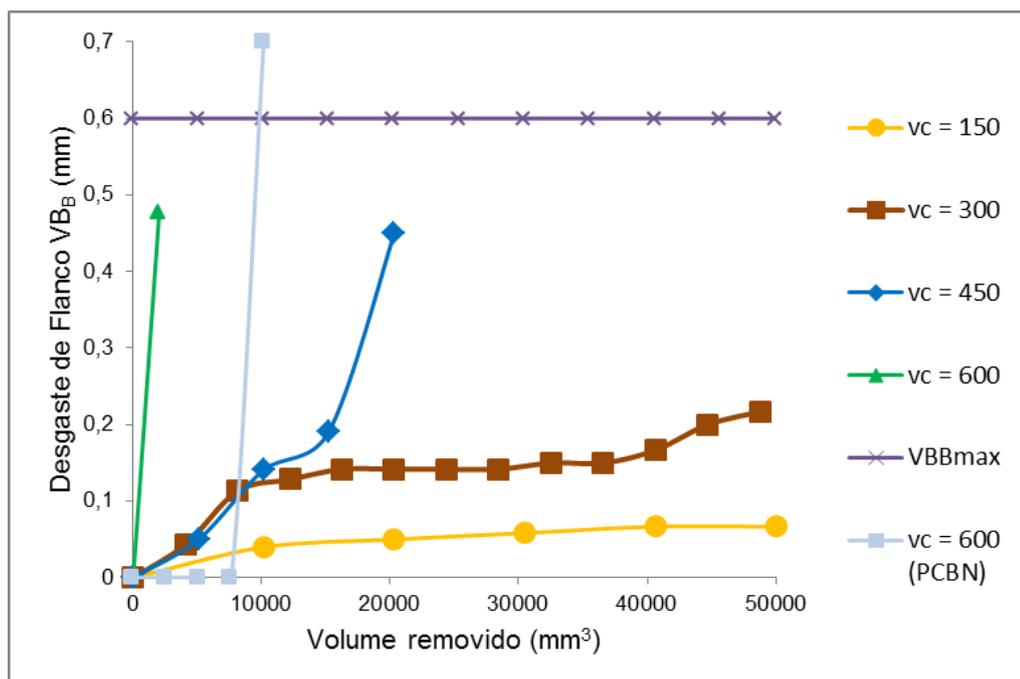
medição. A replica do ensaio teve praticamente o mesmo comportamento no inserto, no qual após o fresamento de 25000mm^3 do material na primeira amostra, o inserto apresentou um ruptura da aresta de corte de $0,15\text{mm}$. No entanto para melhor análise dos possíveis mecanismos de desgaste, estendeu-se o ensaio e além do primeiro corpo de prova usinado, fresou-se mais 6 corpos de provas o que totalizou a retirada de 350000mm^3 do material. O ensaio foi finalizado sem nenhuma detecção adicional de desgaste no inserto.

Conclui-se que a ferramenta de PCBN, com $f_z = 0,10\text{mm}$ e $v_c = 600\text{m/min}$, apresentou bom desempenho na remoção de material, e seu uso pode ser satisfatório na retirada de grande quantidades sem a troca do inserto.

5.3 Desgaste de flanco das ferramentas de metal duro (MD) e de PCBN com $f_z = 0,20\text{mm}$

Os valores de desgaste de flanco das ferramentas de metal duro e PCBN na condição de $f_z = 0,20\text{mm}$ em função do volume removido, para as diversas velocidades de corte podem ser observadas na Figura 41.

Figura 41 - Desgaste de flanco das ferramentas de metal duro (MD) e de PCBN com $f_z = 0,20\text{mm}$ em função do volume removido.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Com as velocidades de corte de 150m/min; e 300m/min; o inserto completou a retirada de material prevista no corpo de prova sem atingir o desgaste de flanco máximo ($VB_{Bm\acute{a}x}$) pré-estabelecido. Já para as velocidades de 450m/min, e 600m/min, o desgaste de flanco foi o fator limitante para finalizar o ensaio.

O ensaio com a velocidade de corte de 150m/min, o desgaste de flanco (VB_B) da ferramenta foi de 0,06mm, e a ferramenta apresentou boa estabilidade durante o fresamento. O tempo efetivo de corte de 12,7 minutos para cada corpo de prova e removeu 50.800mm^3 do material.

Com velocidade de corte de 300m/min, o fresamento completou a retirada de material, porém apresentou um desgaste de flanco de 0,20mm, e uma tendência a continuar se desgastando com maior rapidez no corte.

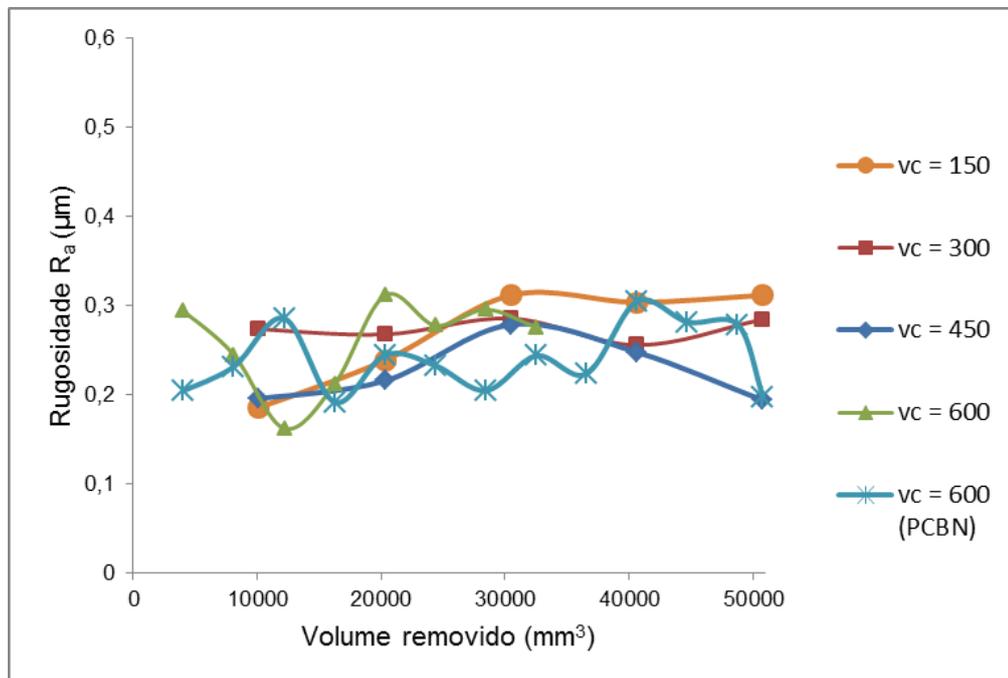
Com a condição de velocidade de corte de 450m/min, o desgaste apresentou uma alteração de 0,3mm, a partir da retirada de 30% do material previsto no corpo de prova, atingindo o valor de 0,45mm. Foi paralisado os ensaios para não afetar a integridade do porta inserto e ultrapassar o desgaste de flanco máximo.

Com a velocidade de 600 m/min, o fresamento atingiu o desgaste de flanco de 0,45mm após remover 2.032mm^3 do corpo de prova. O fresamento durou um tempo efetivo de 0,16min.

5.4 Rugosidades R_a e R_t com ferramentas de metal duro (MD) e de PCBN com $f_z= 0,05\text{mm}$

A necessidade de acabamento superficial aumenta na medida em que se exige uma precisão de ajuste entre as peças a serem acopladas, pois somente a tolerância dimensional, de forma e de posição não é suficiente para garantir a melhor funcionalidade do conjunto mecânico montado. O acabamento superficial é fundamental onde houver desgaste, atrito, corrosão, aparência, resistência à fadiga, escoamento de fluidos, etc. As superfícies após a usinagem apresentam irregularidades quando observadas em detalhes. A rugosidade é função do tipo de acabamento da máquina-ferramenta ou do processo de fabricação utilizado. As Figuras 42 e 43 ilustram os valores da rugosidade média (R_a) e rugosidade total (R_t) em relação ao volume removido com avanço por aresta de corte de 0,05mm e velocidades de corte de 150m/min, 300m/min, 450m/min e 600m/min com ferramentas de metal duro (MD) e de PCBN com velocidade de corte de 600m/min.

Figura 42 - Rugosidade R_a com ferramentas de metal duro e de PCBN, com $f_z=0,05\text{mm}$ em função do volume removido.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Com o avanço por aresta de corte (f_z) de $0,05\text{mm}$ o “acabamento da superfície” usinada, apresentou variações no valor da rugosidade (R_a) na qual a maior variação foi proveniente do fresamento com $v_c=600\text{m/min}$, já o menor valor obtido ao final do ensaio, foi com a velocidade de corte de 450m/min .

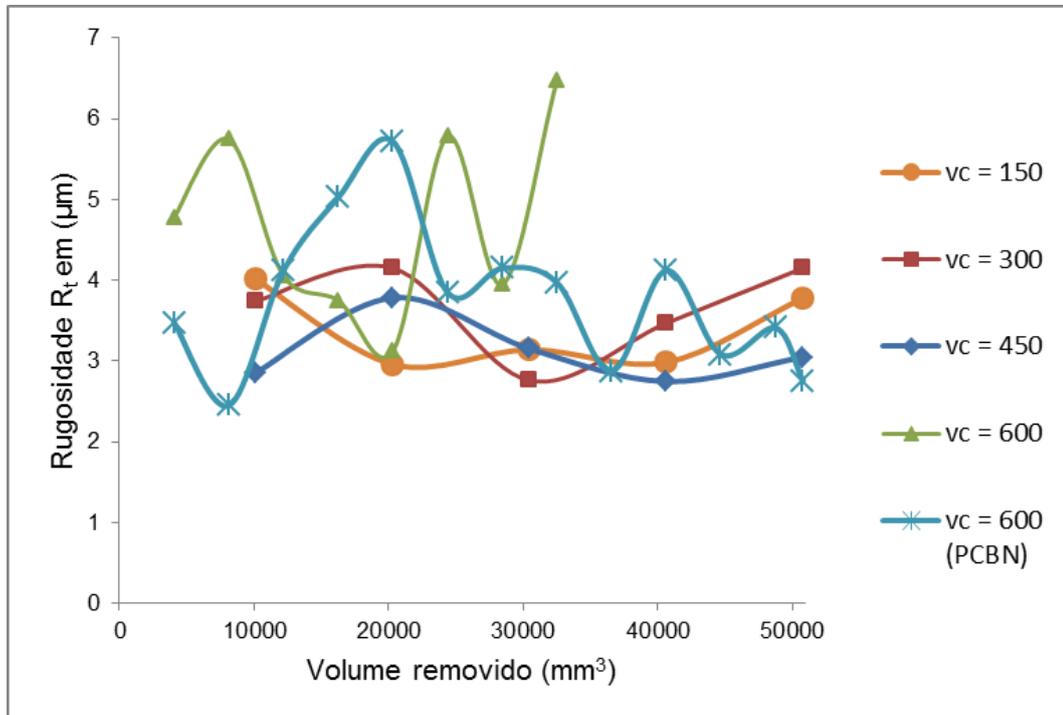
A velocidade de corte de 300m/min apresentou um valor final de $0,27\mu\text{m}$, o entanto ela se manteve com valores muito próximos nas demais medições, apresentando pequenas oscilações.

Com a velocidade de corte de 150m/min , a rugosidade apresentou valor de $0,30\mu\text{m}$ na última medição. Demonstrou, assim como na velocidade de corte de 300m/min , valores muito próximos e uma estabilidade na rugosidade, a partir de 30000 mm^3 de volume de material removido.

Com a utilização de velocidade de corte de 600m/min , a medição da rugosidade demonstrou uma maior dispersão e maior valor de pico, no entanto este valor ficou próximo aos valores das velocidades de 150m/min , 300m/min , 450m/min , e 600m/min , com PCBN. Com a utilização de velocidade de corte de 600m/min , e ferramenta de PCBN, a rugosidade se comportou semelhante à velocidade de corte 600m/min , com metal duro (MD). No entanto o seu valor final,

ficou muito próximo do menor valor obtido com a velocidade de 450m/min.

Figura 43 - Rugosidade R_t com ferramentas de metal duro e de PCBN, com $f_z=0,05\text{mm}$ em função do volume removido.



Fonte: Elaborado pelo autor.

A velocidade de corte de 300m/min, demonstrou variação e maior valor final de rugosidade (R_t) ao término da remoção dos 50.800mm³ de volume do material, quando comparados às velocidades de corte de 150m/min, 450m/min, e 600m/min com PCBN. O valor final atingido foi de 4,05μm.

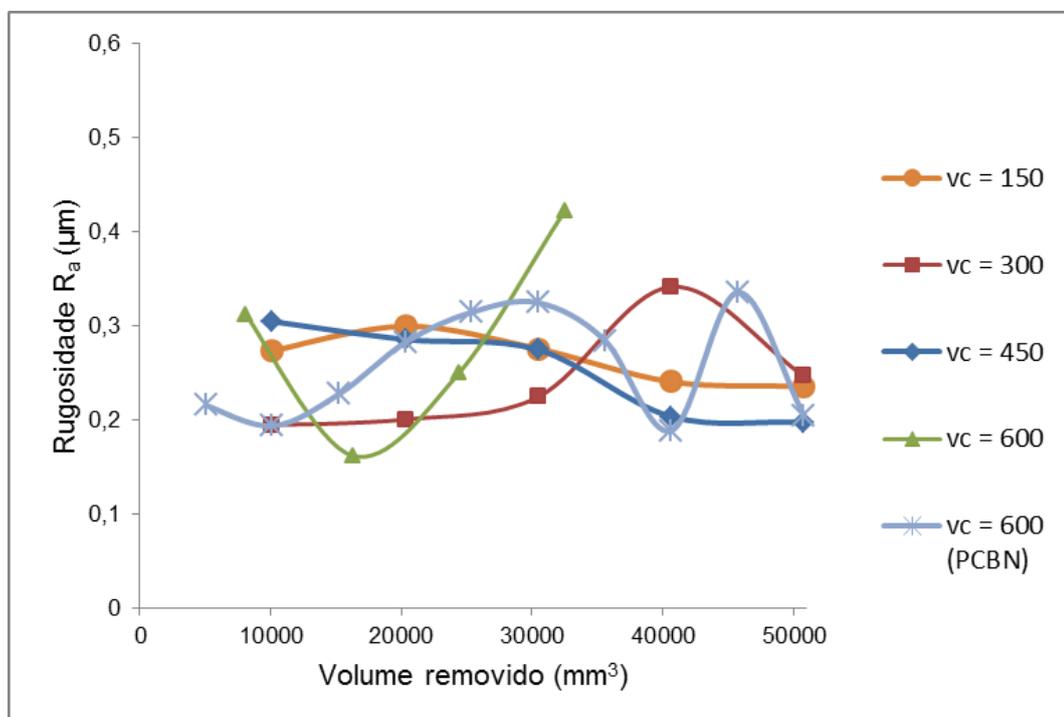
Com a velocidade de corte de 150m/min, a rugosidade (R_t) apresentou valor de 0,36μm na última medição. Demonstrou comportamento semelhante à rugosidade (R_t) encontrada com as demais velocidades.

O comportamento da rugosidade (R_t) com a velocidade de corte de 450m/min, seguiu a mesma linha da rugosidade (R_a) e quando comparada a rugosidade (R_t) encontrada com o fresamento nas outras velocidades, demonstra o menor valor e menos dispersão nos valores. Com a utilização de velocidade de corte de 600m/min, a rugosidade demonstrou maiores valores e maiores variações, apresentou o valor final de 6,45μm. No entanto, as medições realizadas foram menos que as das outras velocidades em função do desgaste que a ferramenta alcançou.

5.5 Rugosidades R_a e R_t com ferramentas de metal duro (MD) e de PCBN com $f_z= 0,10\text{mm}$

Na Figura 44 observa-se o comportamento da rugosidade em relação ao volume removido com avanço por aresta de corte de 0,10mm e velocidades de corte de $v_c=150\text{m/min}$, $v_c= 300\text{m/min}$, $v_c= 450\text{m/min}$, e $v_c= 600\text{m/min}$, com o uso de ferramentas de metal duro (MD) e $v_c= 600\text{m/min}$ com o uso de ferramentas de PCBN.

Figura 44 - Rugosidades R_a com ferramentas de metal duro e de PCBN, com $f_z= 0,10\text{mm}$ em função do volume removido.



Fonte: Elaborado pelo autor.

O avanço de corte (f_z) de 0,10mm, proporcionou uma rugosidade média (R_a) mais estável na velocidade de corte de 150m/min quando comparado as demais velocidades. O valor final de rugosidade encontrado no final do ensaio de 0,21 μm .

Com a velocidade de corte de 300m/min o comportamento da rugosidade apresentou o maior valor de rugosidade (R_a) quando comparado aos ensaios cujos fresamento finalizou a retirada de material, usinando com o mesmo valor de f_z . O valor final de rugosidade (R_a) com $v_c = 300\text{m/min}$, possibilitou uma rugosidade final de 0,26 μm .

Com o valor de velocidade de corte de 450m/min, foi encontrado o menor valor de rugosidade (R_a) onde foi encontrado o valor de $0,20\mu\text{m}$ na última medição. Observa-se ainda que mesmo com o aumento do desgaste da aresta de corte, a rugosidade foi apresentando valores menores.

Com a utilização de velocidade de corte de 600m/min, a rugosidade apresentou o maior valor de R_a . No entanto a última medição aconteceu ao final de retirada de 32512mm^3 do material devido à proximidade do valor de desgaste de flanco máximo ($VB_{B\text{máx}}$) no inserto.

Com a utilização de velocidade de corte de 600m/min e ferramenta de PCBN, a rugosidade sofreu algumas variações no entanto ao final da retirada da quantidade prevista do material do corpo de prova, a rugosidade (R_a) apresentou um valor de $0,19\mu\text{m}$, semelhante à rugosidade encontrada com a velocidade de 450m/min.

A rugosidade (R_t) obtida com o avanço por aresta de corte (f_z) de $0,10\text{mm}$ nas diversas velocidades de corte em função do volume de material removido é ilustrada na Figura 45, onde a velocidade de corte de 600m/min, demonstrou o menor valor encontrado quando observado juntamente com os resultados dos outros ensaios com o mesmo f_z , cujo valor da rugosidade (R_t) registrado foi de $3,45\mu\text{m}$.

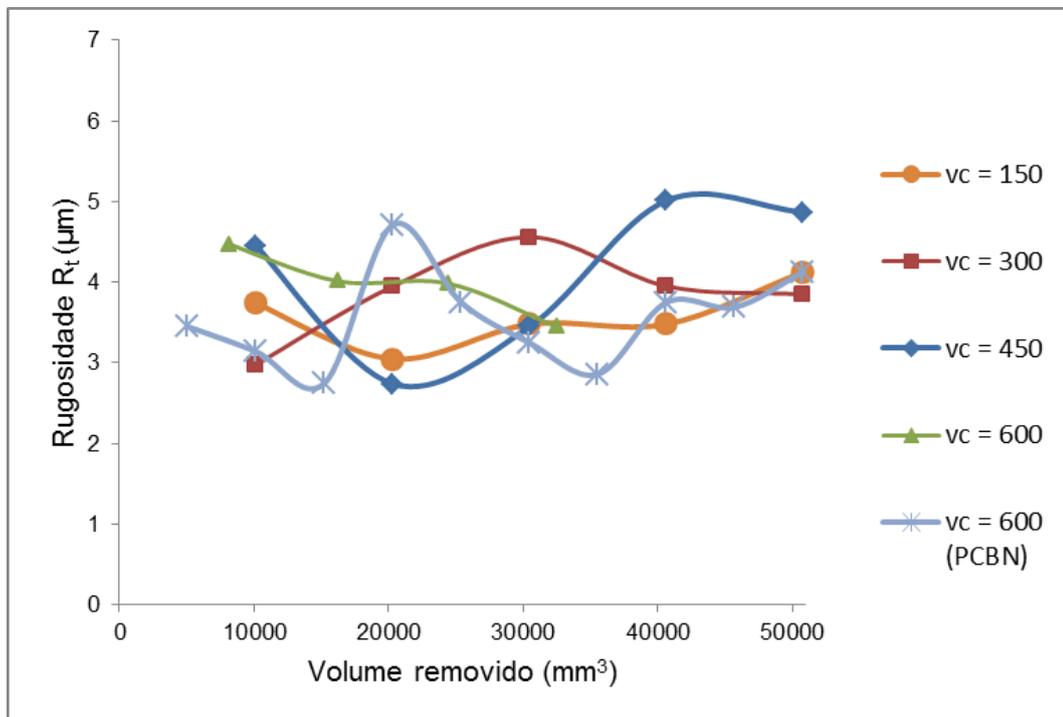
Com o valor de velocidade de corte de 150m/min, a rugosidade (R_t) apresentou valor de $0,40\mu\text{m}$ na última medição, demonstrando uma tendência a aumentar com a continuidade de retirada de material.

O comportamento da rugosidade (R_t) com a velocidade de corte de 450m/min, apresentou a pior situação de variação da rugosidade (R_t) e o maior valor quando comparado às outras velocidades. O valor final foi de $5,01\mu\text{m}$.

A velocidade de corte de 300m/min, apresentou o menor valor de R_t , quando comparado aos resultados que concluíram a retirada de material. O valor final foi de $3,85\mu\text{m}$.

Com a utilização de velocidade de corte de 600m/min, com PCBN o resultado da rugosidade também apresentou grande variação e resultado final semelhante ao encontrado com a velocidade de 150m/min.

Figura 45 - Rugosidades R_t com ferramentas de metal duro e de PCBN, com $f_z=0,10\text{mm}$ em função do volume removido.

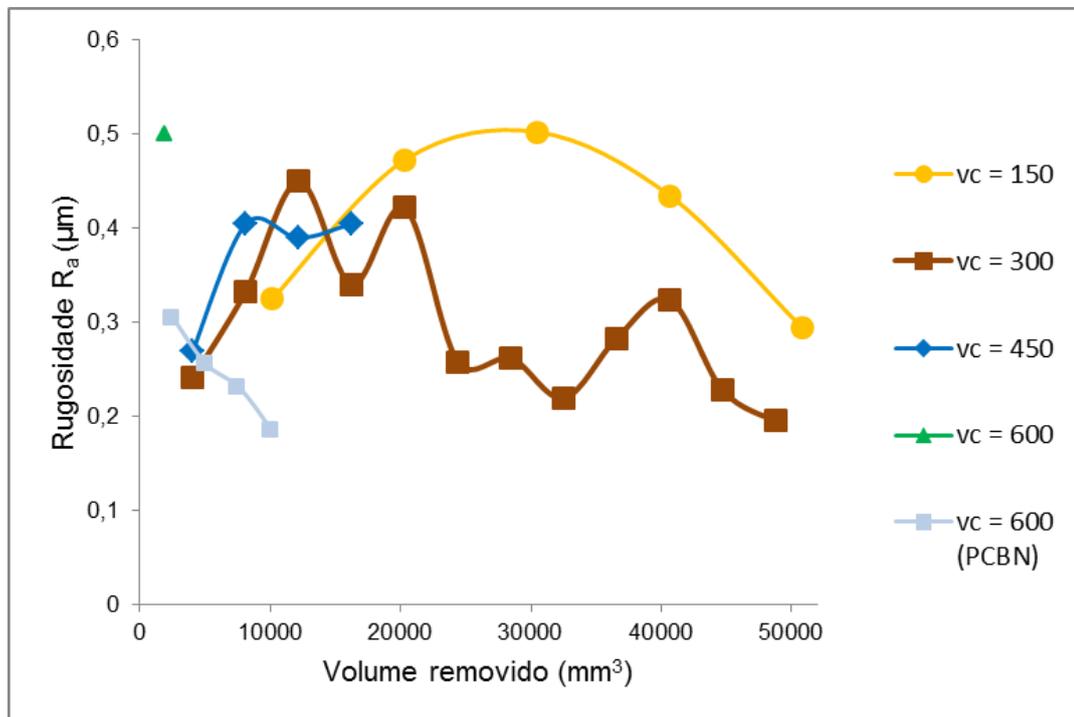


Fonte: Elaborado pelo autor.

5.6 Rugosidades R_a e R_t com ferramentas de metal duro (MD) e de PCBN com $f_z=0,20\text{mm}$

Na Figura 46 observa-se o comportamento das rugosidades em relação ao volume removido com avanço por aresta de corte de $0,2\text{mm}$ e velocidades de corte de $v_c=150\text{m/min}$, $v_c=300\text{m/min}$, $v_c=450\text{m/min}$, e $v_c=6000\text{m/min}$, com o uso de ferramentas de metal duro (MD) e $v_c=600\text{m/min}$ com o uso de ferramentas de PCBN.

Figura 46 - Rugosidade (R_a) em relação ao volume removido com $f_z= 0,20\text{mm}$ ferramentas de metal duro (MD) e de PCBN.



Fonte: Elaborado pelo autor.

A Figura 46 evidencia que, com o avanço de corte (f_z) de $0,2\text{mm}$ o “acabamento da superfície” usinada, apresentou uma variação no valor da rugosidade (R_a) na qual o menor valor encontrado foi com a velocidade de corte de $300\text{m}/\text{min}$, analisando os ensaios que finalizaram a retirada de material. O valor da rugosidade (R_a) variou um pouco nas medições e o valor encontrado no final do ensaio, após a retirada do volume de material no corpo de prova foi de $0,20\mu\text{m}$.

Com o valor de $150\text{m}/\text{min}$ para velocidade de corte, a rugosidade apresentou valor de $0,32\mu\text{m}$ na primeira medição. Demonstrou-se a tendência e valores mais altos até o volume retirado de 30000mm^3 , e depois foi diminuindo o valor sendo encontrado no final do ensaio uma rugosidade (R_a)= $0,28\mu\text{m}$.

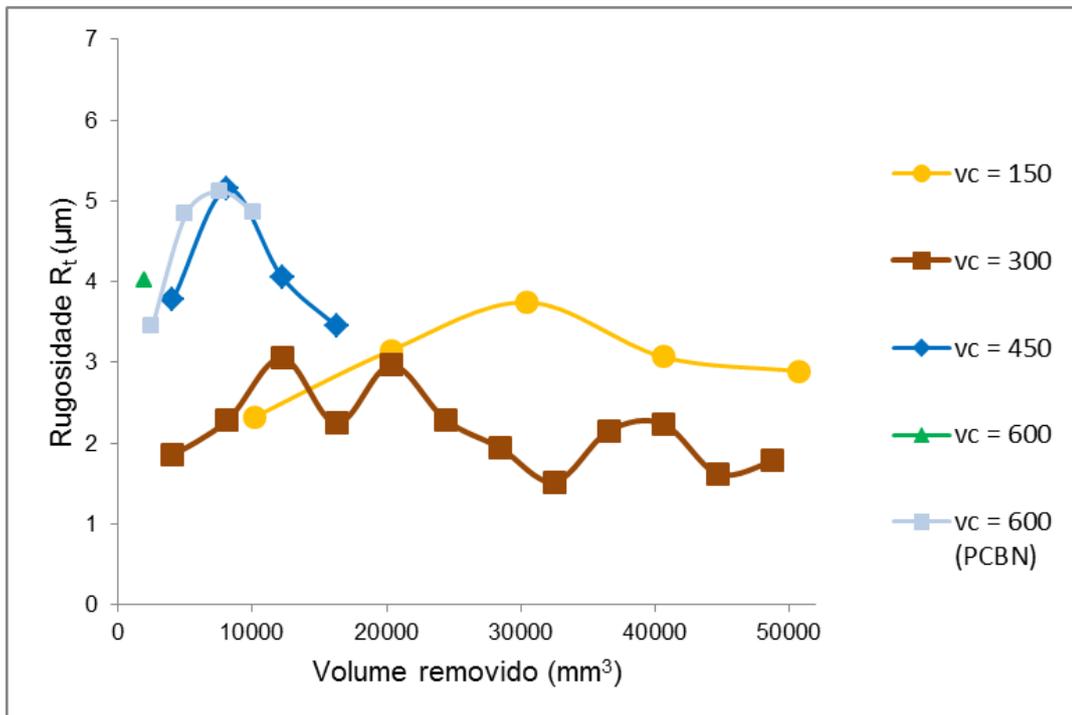
Com a velocidade de corte de $450\text{m}/\text{min}$, a rugosidade (R_a) após a primeira sequência de passes de usinagem no corpo de prova foi de $0,26\mu\text{m}$, no entanto, na segunda medição que ocorreu após a retirada de 8000mm^3 , a rugosidade atingiu o valor de $0,41\mu\text{m}$ e demonstrou a tendência a se estabilizar neste valor nas demais medições. O ensaio foi interrompido após a retirada de 16000mm^3 devido ao valor do desgaste de Flanco da ferramenta.

Com a utilização de velocidade de corte de $600\text{m}/\text{min}$, foi possível a medição

da rugosidade somente uma vez após a retirada de 2000mm^3 , devido ao valor do desgaste de Flanco atingido pela ferramenta. E com $v_c = 600\text{m/min}$ e PCBN, foram feitas poucas medições devido ao desgaste. O resultado encontrado demonstrou valor inicial de $0,305\mu\text{m}$ e valor final de $0,185\mu\text{m}$ para a rugosidade (R_a).

Na Figura 47 observa-se o comportamento da rugosidade (R_t) em relação ao volume removido com avanço por aresta de corte de $0,2\text{mm}$.

Figura 47 - Rugosidade (R_t) em relação ao volume removido com $f_z = 0,20\text{mm}$



Fonte: Elaborado pelo autor.

Assim como na rugosidade (R_a) a velocidade de corte de 300m/min , demonstrou valores menores de rugosidade (R_t) quando comparados às velocidades de corte de 150m/min , 450m/min , e 600m/min . Os valores da rugosidade (R_t) com a velocidade de corte de 300m/min , variaram entre $1,81\mu\text{m}$ e $3,22\mu\text{m}$, e no final do ensaio o valor encontrado foi $2,50\mu\text{m}$.

Com o valor de 150m/min para velocidade de corte, a rugosidade (R_t) apresentou valor de $0,23\mu\text{m}$ na primeira medição. Demonstrou comportamento semelhante à rugosidade (R_a) e um valor de rugosidade (R_t) = $2,82\mu\text{m}$ ao final da retirada de material previsto no fresamento.

O comportamento da rugosidade (R_t) com a velocidade de corte de 450m/min , após a primeira sequência de passes de usinagem no corpo de prova

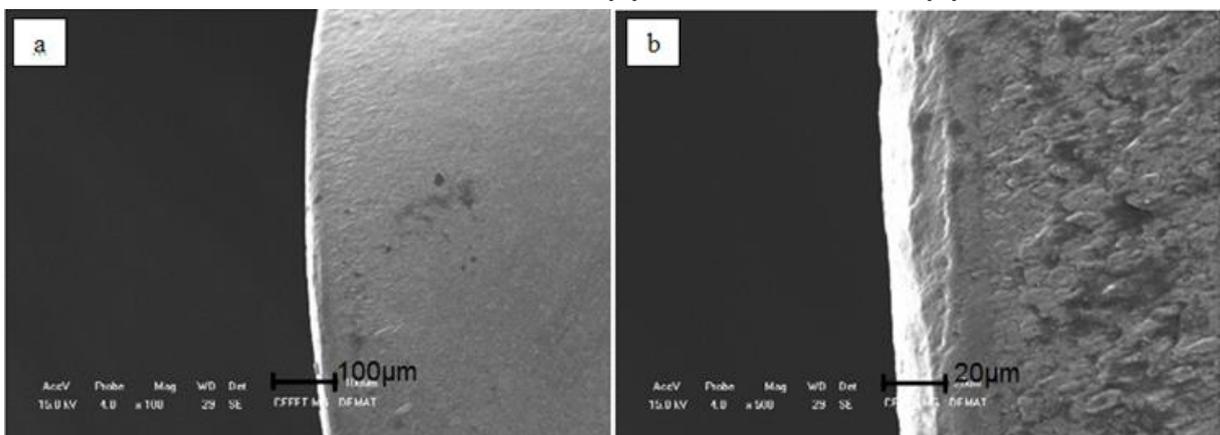
demonstrou um valor de $2,21\mu\text{m}$. Após a retirada de 10000mm^3 , a rugosidade atingiu o valor de $3,82\mu\text{m}$ e demonstrou a tendência a se estabilizar neste valor nas demais medições. Com a retirada de 15000mm^3 de material, o valor da rugosidade total (R_t) foi de $3,69\mu\text{m}$. O ensaio foi interrompido após a retirada de 20000mm^3 e apresentou um valor para a rugosidade (R_t) de $3,95\mu\text{m}$.

Com a utilização de velocidade de corte de $600\text{m}/\text{min}$, foi possível a medição da rugosidade (R_t) somente uma vez após a retirada de 2000mm^3 , devido ao valor do desgaste de Flanco atingido pela ferramenta. O valor encontrado foi de $4,05\mu\text{m}$. A rugosidade (R_t) com PCBN não aparece na Figura devido ao valor obtido ser maior que o valor da escala utilizada.

5.7 Análise dos mecanismos de desgaste

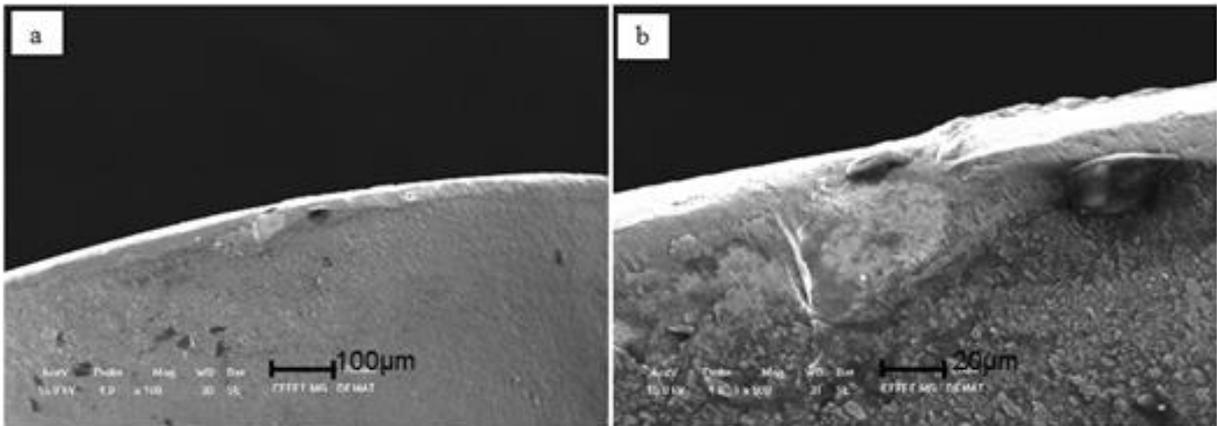
As Figuras 48 a 51 apresentam os aspectos dos desgastes nos insertos com $f_z= 0,05\text{mm}$ nas velocidades de corte de $150\text{m}/\text{min}$, $300\text{m}/\text{min}$, $450\text{m}/\text{min}$ e $600\text{m}/\text{min}$, com ampliação de 100 e 500 vezes. As micrografias foram realizadas somente nos insertos que apresentaram o maior desgaste dentre as seis ferramentas utilizadas em cada condição, ou seja, os experimentos foram realizados em triplicata.

Figura 48 - Aspecto do desgaste no inserto com $f_z= 0,05\text{mm}$ e $v_c=150\text{m}/\text{min}$, com aumento de 100x (a) aumento de 500x (b).



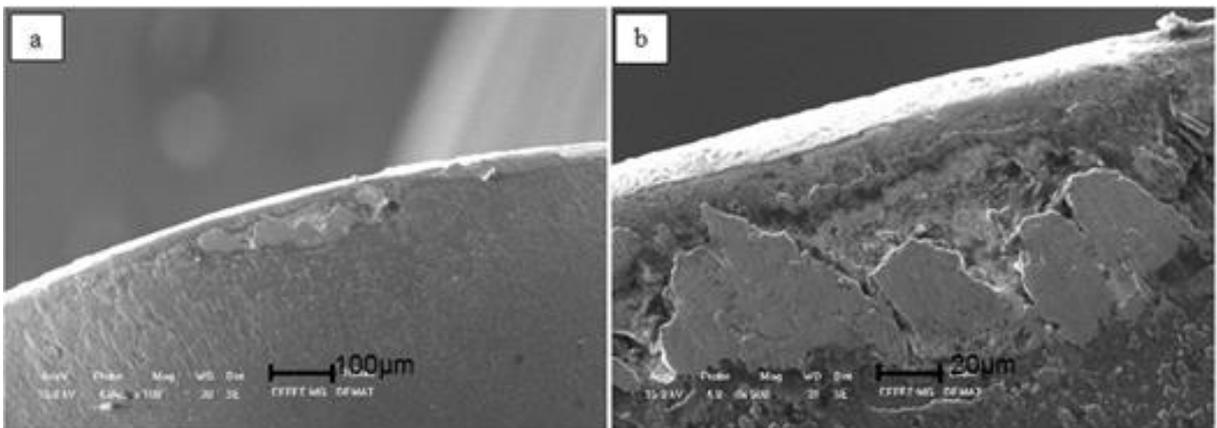
Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 49 - Aspecto do desgaste no inserto com $f_z= 0,05\text{mm}$ e $v_c= 300\text{m/min}$, com aumento de 100x (a) e com aumento de 500x (b).



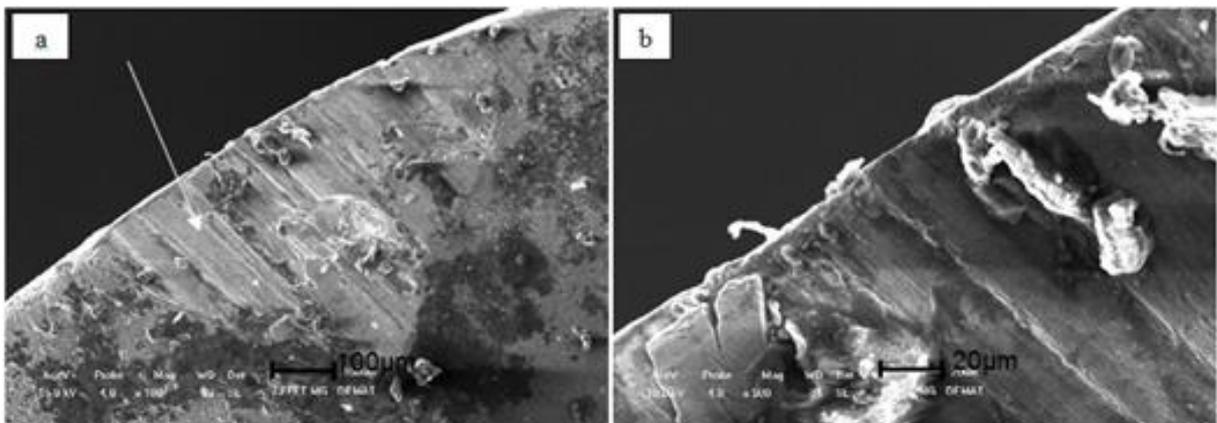
Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 50 - Aspecto do desgaste no inserto com $f_z= 0,05\text{mm}$ e $v_c= 450\text{m/min}$, com aumento de 100x (a) e com aumento de 500x (b).



Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 51 - Aspecto do desgaste no inserto com $f_z= 0,05\text{mm}$ e $v_c= 600\text{m/min}$, com aumento de 100x (a) e com aumento de 500x (b).

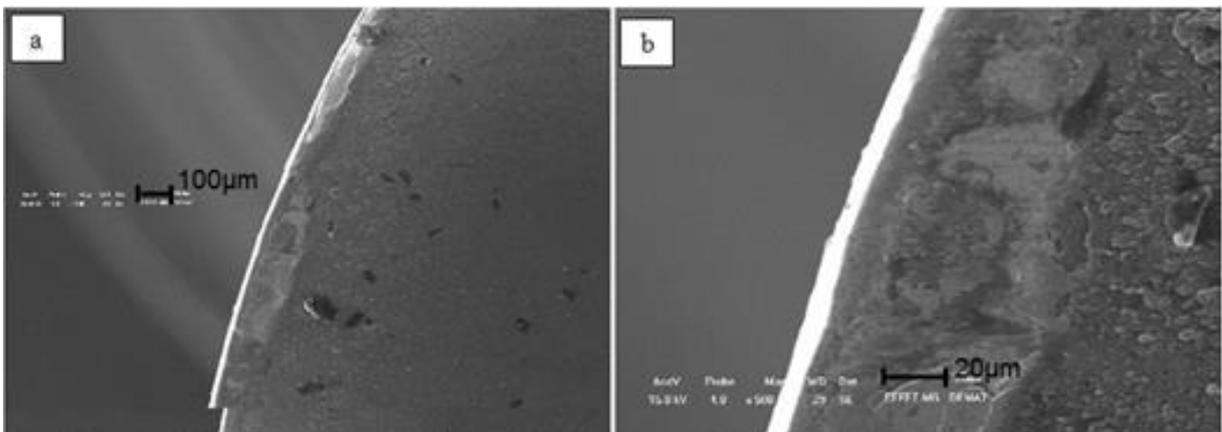


Fonte: Elaborado pelo autor.

Os aspectos dos desgastes nos insertos que foram submetidos ao avanço por aresta de 0,05mm, analisados no MEV através das imagens mostrada anteriormente apresentaram mecanismos variados de desgaste, no entanto, percebe-se o mecanismo de abrasão como predominante no desgaste de flanco dos insertos.

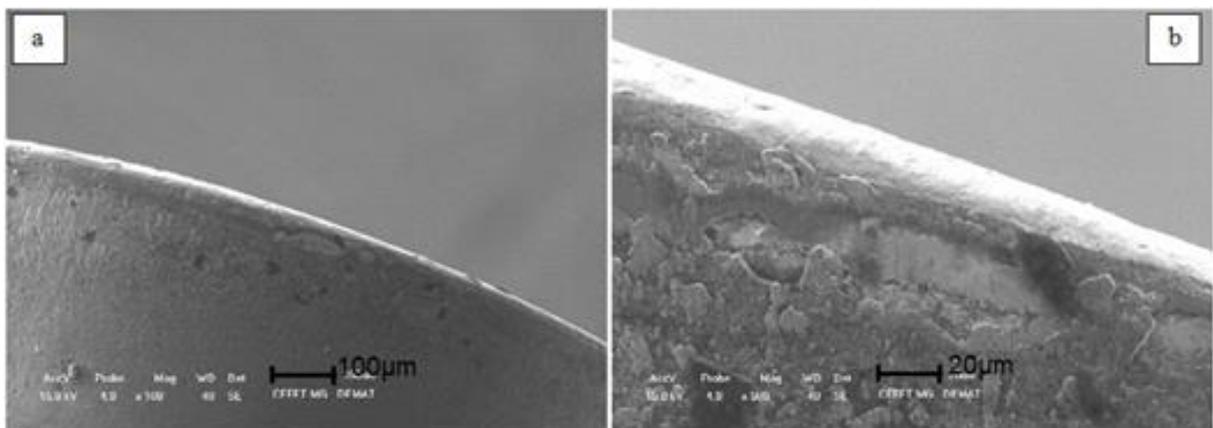
As Figuras 52 à 55 apresentam os aspectos dos desgastes nos insertos com $f_z = 0,10\text{mm}$ nas velocidades de corte de 150m/min, 300m/min, 450m/min e 600m/min, com ampliação de 100 e 500 vezes.

Figura 52 - Aspecto do desgaste no inserto com $f_z= 0,10\text{mm}$ e $v_c= 150\text{m/min}$, com aumento de 100x (a) e aumento de 500x (b).



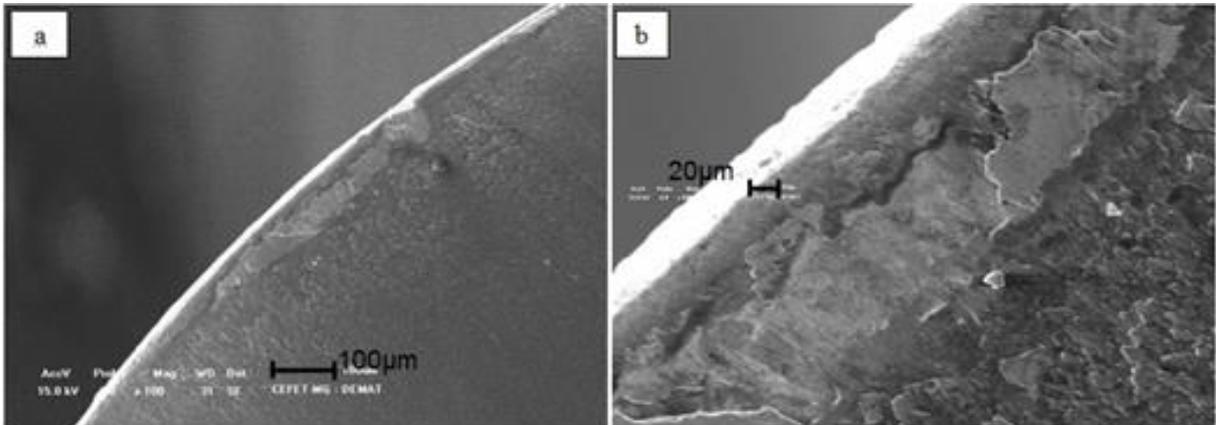
Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 53 - Aspecto do desgaste no inserto com $f_z= 0,10\text{mm}$ e $v_c= 300\text{m/min}$, com aumento de 100x (a) e com aumento de 500x.



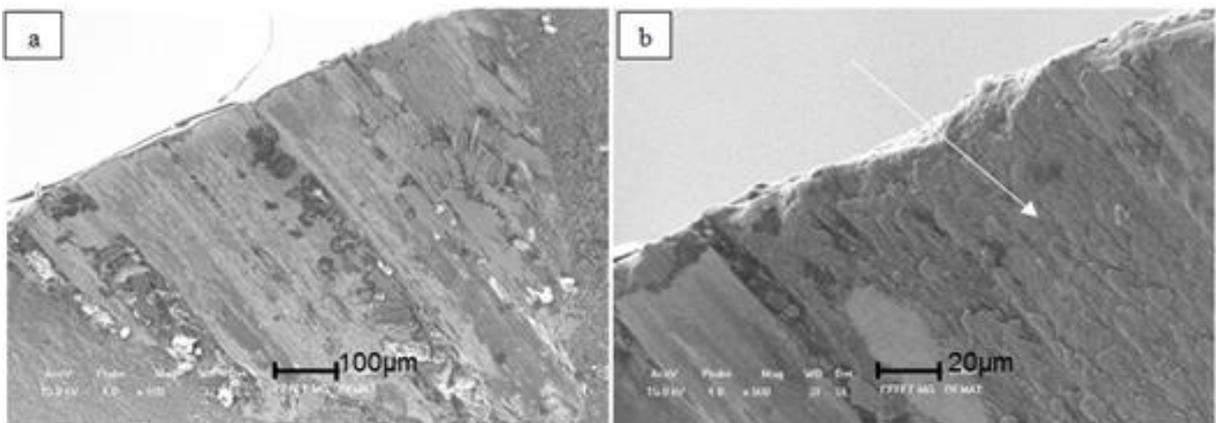
Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 54 - Aspecto do desgaste no inserto com $f_z= 0,10\text{mm}$ e $v_c= 450\text{m/min}$, com aumento de 100x (a) e com aumento de 500x (b).



Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 55 - Aspecto do desgaste no inserto com $f_z= 0,10\text{mm}$ e $v_c= 600\text{m/min}$, com aumento de 100x (a) e com aumento de 500x (b).

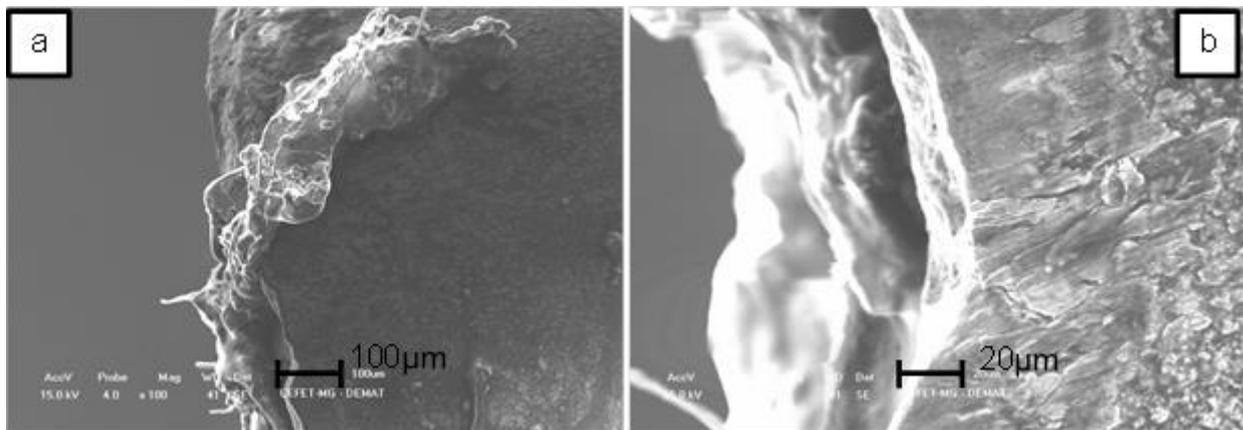


Fonte: Elaborado pelo autor.

Os aspectos dos desgastes nos insertos que foram submetidos ao avanço por aresta de 0,10mm, analisados no MEV através das Figuras 52 à 55, mostrada anteriormente apresentaram mecanismos variados de desgaste, no entanto, percebe-se o mecanismo de abrasão como predominante no desgaste de flanco dos insertos.

A Figura 56 apresentam os aspectos dos desgastes nos insertos de PCBN com $f_z = 0,10\text{mm}$ na velocidade de corte de 600m/min, com aumentos de 100 e 500 vezes. As micrografias foram realizadas somente nos insertos que apresentaram o maior desgaste dentre as seis ferramentas utilizadas em cada condição, ou seja, os experimentos foram realizados em triplicata.

Figura 56 - Aspecto do desgaste no inserto de PCBN com $f_z= 0,10\text{mm}$ e $v_c= 600\text{m/min}$, com aumento de 100x (a) e com aumento de 500x (b).

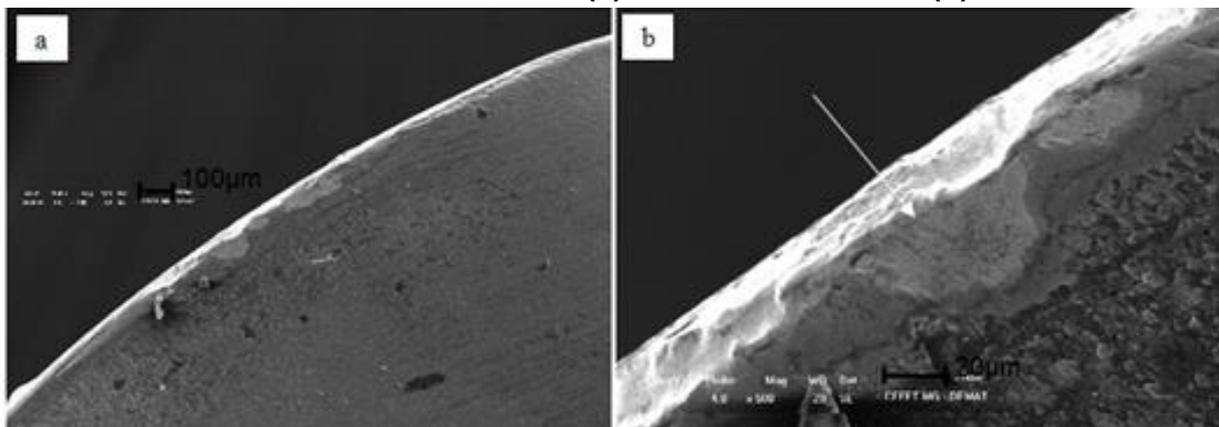


Fonte: Elaborado pelo autor.

Através da análise da Figura 56, do inserto de PCBN verifica-se que o inserto sofreu uma ruptura da aresta de corte no início do fresamento, no entanto, a análise da imagem contém características de que o mecanismo de desgaste predominante nas ferramentas, é considerado mais provável que tenha ocorrido os mecanismos por difusão, abrasão e *attrition* (aderência com arrastamento). Após a ruptura observada no instante da medição do desgaste, o inserto continuou o fresamento o qual foi repetido em 7 corpos de prova e não se detectou acréscimo do valor medido com a lupa.

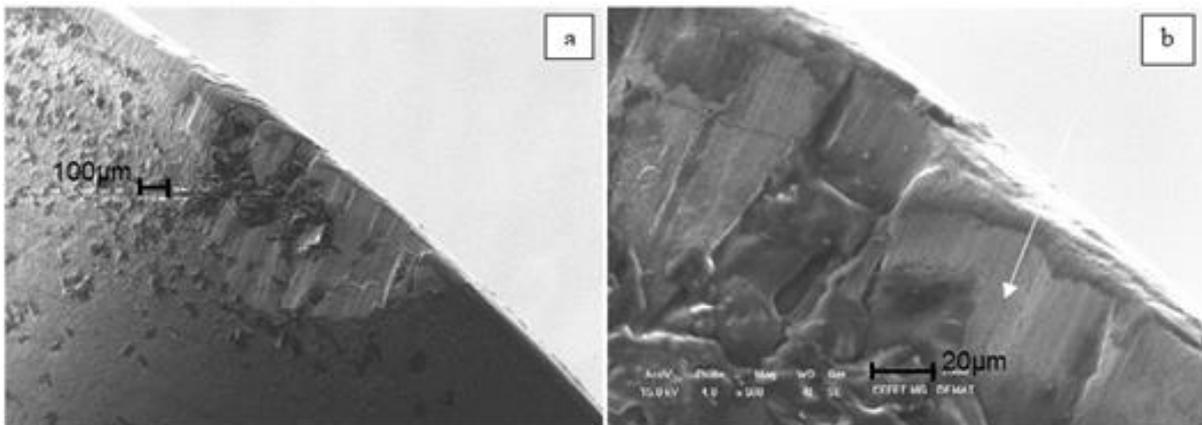
As Figuras 57 à 60 apresentam os aspectos dos desgastes nos insertos com $f_z= 0,20\text{mm}$ nas v_c de 150m/min, 300m/min, 450m/min e 600m/min, com ampliação 100 e 500 vezes.

Figura 57 - Aspecto do desgaste no inserto com $f_z= 0,20\text{mm}$ e $v_c= 150\text{m/min}$, com aumento de 100x (a) e aumento de 500x (b).



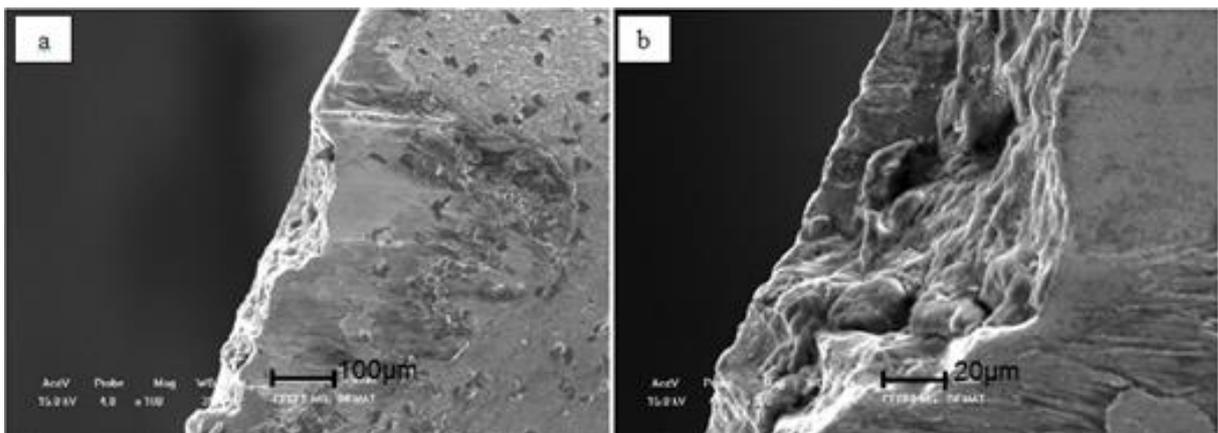
Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 58 - Aspecto do desgaste no inserto com $f_z= 0,20\text{mm}$ e $v_c= 300\text{m/min}$, com aumento de 100x (a) e com aumento de 500x (b).



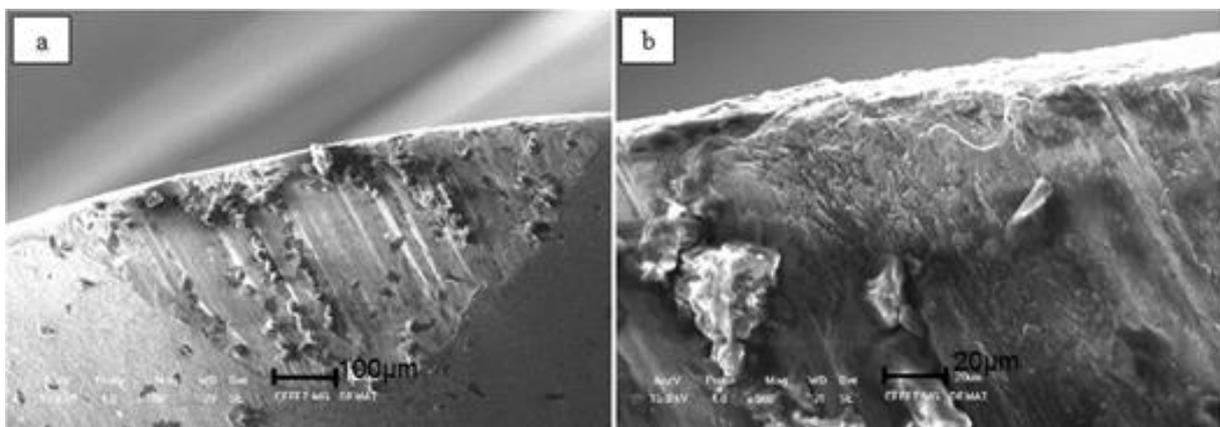
Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 59 - Aspecto do desgaste no inserto com $f_z= 0,20\text{mm}$ e $v_c= 450\text{m/min}$, com aumento de 100x (a) e com aumento de 500x (b).



Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 60 - Aspecto do desgaste no inserto com $f_z= 0,20\text{mm}$ e $v_c= 600\text{m/min}$, com aumento de 100x (a) e com aumento de 500x (b).



Fonte: Elaborado pelo autor.

Nas análises das imagens do MEV é possível perceber que os insertos apresentaram uma combinação de vários mecanismos que atuaram na aresta de corte, sendo difícil a definição de qual ocorreu primeiro. Alguns apresentaram aspectos de desgaste por fratura seguido do mecanismo de *attrition*. Também não houve indícios de falha catastrófica nas ferramentas de metal duro (MD) analisadas.

Conforme a bibliografia estudada, a abrasão é o mecanismo mais comum encontrado no desgaste de flanco das ferramentas e é um mecanismo que oferece certa estabilidade à peça permitindo previsibilidade em sua vida útil. Este mecanismo provém de partículas duras que se soltam da peça usinada e que ficam na interface ferramenta-peça ocasionando o desgaste da aresta de corte da ferramenta.

Os insertos de metal duro analisados através das imagens mostrada anteriormente apresentaram a abrasão como mecanismo predominante no desgaste de Flanco, onde foi possível perceber o clássico formato do desgaste por abrasão em que o ângulo de folga diminui assim a área de contato da ferramenta com a peça aumenta, o que faz aumentar o atrito e conseqüentemente o desgaste do inserto. É possível dizer que outro mecanismo atuante nestas amostras é o desgaste por ruptura causado choque mecânico entre a aresta de corte do inserto e o material removido, o qual pode ser na forma de material a ser fresado ou até em forma de cavaco. Em algumas situações, a ruptura acontece primeiro causando a quebra da aresta de corte do inserto e em decorrência do atrito entre o inserto sem a aresta de corte em perfeitas condições e o material fresado, o inserto continua a desgastar sob a forma de abrasão, No entanto, ao se analisar o desgaste após a usinagem, as vezes o inserto começa a atuar e a aresta danificada não apresenta evidências que possibilitam a constatação de início de desgaste com a ruptura.

Os insertos que foram submetidos aos menores parâmetros de f_z e v_c , apresentaram um desgaste menor em sua aresta de corte, sendo que o desgaste ocorrido no inserto que foi submetido ao avanço por aresta de 0,05mm e $v_c=150\text{m/min}$, foi de valores entorno de 0,05mm.

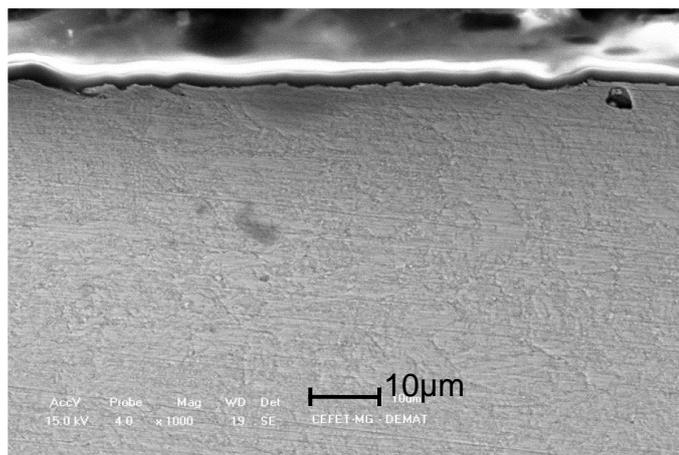
O inserto submetido aos parâmetros de $v_c=450\text{m/min}$ e $f_z=0,2\text{mm}$; apresentou aparência diferente das outras peças analisadas. Sua aparência leva a pensar que o mecanismo de desgaste predominante nesta análise foi a ruptura somente e que não foi seguido pelo desgaste de abrasão. Sua superfície apresenta picos e vales, o que direcionam para um desgaste por ruptura.

De uma maneira geral, os desgastes que ocorreram no fresamento frontal com alta velocidade de corte, não são provenientes de um único mecanismo de desgaste, mas sim de uma combinação de vários deles. Contudo, em nenhuma condição a usinagem com alta velocidade de corte resultou em quebra catastrófica das ferramentas de Metal Duro PCBN. Isto se deve provavelmente ao aumento da velocidade de corte, resultando no aumento da temperatura e presumivelmente na redução do nível de tensões mecânicas e térmicas desenvolvidas na região do corte e da capacidade do material da ferramenta suportar essas tensões sem microfraturas. Além disso, o centro de usinagem utilizado desempenhou um papel muito importante, por ter alta rigidez e potência.

5.8 Análises da microestrutura

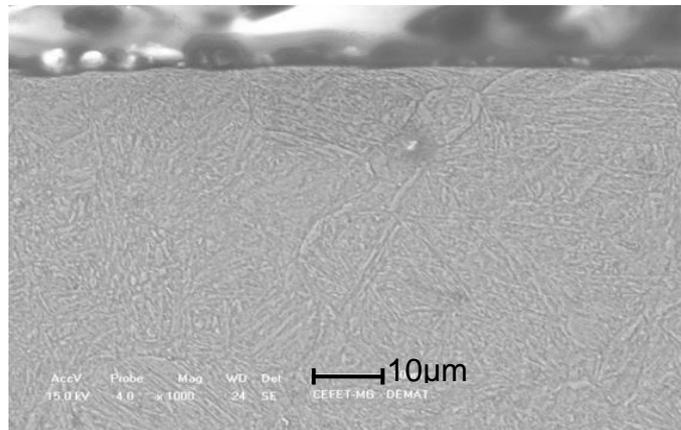
As Figuras 61 à 64 representam as microestruturas das amostras submetidas ao fresamento com $f_z = 0,05\text{mm}$ nas velocidades de corte de 150m/min, 300m/min, 450m/min, e 600m/min, analisadas por meio da Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) com o intuito de verificar possíveis danos causados na sub-superfície do material por meio das solicitações térmicas e mecânicas as quais foram submetidas o material durante o processo de fresamento frontal com alta velocidade de corte.

Figura 61 - Microestrutura na condição de corte com $f_z = 0,05\text{mm}$ e $v_c = 150\text{m/min}$, com ampliação de 1000x.



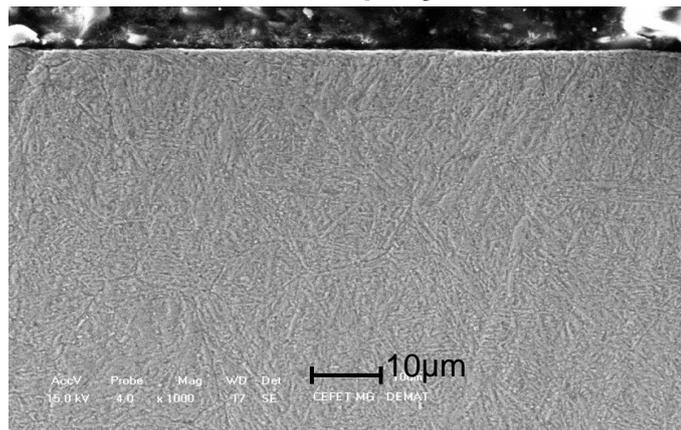
Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 62 - Microestrutura na condição de corte com $f_z= 0,05\text{mm}$ e $v_c= 300\text{m/min}$, com ampliação de 1000x.



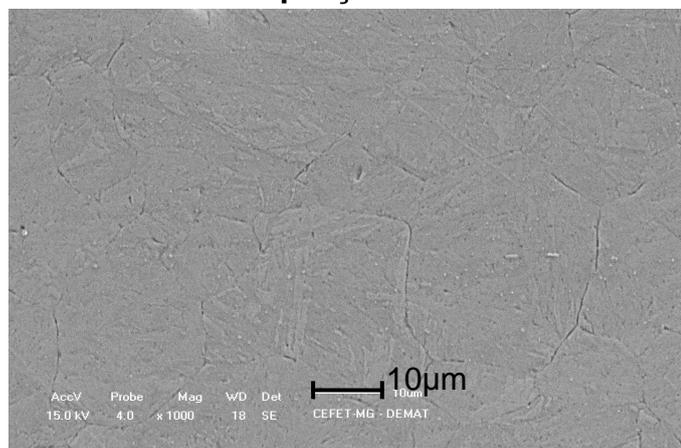
Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 63 - Microestrutura na condição de corte com $f_z= 0,05\text{mm}$ e $v_c= 450\text{m/min}$, com ampliação de 1000x.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 64 - Microestrutura na condição de corte com $f_z= 0,05\text{mm}$ e $v_c= 600\text{m/min}$, com ampliação de 1000x.



Fonte: Elaborado pelo autor.

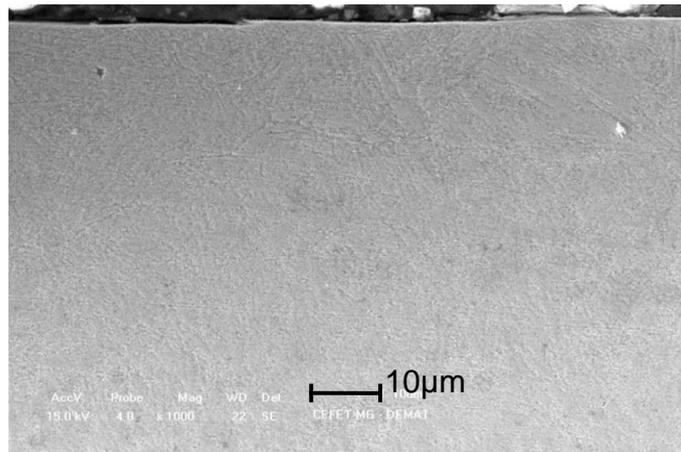
A ocorrência de danos à integridade superficial de uma peça pode levar a aceleração do processo de fadiga, alterar a resistência à abrasão e à corrosão, ou ainda provocar surgimento e crescimento de trincas.

Observa-se que as alterações sub-superficiais causadas pelo aumento da velocidade de corte foram mínimas, não havendo diferenças significativas nas condições testadas,

Em geral os aspectos das imagens demonstraram uma estrutura martensítica com contornos de grãos bem definidos e podem ser observadas agulhas de martensita e algumas plaquetas de bainita.

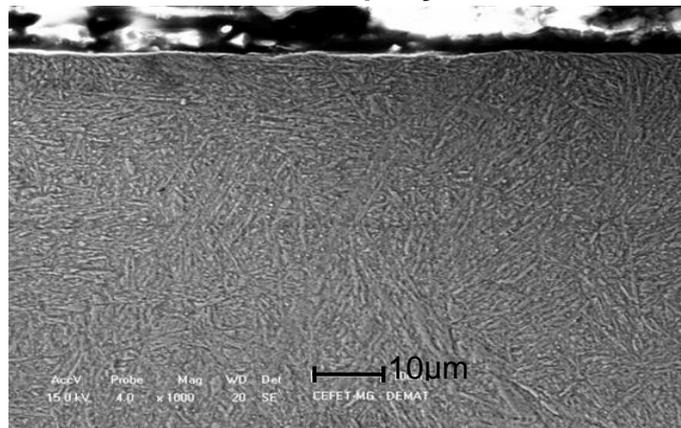
As Figuras 65 à 68 representam as microestruturas das amostras fresadas com $f_z = 0,10\text{mm}$ nas v_c de 150m/min, 300m/min, 450m/min, e 600m/min.

Figura 65 - Microestrutura na condição de corte com $f_z = 0,10\text{mm}$ e $v_c = 150\text{m/min}$, com ampliação de 1000x.



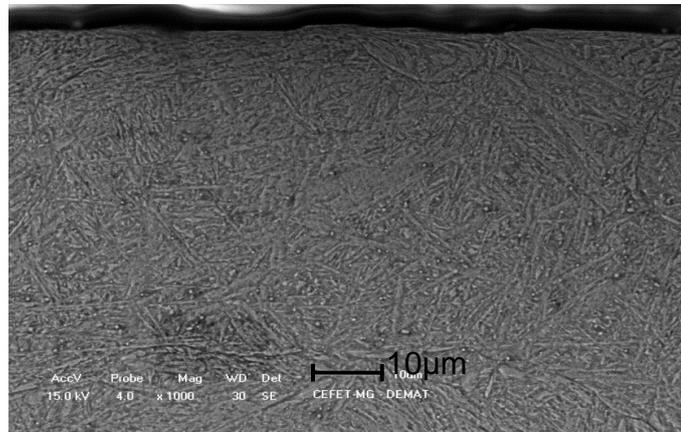
Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 66 - Microestrutura na condição de corte com $f_z = 0,10\text{mm}$ e $v_c = 300\text{m/min}$, com ampliação de 1000x.



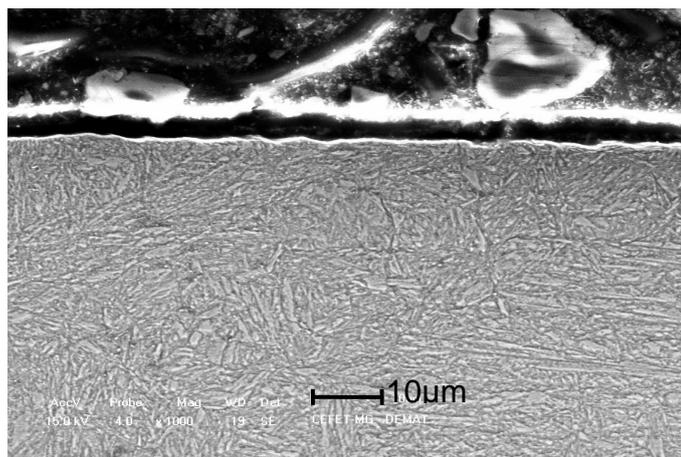
Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 67 - Microestrutura na condição de corte com $f_z= 0,10\text{mm}$ e $v_c= 450\text{m/min}$, com ampliação de 1000x.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 68 - Microestrutura na condição de corte com $f_z= 0,10\text{mm}$ e $v_c= 600\text{m/min}$, com ampliação de 1000x.

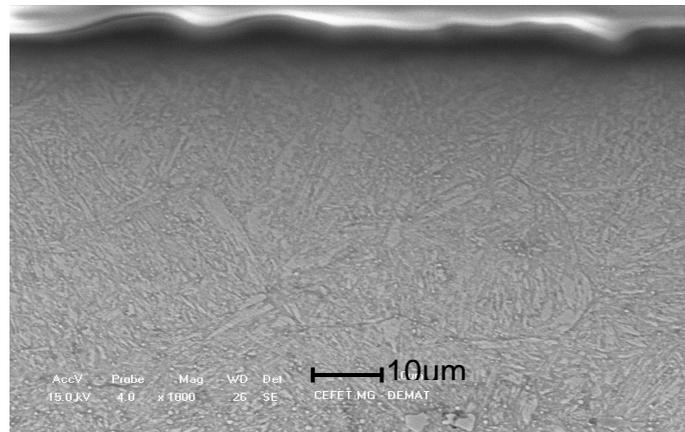


Fonte: Elaborado pelo autor.

Assim como nas figuras de microestrutura resultante do avanço de 0,05mm, as Figuras 65 à 68, apresentaram uma estrutura martensítica com contorno de grãos bem definidos, característicos do aço AISI H13 temperado. Novamente não foi detectado alterações superficiais significativas quando da variação dos parâmetros de corte.

A Figura 69 representa a microestrutura das amostras submetidas ao fresamento com $f_z = 0,10\text{mm}$ na v_c de 600m/min, com inserto de PCBN.

Figura 69 - Microestrutura dos insertos de PCBN na condição de corte com $f_z= 0,10\text{mm}$ e $v_c= 600\text{m/min}$, com ampliação de 1000x.

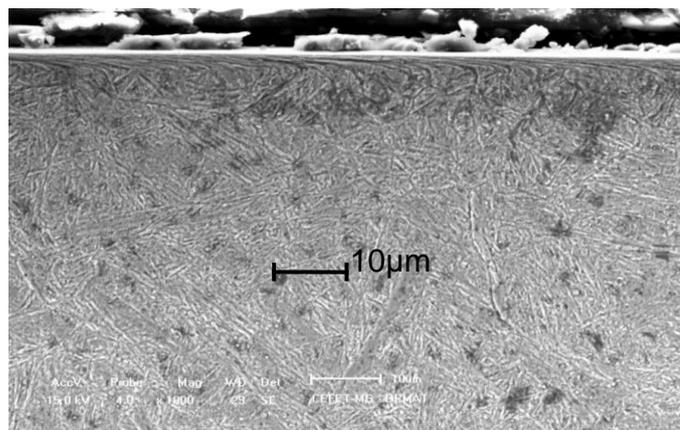


Fonte: Elaborado pelo autor.

A Figura 69 apresentou uma microestrutura martensítica com contorno de grãos bem definidos característicos do aço AISI H13 temperado sem presença de precipitados de nitretos, assim como a estrutura encontrada nas Figuras anteriores,

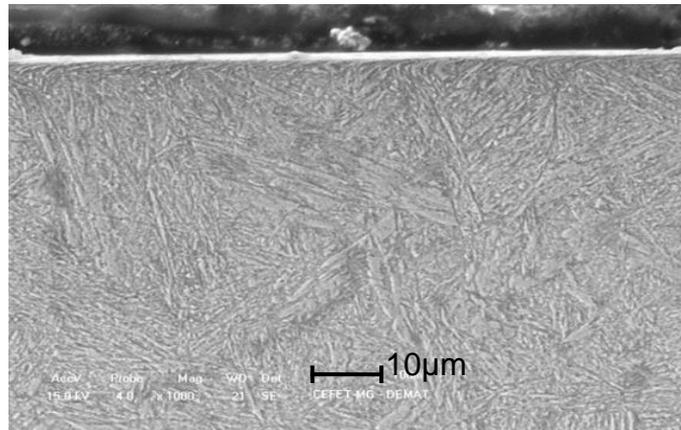
As Figuras 70 à 73 representam as microestruturas das amostras submetidas ao fresamento com $f_z = 0,20\text{mm}$ nas v_c de 150m/min, 300m/min, 450m/min, e 600m/min.

Figura 70 - Microestrutura na condição de corte com $f_z= 0,20\text{mm}$ e $v_c= 150\text{m/min}$, com ampliação de 1000x.



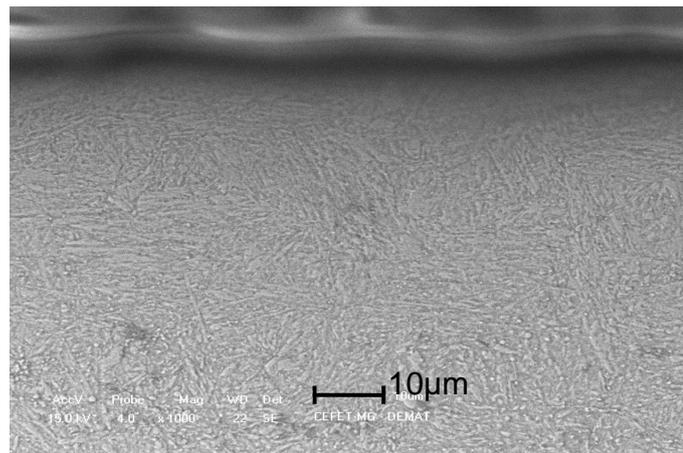
Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 71 - Microestrutura na condição de corte com $f_z= 0,20\text{mm}$ e $v_c= 300\text{m/min}$, com ampliação de 1000x.



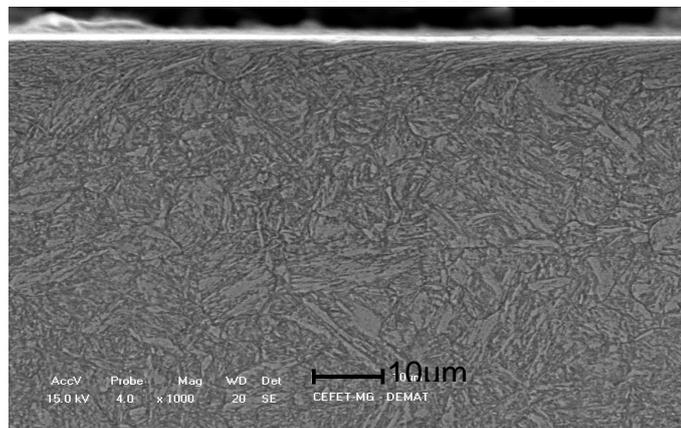
Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 72 - Microestrutura na condição de corte com $f_z= 0,20\text{mm}$ e $v_c= 450\text{m/min}$, com ampliação de 1000x.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 73 - Microestrutura na condição de corte com $f_z= 0,20\text{mm}$ e $v_c= 600\text{m/min}$; com ampliação de 1000x.



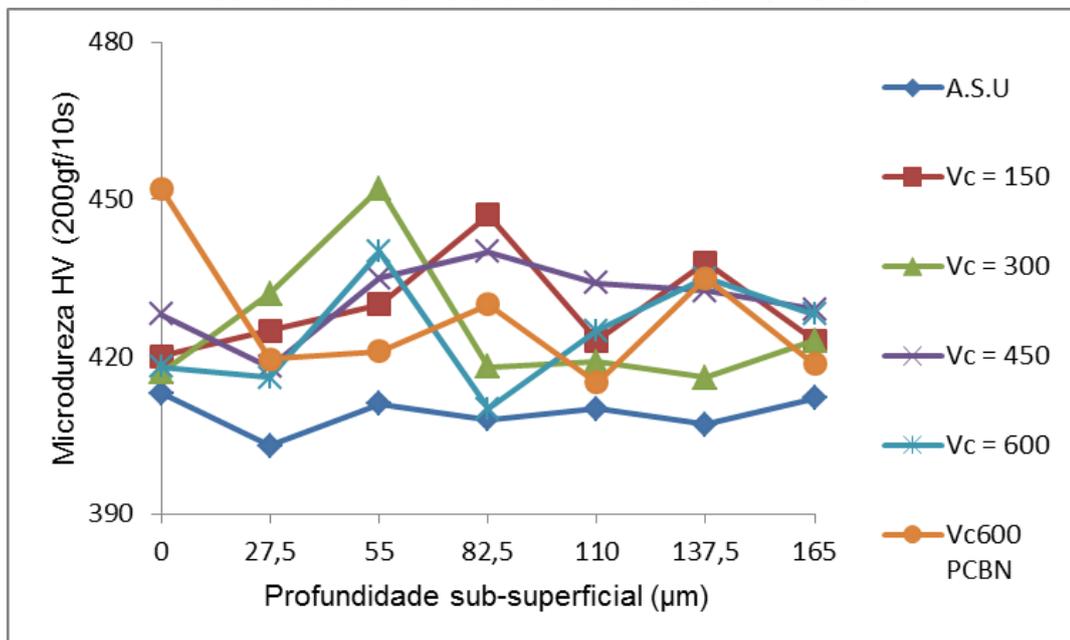
Fonte: Elaborado pelo autor.

De uma maneira geral, os resultados mostraram uma microestrutura martensítica com contorno de grãos bem definidos, típica dos Aços Ferramentas endurecidos por processo de tratamento térmico. O fresamento frontal com alta velocidade de corte no Aço Ferramenta VH13ISO, não apresentou nenhuma alteração microestrutural do material, decorrente do corte a seco.

5.9 Microdureza

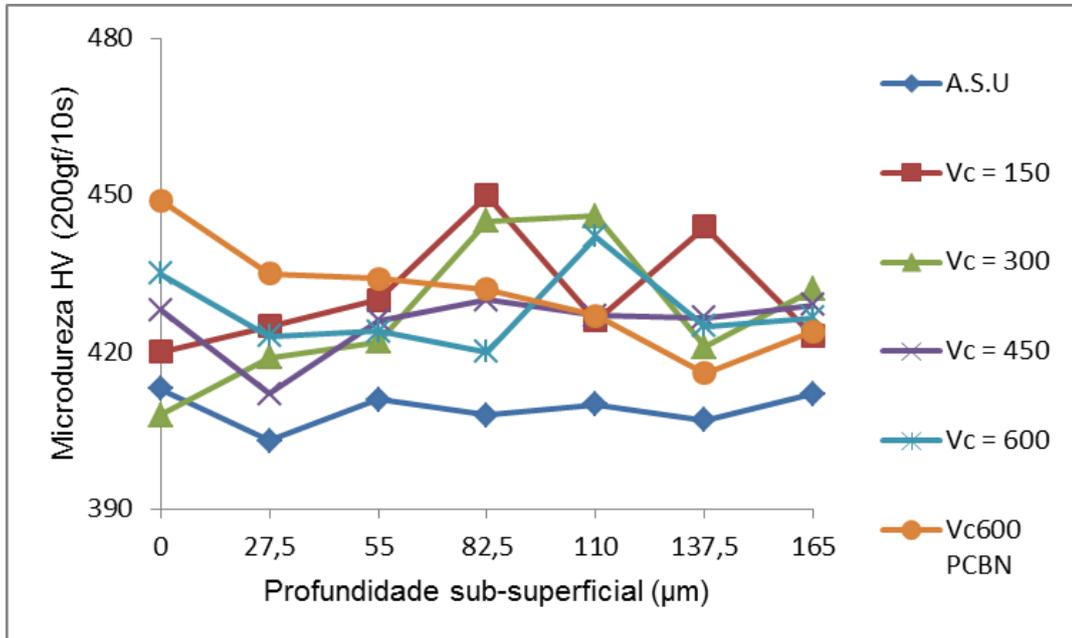
As medições de microdurezas realizadas nos corpos de provas podem ser observados nas Figuras 74 à 76. Analisou a dureza da superfície e sub-superfície das amostras usinadas com ferramenta de Metal Duro e PCBN utilizando $f_z = 0,05\text{mm}$, $f_z = 0,10\text{mm}$ e $f_z = 0,20\text{mm}$ com diferentes velocidades de corte. Analisou-se também amostra sem usinagem (A.S.U) para comparativo da microdureza antes e depois da usinagem com alta velocidade de corte.

Figura 74 - Microdureza na superfície e sub-superfície com ferramentas de Metal Duro e PCBN utilizando $f_z = 0,05\text{mm}$ com diferentes velocidades de corte e com amostra sem usinagem (A.S.U).



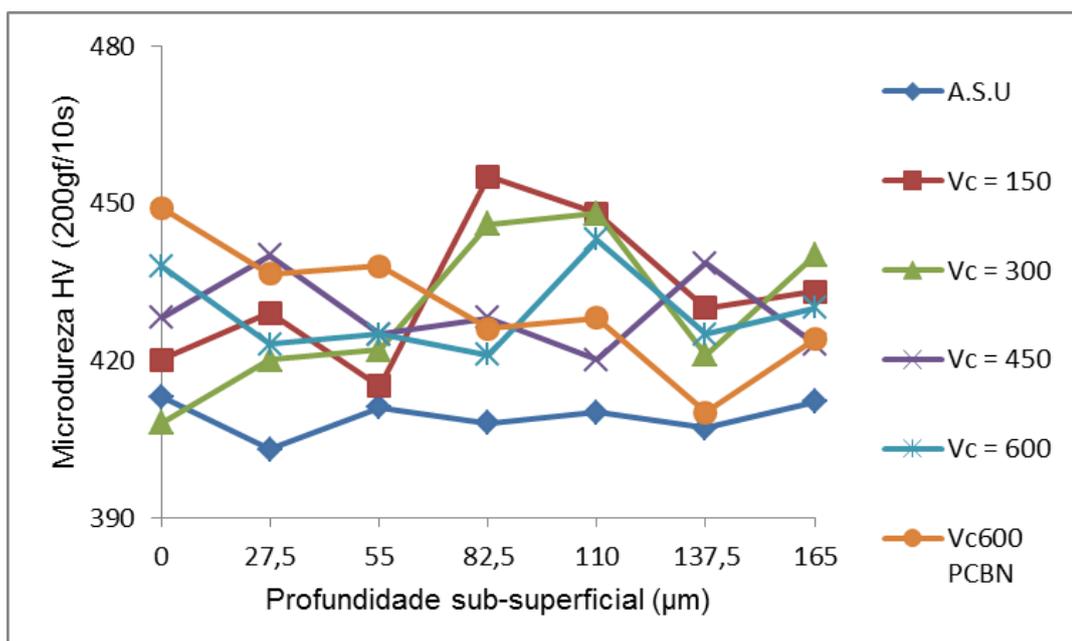
Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 75 - Microdureza na superfície e sub-superfície com ferramentas de Metal Duro e PCBN utilizando $f_z= 0,10\text{mm}$ com diferentes velocidades de corte e com amostra sem usinagem (A.S.U).



Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 76 - Microdureza na superfície e sub-superfície com ferramentas de Metal Duro e PCBN utilizando $f_z= 0,20\text{mm}$ com diferentes velocidades de corte e com amostra sem usinagem (A.S.U).



Fonte: Elaborado pelo autor.

Os ensaios resultantes nos corpos de provas com avanço por aresta f_z de 0,1mm não mostraram uma variação na dureza superficial das amostras decorrente do processo de fresamento com alta velocidade, a Figura 75 evidencia os resultados.

Não foi detectado uma variação significativa na dureza sub-superficial nos corpos de provas que foram usinados com avanço por aresta f_z de 0,20mm, quando comparada as medições na amostra sem usinagem (A.S.U) conforme se observa na Figura 76.

De forma geral nos ensaios de microdureza na velocidade de corte de 600m/min, com ferramentas de PCBN, apresentaram a maior dureza inicial no fresamento. As medições mostraram uma queda estável na dureza, com variação aproximada de 30HV, entre a medida inicial e a final. Já a velocidade de 600m/min, com metal duro demonstrou uma certa instabilidade no valor da microdureza, no entanto com valores iniciais e finais muito próximos.

Os ensaios com a velocidade de corte de 450m/min, quando comparados aos outros ensaios realizados, demonstrou a melhor estabilidade na microdureza.

As velocidades de corte de 300m/min, e 150m/min, demonstraram desempenho semelhante nas medições da microdureza. Os valores apresentaram um certa estabilidade inicial mas depois começaram a mostra uma oscilação dos valores.

No geral as medições demonstram um pequeno aumento da microdureza do material, o que muito provavelmente pode ser explicado pelo processo de têmpera que ocorre naturalmente no processo de fresamento causado pela temperatura que se forma durante o corte entre o inserto e o material. Este fenômeno é ainda maximizado pelo aumento da força de corte, que acontece com a perda da capacidade de remoção de material á medida que o desgaste de flanco vai aumentando.

6 CONCLUSÕES

O processo de fresamento frontal com alta velocidade de corte na operação de semi-acabamento no aço ferramenta VH13ISO endurecido, demonstrou ser um processo no qual a vida útil da ferramenta de corte está sujeita a diversas variáveis que podem levar ao fim de sua vida em um curto espaço de tempo, sendo assim, a atuação do operador para substituí-la ou trocá-la é muito importante para manter a integridade do conjunto máquina/ferramenta.

Os mecanismos de desgaste atuante na aresta de corte da ferramenta, são de difíceis detecção e análise e a determinação de qual é o mecanismo predominante tornou-se muito difícil, pois na maioria dos casos analisados percebeu-se mais de um mecanismo atuante.

Os experimentos mostraram que todos os parâmetros podem influenciar no desgaste do inserto, e muitas vezes não existe uma relação direta entre eles, como maior velocidade de corte (v_c), maior desgaste, ou maior avanço por aresta de corte e maior desgaste. Mas percebe-se que isto é verdadeiro até o “ponto de transição” que pode acontecer no fresamento sem nenhuma pré-deteção.

Nos ensaios com $f_z= 0,05\text{mm}$ percebeu-se uma interferência grande da velocidade de corte no processo de desgaste da aresta de corte da Ferramenta de Metal Duro e de PCBN. À $v_c= 150\text{m/min}$, o inserto demonstrou boa capacidade de remoção do material e sofreu um pequeno desgaste em sua aresta de corte. Com a $v_c= 300\text{m/min}$, o inserto demonstrou praticamente a mesma condição de corte, no entanto, apresentou uma condição melhor de desgaste de flanco, o qual foi considerado zero devido a não ter sido evidenciado nas medições realizadas com a lupa. Conclui-se com isso, que a velocidade de corte não é a única responsável pelo desgaste, e que o tempo de contato entre a aresta de corte e o material, associados a outros fatores interferem na vida da aresta de corte.

Os ensaios com ferramentas de Metal Duro à $v_c= 450\text{m/min}$, apresenta uma resistência limitada ao desgaste de flanco, mas conclui o ensaio dentro do esperado para a remoção de material prevista. Com $v_c= 600\text{m/min}$, os ensaios demonstraram que o metal duro apresenta uma forte tendência à perda da capacidade de corte, e o seu uso sob tais parâmetros, devem ser bem analisados para saber a viabilidade do fresamento.

A ferramenta de PCBN com o $f_z= 0,05\text{mm}$ e $v_c= 600\text{m/min}$ demonstrou uma

boa condição de corte sem nenhum desgaste encontrado com a lupa utilizada. Com isto se conclui no fresamento no qual se precisa de rapidez na fabricação da peça, o uso do PCBN pode contribuir no tempo de fabricação economizando nos tempos de set up do inserto e de remoção do material. Mesmo o valor financeiro de uma ferramenta de PCBN sendo superior a uma de Metal Duro, os ensaios demonstraram que uma análise da viabilidade do uso pode ser benéfico na competitividade da usinagem de fresamento frontal.

Com o $f_z= 0,10\text{mm}$, os ensaios apresentaram comportamento bastante parecido aos realizados com o $f_z= 0,05\text{mm}$, no entanto, percebeu-se uma pequena alteração nos valores do desgaste, o que em muitos casos pode ser viável devido ao ganho na execução da atividade.

As velocidades de corte de 150m/min , e 300m/min , mostraram uma inversão no comportamento do desgaste quando comparados aos valores obtidos com o ensaio realizados com $f_z= 0,05\text{mm}$. Com isso pôde-se concluir então que, a espessura do corte promovido pela velocidade de avanço da aresta de corte associado à velocidade de corte interfere de forma negativa na vida de corte do inserto. Já a $v_c= 450\text{m/min}$, e $f_z= 10\text{mm}$, assim como os resultados dos ensaios com o $f_z= 0,05\text{mm}$ citados anteriormente, mostraram que o Metal Duro apresenta uma resistência limitada ao desgaste de flanco, mas conclui o ensaio dentro do esperado para a remoção de material prevista. Concluiu ainda que o seu uso sob tais parâmetros pode ser uma alternativa positiva para ganhos de tempo na fabricação de peças usinadas.

Com $v_c= 600\text{m/min}$, os ensaios demonstraram que o metal duro não apresentou bom desempenho, o que se conclui que o seu uso sob tais condições de fresamento não é recomendado. Já para as ferramentas de PCBN sob os parâmetros de $v_c= 600\text{m/min}$, e $f_z= 0,10\text{mm}$, a mesma apresentou um bom rendimento no fresamento e o seu uso pode trazer ganhos para a operação.

Com o $f_z= 0,20\text{mm}$, os ensaios demonstraram um comportamento no qual à $v_c= 150\text{m/min}$, demonstrou uma boa condição de corte e pouco desgaste. Com a $v_c= 300\text{m/min}$, o desgaste foi mais que o dobro que o medido com a velocidade de corte de 150m/min , no entanto, sua aplicação pode ser viável, visto que, a usinagem aconteceu na metade do tempo e o desgaste ficou dentro de níveis aceitáveis para a operação. Os ensaios demonstraram ainda que para as velocidades de corte de $v_c= 450\text{m/min}$, $v_c= 600\text{m/min}$, e $v_c= 600\text{m/min}$, com PCBN,

o $f_z= 0,20\text{mm}$ não é recomendado no fresamento de alta velocidade de corte na operação de semi-acabamento.

O inserto de PCBN deve ser usado com cuidado no fresamento devido ao corte interrompido ou choque com o cavaco, o que pode possibilitar o surgimento de fratura da aresta de corte durante o fresamento, no entanto, ele possui uma resistência ao desgaste muito superior ao inserto de metal duro e seu uso deve ser mediante uma análise de custo benefício da operação.

As rugosidades (R_a) e (R_t) não demonstraram uma relação direta entre elas, nem com os outros parâmetros utilizados. Com o $f_z= 0,05\text{mm}$, a $v_c= 150\text{m/min}$, a rugosidade (R_a) final do ensaio foi maior que as encontradas com as demais velocidades, o que permite concluir que a interferência do tempo de contato entre a aresta de corte e o material usinado, seja ele na forma de material a ser retirado ou de cavaco, pode influenciar na rugosidade final. Tal conclusão pode ser vista no gráfico, fazendo uma comparação com as rugosidades encontradas no fim do ensaio com velocidades maiores e conseqüentemente, tiveram menos tempo de contato com o material. Já com a velocidade de corte de $v_c= 450\text{m/min}$, o ensaio apresentou o melhor acabamento final, o que leva a conclusão de que com a situação de ajuste mecânico e folgas do conjunto máquina/ferramenta sob os parâmetros utilizados, esta foi a melhor velocidade de corte para se conseguir acabamentos mais finos na superfície usinada do aço ferramenta VH13ISO.

A $v_c= 600\text{m/min}$, com inserto de PCBN, apresentou um valor final praticamente igual ao encontrado na melhor situação da $v_c= 450\text{m/min}$, com o inserto de metal duro, no entanto, as oscilações sofridas pelos valores demonstraram uma instabilidade, o que pode estar ou não diretamente ligado ao balanceamento do conjunto de corte (máquina/ferramenta).

Com o $f_z= 0,10\text{mm}$, a rugosidade final encontrada demonstrou praticamente a mesma condição dos ensaios submetidos ao f_z de $0,05\text{mm}$, o que reforça a conclusão de que o tempo de contato associado à dureza do material, à condição de corte e ao balanceamento do conjunto máquina/ferramenta, influenciam diretamente na rugosidade. Com o $f_z= 0,20\text{mm}$, e $v_c= 300\text{m/min}$, demonstrou a melhor condição de acabamento, reforçando que o uso de tais parâmetros pode representar um ganho expressivo de tempo e qualidade do fresamento quando comparado ao fresamento com o mesmo f_z e v_c de 150m/min .

As análises microestruturais demonstraram uma estrutura martensítica típica de

materiais endurecidos pelo processo de tratamento térmico. Nas análises das amostras analisadas no microscópio eletrônico de varredura (MEV) não foram evidenciadas alterações em sua superfície proveniente das condições de corte utilizadas, em nenhum dos parâmetros ou combinação deles. O que se conclui que o fresamento frontal com alta velocidade de corte não interferiu na microestrutura do material.

Os ensaios de macro dureza não acusaram alterações na dureza do material à medida que se realizava o fresamento. Os ensaios de microdurezas realizados com a carga de 200gramas por um tempo de 10 segundos, apresentaram variações entorno de 380HV á 450HV. Quando analisado a microdureza da amostra sem usinagem (ASU) com as demais, percebe-se uma diferença nas primeiras medições onde esta é maior nos ensaios que utilizaram velocidade de corte menores esta diferença atribui-se ao processo de têmpera que acontece naturalmente durante o fresamento, proveniente das temperaturas de corte que acontecem durante o corte e dos carbonetos formados no material.

De forma geral, conclui-se então com base nos resultados dos ensaios, que no fresamento de alta velocidade de corte com o uso de metal duro no aço ferramenta VH13ISO endurecido à 43HR_C, o uso da velocidade de corte de 300m/min, é mais viável que o de 150m/min, pois o inserto apresentou resistência ao desgaste e ganhos no tempo de execução. O uso da velocidade de corte de 450m/min (com as ferramentas de metal duro) e de $v_c= 600\text{m/min}$ (com as ferramentas de PCBN) só se apresentaram viáveis para f_z igual ou menor que 0,10mm.

SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Como possibilidade de trabalhos futuros, pode-se sugerir alguns temas que complementam o atual e outros que podem produzir resultados diferenciados. Segue algumas sugestões:

- Utilização de diferentes métodos de lubri-refrigeração no fresamento frontal e tangencial com alta velocidade de corte;
- Medição da temperatura de corte e força de usinagem no fresamento frontal e tangencial com alta velocidade de corte;
- Análise da tensão residual com o aumento da velocidade de corte.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABRÃO, A. M.; ASPINWALL, D. K.; WISE, M. L. A review of polycrystalline cubic boron nitride tool developments and application. In: **Proceeding of the Thirtieth International Matador Conference**, Manchester, UK, Apr, 1993, p. 1-11

AGUIAR, M. M. **Análise da influência das condições de corte sobre o fresamento em acabamento de aços endurecidos usando altas velocidades**. 2012. 123 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Mecânica, Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, Campinas.

AMORIM, H. J. **Estudo da relação entre velocidade corte, desgaste de ferramenta, rugosidade e forças de usinagem em torneamento com ferramenta de metal duro**. 2002. 114 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.

ANDRAE, P. Chip formation in high speed cutting HSC. In: **Internacional Machining & Grinding Conference**, v. 3, p. 107-120, out. 1999.

ANEIRO, F. M., COELHO, R. T., BRANDÃO, L. C. Turning Hardened Steel Using Coated Carbide at High Cutting Speeds. **Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences**, V. 30, p.104-109, feb. 2008.

ASM INTERNATIONAL. **Handbook of Residual Stress and Deformation of Steel**. ASM International, 2000.

ASPINWALL, D. K, KOSHY, P., DEWES, R. C. High Speed End Milling Of Hardened AISI D2 Tool Steel (~ 58 HRC). **Journal of Materials Processing Technology**, v.127, p. 266-273, Jul. 2002.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6175: Processos Mecânicos de Usinagem**. Rio de Janeiro, 1971.

BODZLAK, S; SOUZA, A. F.; RODRIGUES, A. R. Estudo da superfície usinada nos aços AISI P20 e AISI H13. **Revista Máquinas e Metais**. v. 568, p.24-35, out. 2013.

BOEHS, L.; BET, L. M. F. Usinagem do Aço SAE 1045 Utilizando Materiais Cerâmicos. In: VI CONGRESSO NACIONAL DE ENGENHARIA MECÂNICA. SANTIAGO. **Anais...** SANTIAGO. 1994. p. 359-364.

BRAGHINI J. A. **Metodologia para escolha de fluido de corte não agressivos para o meio ambiente para aplicações em usinagem de metais**, 2002. 248p. Tese (Doutorado) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo. São Carlos.

BRANDÃO, L. C.; COELHO, R. T. Resultados e perspectivas de um projeto temático. **Revista máquinas e metais**, nº 542, p.32-44, mar. 2011.

CALDEIRANI, F. J.; DINIZ, A. E. Influence of cutting conditions on tool life, tool wear

and surface finish in the face milling process. **Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences**, Rio de Janeiro, v. 24, p. 305-317, jul. 2002.

CALLISTER, D. Jr. **Ciência e Engenharia de materiais** - Uma introdução. 5. edição. Rio de Janeiro: LTC, 2002. 370p.

CAMARGO, R. **Rugosidade superficial nas operações de torneamento**. Santa Bárbara D'Oeste: SENAI. 2002.

CATAI, R. E.; BIANCHI, E. C.; AGUIAR, P. R.; SILVA, L. R da. Análise da influência do processo de retificação nas circularidades, tensões residuais e na microestrutura do aço VC 131 mediante a variação do tipo de fluido de corte, In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA E CIÊNCIAS DOS MATERIAIS, 17. Foz do Iguaçu. **Anais...** Foz do Iguaçu: CBECIMAT, 2006. p. 7181-7192.

CHIAVERINI, V. **Aços e ferros fundidos**: características gerais, tratamentos térmicos, principais tipos. 4. Ed. São Paulo: ABM, 1977. 504p.

CHOUDHURY, S. K., BAJPAI, J. B. Investigation in orthogonal turn-milling towards better surface finish. **Journal of Materials Processing Technology**, Las Vegas, v.170, p. 487-493. Jul. 2005.

COUTINHO, T. A. **Metalografia de Não-Ferrosos**. 1.ed. São Paulo: Edgard Blucher, 1980. 138p.

DEWES, R. C.; ASPINWALL, D. K. A review of ultra high speed milling of hardened steels. **Journal of Materials Processing Technology**, n.69, 1997, p. 1-17

DEWES, R. C.; NG, E.; CHUA, K. S.; NEWTON, P.G.; ASPINWALL, D. K. Temperature Measurement when High Speed Machining Hardened Mould/Die Steel. **Journal of Materials Processing Technology**. v. 44, p. 293-301, jul. 1999.

DINIZ, A. E., MARCONDES, F. C., COPPINI, N. L., 2008, **Tecnologia da usinagem dos metais**, Artliber Editora, São Paulo, 6ª Edição.

EKMEKCI, B.; ELKOCA, O.; ERDEN, A. A comparative study on the surface integrity of plastic mold steel due to electric discharge machining. **Metallurgical and Materials Transactions B: Process Metallurgy and Materials Processing Science**, v. 36, n. 1, p. 117-124, 2005.

ERDEL, B. P. Characteristics of High-speed Machining. In: *High-speed machining*. HSM. Estados Unidos: SME, 1997. p. 21-24.

FACCIO, I. **Investigação sobre o acabamento superficial de usinagens com altíssimas velocidades de corte**. 2002. 126 f. Dissertação (Mestrado) – Departamento de Engenharia Mecânica, Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo,

FERRARESI, D. **Fundamentos da usinagem dos metais**. 12.ed. São Paulo: Edgard Blucher, 2012. 751p.

FILHO, A. P.. Rugosidade Superficial. Terceiro Seminário de Metrologia. Brasília: **UnB**: 2011. Faculdades de Tecnologia, Universidade de Brasília, 2011.

FIELD, M.; KAHLES, J. F. E KOSTER, W. P. **Surface Finish and Surface Integrity. Metals Handbook**. 19th ed. USA: American Society for Metals – ASM International Handbook Committee. v. 16, 1989. p. 19 – 36.

GAMARRA, J. R. Características das Ferramentas em HSM – Fresamento, Furação e Faceamento. In: **Usinagem em altíssimas velocidades**: como os conceitos HSM/HSC podem revolucionar a indústria metal-mecânica. São Paulo: Ed. Érica, 2003, p. 104.

GERDAU - **Aços Finos Piratini**. Manual de Aços. Ed atualizada , 2003, p. 39.

GHANEM, F.; BRAHAM, C.; SIDHOM, H. Influence of steel type on electrical discharge machined surface integrity. **Journal of Materials Processing Technology**, v142, p. 163-173, 2002.

GRAHAM, D. E. Revestimento de Al₂O₃ para ferramentas de carbeto cementado. **Máquinas e Metais**, v. 338, p. 22-35, out. 1994.

GODOY, C. 2003, “Análise Topográfica por Perfilometria do Desgaste de Cratera em Ferramenta de Metal Duro Revestida com TiN”, **Revista Matéria**, v8, p. 145-154. Jul. 2003.

GRIFFITHS, B. J. **Manufacturing surface technology**. 1. ed. London: Penton Press, 2001.

GRZESIK, W. **Influence of tool wear on surface roughness in hard turning using differently shaped ceramic tools**, **Wear**, 2008. 265p.

GRZESIK, W., RECH, J., WANAT, T. Surface Integrity of Hardened Steel Parts in Hybrid Machining Operations. **Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering**. v.18, p. 367-370, feb. 2006.

HELLENO, A. L. **Investigação de métodos de interpolação para trajetória da ferramenta na usinagem de moldes e matrizes com alta velocidade**. 2004. 157f. 2004. Dissertação (Mestrado) - Engenharia de Produção, Universidade Metodista de Piracicaba, Santa Bárbara d'Oeste.

HIOKI ,D. **Influência dos parâmetros de corte do fresamento HSM sobre o desempenho tribológico do aço AISI H13 endurecido**. 2006. 232f. Tese (Doutorado) - Engenharia Mecânica, Universidade de São Paulo, São Paulo.

HIOKI, D. **Usinagem dura do aço 100cr6 com PCBN**. 1998. 164f. Dissertação (Mestrado) - Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION – ISO. **International Standard – ISO 3685 – Tool-life Testing With Single-point**

Turning Tools. 2nd ed. Genève, Switzerland. 1993. 54 p. 42.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION – ISO. **International Standard – ISO 513 – Classification and Application of Hard Cutting Materials for Metal Removal with Defined Cutting Edges – Designation of the Main Groups and Groups of Application.** Genève, Switzerland. 2004. 3 p.

ISCAR Cutting Tools, **Catálogo eletrônico** abr.2010. disponível em: <http://www.iscardobrasil.com.br/catalogs.aspx/CountryId/4>Acessado em: 15 abr.2010.

ISCAR. **Conceitos básicos de usinagem**, catálogo. 2011.

LANDI, D. C. **Torneamento com altas velocidades de corte.** Usinagem em altíssimas velocidades: como os conceitos HSM/HSC podem revolucionar a indústria metal mecânica - São Paulo, 2^o edição, 2003.

MACHADO, Á. R., ABRÃO, A. M., COELHO, R.T., SILVA, B. M. **Teoria da usinagem dos materiais.** 2. ed. São Paulo: Blucher, 2009.

MACHINABILITY DATA CENTER, T. S. **Machining data handbook.** 3 ed. ed. Ohio: Machinability Data Center, 1980.

MELLO, M. S., SOUZA, A. J., GEIER, M. Determinação empírica dos parâmetros de rugosidade R_a e R_t aplicando ferramenta alisadora no torneamento a seco de acabamento do aço AISI 4140. In: **7^o CONGRESSO NACIONAL DE ENGENHARIA MECÂNICA – CONEM, 7., 2012, São Luiz. Anais...** São Luis: CONEM, 2012. p.3454-3466..

METALS HANDBOOK. **Properties and Selection: Irons and Steels.** Volume I, 9th ed. Metals Park, Ohio, USA: American Society for Metals – ASM. 1978. P.793.

MITSUBISHI CARBIDE. **Ferramentas de Metal Duro para Usinagem.** São Paulo: Catálogo 2002.

MOMPER, F. J. Usinagem a seco e de materiais endurecido. **Máquinas e Metais,** São Paulo, n.411, 2000, p. 30-37

MULLER, P.; SOTO, M. Usinagem sem refrigeração de Furos e Roscas. In: SEMINÁRIO INTERNACIONAL DE ALTA VELOCIDADE – ABM, 4., 1999, Santa Bárbara do Oeste. **Anais...** Santa Bárbara do Oeste: ABM, 1999. p. 126-133.

OLIVEIRA, A. C. **Programação de Estratégias de Fresamento a Altas Velocidades (HSM) na Manufatura de Moldes e Matrizes através de Sistemas CAM.** 2002. 142f. Dissertação (Mestrado) - Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis.

OLIVEIRA, A. J. **Análise do desgaste de ferramentas no fresamento com alta velocidade de aços endurecidos**. 2007. 205 f. Tese (Doutorado) - Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, Campinas.

OLIVEIRA, F. G. HSM – Conceito e aplicações. In: **Usinagem em altíssimas velocidades**: como os conceitos HSM/HSC podem revolucionar a indústria metal-mecânica. São Paulo: Ed. Érica, 2003, p. 29–35.

PIGARI, A. C. **Monitoramento do Desgaste da Ferramenta no Processo de Torneamento usando Emissão Acústica**. 1995. 130f. Dissertação (Mestrado) - Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, Campinas.

RECH, J., KERMOUCHE, G., GRZESIK, W., GARCIA, R. C., KHELLOUKI, A., GARCIA-NAVAS, V. Characterization and modelling of the residual stresses induced by belt finishing on a AISI52100 hardened steel. **Journal of materials processing technology**, v. 208, p. 187–195, jul. 2008.

ROSA, L. C. **Acabamento de Superfícies; Rugosidade Superficial**. São Paulo: Universidade Estadual Paulista, 2009.

SANDVIK, C. **Fabricação de Moldes & Matrizes**. Suécia: Catálogo. 2002. P.258.

SANDVIK C. **Modern Metal Cutting – A Practical Handbook**, Technical Editorial Dept., Sandviken, Suécia. 2005.

SCHULZ, H. The history of high-speed machining. **Revista de ciência e tecnologia**, v.7, n.13, p.9-18, 1999.

SCHUTZER, K.; SCHULZ, H. Histórico da Usinagem com Altíssima Velocidade até os dias atuais. In: **Usinagem em altíssimas velocidades**: como os conceitos HSM/HSC podem revolucionar a indústria metal-mecânica. São Paulo: Ed. Érica, 2003, p. 29 – 35.

SECO. **Fresamento 1 – Catálogo e Guia Técnico** – Catálogo. 2012. 368 p.

SHAW, M. C. **Metal Cutting Principles**. Oxford, UK: Oxford University Press. 1984. Reprinted 1997. P.165.

SHAW, M. C. **Metal cutting principles**. 2. ed. New York: Oxford University Press, 2005.

SILVA, L. R.; COELHO, R. T.; CATAI, R. E. Desgaste de ferramentas no torneamento com alta velocidade de corte da superliga “waspaloy”. **Revista Escola de Minas**, Ouro Preto, v. 57, n. 2, p. 109-114, jun. 2004.

SILVA, R. L. J. **Fresamento do aço vhsuper nos estados recozido e temperado com metal duro e cermet**. 2007. 244f. Tese (Doutorado) - Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte.

SILVEIRA, José, Filipe. **Fresamento do Aço ABNT H13 Endurecido, com Ferramentas de Cermet e de Metal Duro**. 2002. 102f. Dissertação (Mestrado) – Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Itajubá, Itajubá.

SKONG, D. A.; HOLLER, F. J.; NIEMAN, T. A. **Princípios de análise instrumental**. Porto Alegre: Bookman, 2002. 836 p.

SOUTO, U. B. **Monitoramento do desgaste de ferramenta no processo de fresamento via emissão acústica**. 2007. 182 f. Tese (Doutorado)- Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia.

SOUZA, P. F. **Torneamento em alta velocidade do ferro fundido cinzento fc 250 com ferramenta de nitreto de silício**. 2012. 149f. Dissertação (Mestrado) - Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis.

SMITH, G. T. Cutting Tool Technology - **Industrial Handbook**. Springer, 2008.

STEMMER C. R. **Ferramentas de Corte I**. 6ª edição. Editora Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, 2006.

STEPHENSON, D. A., AGAPIOU, J. S. **Metal Cutting Theory and Practice**. 1.ed. New York : Marcel Dekker, 1996, p.898.

SUYAMA, D. I. **Efeito do fresamento com alta velocidade de corte na integridade superficial de aços ferríticos com grãos ultrafinos**. 2010. 113 f. Dissertação (Mestrado) - Engenharia Mecânica, Universidade Estadual Paulista, Ilha Solteira.

TEDESCO, M. E. **Variação dimensional e microestrutural do aço AISI 4140 em peças usinadas por torneamento**. 2007. 83f. Dissertação (Mestrado) - Engenharia e Ciência dos Materiais, Universidade de Caxias do Sul, Caxias do Sul.

TONSHOFF, H. K.; WOBKER, H. G.; BRANDT, D. Tribological aspects of hard turning with ceramic tools. **Journal of Society of Tribologists and Lubrication Engineers**. v.23, p. 163-168, feb. 1995.

TRENT, E. M.; WRIGHT, P. K. **Metal Cutting**. 4. ed. Boston: Butterworth-Heinemann, 2000. P.446.

VAN VLACK, L. **Princípios de Ciência e Tecnologia dos Materiais**. 4. ed. São Paulo, SP, Brasil: Editora Campus. 1979. P.567.

VILLARES METALS. **Aços Ferramentas**. Apostila- Aços para trabalho a quente. São Paulo, 2006.

WALTER AG TOOLS. **Ferramentas de Metal Duro – Catálogo Geral**. Tübingen, Germany: Catálogo. 2000. 752 p.

WALTER AG TOOLS. **General Catalogue**. Tübingen, Germany: Catálogo. 2004. 792 p.

WEINGAERTNER, W. L.; SCHROETER, R. B. **Tecnologia da usinagem com ferramentas de corte de geometria definida** - Parte I. Tradução do livro "Fertigungsverfahren - Drehen, Bohren, Fräsen" de Wilfried König e Fritz Klocke, Florianópolis, 2002.

WILKINSON, P.; REUBEN, R. L.; JONES, J. D. C.; BARTON, J. S.; HAND, D. P.; ROLAN, T.A., **Surface Finish Parameters as Diagnostics of Tool Wear in Face Milling. Wear** v.205. 1997. p 47-54.

ZEREN, E. Hard milling technology. New Jersey: **Manufacturing automation and research laboratory**, Department of Industrial and systems engineering Rutgers, July 2002.