

DILSON JOSÉ AGUIAR DE SOUZA

**INFLUÊNCIA DA MICROGEOMETRIA DO GUME E DA
CLASSE DE PCBN NO CORTE ORTOGONAL DE
AÇO RÁPIDO FABRICADO POR METALURGIA DO PÓ**

Tese submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Santa Catarina para a obtenção do Grau de Doutor em Engenharia Mecânica.

Orientador: Prof. Dr.-Ing. Walter Lindolfo Weingaertner.

Coorientadores: Prof. Dr. Eng. Rolf Bertrand Schroeter e Dr. Eng. Cleiton Rodrigues Teixeira.

Florianópolis
2013

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor,
através do Programa de Geração Automática da Biblioteca Universitária da UFSC.

Souza, Dilson José Aguiar de
Influência da microgeometria do gume e da classe de
PCBN no corte ortogonal de aço rápido fabricado por
metalurgia do pó / Dilson José Aguiar de Souza ;
orientador, Walter Lindolfo Weingaertner ; co-orientadores,
Rolf Bertrand Schroeter e Cleiton Rodrigues Teixeira. -
Florianópolis, SC, 2013.
146 p.

Tese (doutorado) - Universidade Federal de Santa
Catarina, Centro Tecnológico. Programa de Pós-Graduação em
Engenharia Mecânica.

Inclui referências

1. Engenharia Mecânica. 2. Microgeometria de gume. 3.
Mecanismos de desgaste da ferramenta. 4. Ferramenta de
PCBN. 5. Aço rápido fabricado por metalurgia do pó. I.
Weingaertner, Walter Lindolfo. II. Schroeter, Rolf
Bertrand. III. Teixeira, Cleiton Rodrigues. IV.
Universidade Federal de Santa Catarina.
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica. V. Título.

Dilson José Aguiar de Souza

**INFLUÊNCIA DA MICROGEOMETRIA DO GUME E DA
CLASSE DE PCBN NO CORTE ORTOGONAL DE
AÇO RÁPIDO FABRICADO POR METALURGIA DO PÓ**

Esta tese foi julgada adequada para a obtenção do título de Doutor em ENGENHARIA e aprovada em sua forma final pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica.

Florianópolis, 27 de Março de 2013.

Prof. Júlio César Passos, Dr.
Coordenador do POSMEC

Prof. Walter Lindolfo Weingaertner, Dr.-Ing.
Orientador

Prof. Rolf Bertrand Schroeter, Dr. Eng.
Coorientador

Prof. Cleiton Rodrigues Teixeira, Dr. Eng.
Coorientador

Banca Examinadora:

Prof. Álisson Rocha Machado, Ph.D.
(UFU-Relator)

Prof. Milton Luiz Polli, Dr.Eng.
(UTFPR)

Prof. Márcio Celso Fredel, Dr.-Ing. Prof. João Carlos Espíndola Ferreira, Ph.D.
(UFSC) (UFSC)

Prof. Lourival Boehs, Dr.Eng.
(UFSC)

AGRADECIMENTOS

Agradeço aos funcionários e laboratoristas da Universidade Federal de Santa Catarina - UFSC (LMP), da Universidade do Vale do Rio dos Sinos - UNISINOS (ittFUSE), da Universidade Federal do Rio Grande do Sul - UFRGS (Laboratórios CEM e LdSM), do SENAI-RS (CETEMP), a empresa Bleistahl Brasil Metalurgia S/A e a empresa SECO TOOLS; agradeço a todos que de uma ou outra forma contribuíram na realização deste trabalho. Em especial aos professores Walter, orientador, Rolf (UFSC) e Cleiton (FURG), coorientadores, pela oportunidade e confiança na minha capacidade, pelo profissionalismo como professores, pela troca de informações, incentivo e motivação para a realização deste trabalho. Também ao meu amigo André, Dr. Eng. (UFRGS) por acreditar na minha capacidade e me orientar nos primeiros momentos do meu trabalho; agradeço aos funcionários da empresa Bleistahl Brasil Metalurgia S. A., Sr. Sergio, Eng. Régis e Eng. Manfred. Também ao Eng. Fernando, da empresa Seco Tools; ao meu filho Glauber, estudante/bolsista de iniciação científica na área da engenharia da computação, pelo auxílio no desenvolvimento do programa para aquisição de dados na plataforma LabView.

Dedico o trabalho à minha mãe Ada In Memorium e à meu pai Ilson In Memorium, o qual me possibilitou a oportunidade de construir o conhecimento básico sobre usinagem nos vários anos que trabalhamos juntos em nossa oficina de manutenção.

Aos meus filhos, Claiton e Higor, pela paciência e por entender a minha falta nos momentos importantes de suas vidas durante o decorrer do trabalho e à minha esposa Eliane, pela paciência, colaboração e cumplicidade durante todos os anos dedicados ao meu trabalho.

RESUMO

Materiais fabricados pela metalurgia do pó utilizados em componentes automotivos, especificamente em assentos de válvulas de motores de combustão interna, exigem elevada resistência ao desgaste decorrido da submissão a esforços mecânicos em altas temperaturas e em meio químico agressivo. Para esta aplicação são empregadas ligas específicas de aço-rápido obtidas pela metalurgia do pó, e para sua usinagem de acabamento são necessárias ferramentas de alto desempenho, como as de nitreto de boro cúbico policristalino (PCBN). O objetivo principal deste trabalho é investigar a influência da microgeometria do gume e da classe de PCBN sobre o corte ortogonal de aço rápido fabricado pela metalurgia do pó temperado e revenido. Foram utilizados insertos de PCBN com microgeometria de gume chanfrado e arredondado (tipo S) e apenas arredondado (tipo E) de alto e baixo teor de CBN, na faixa de velocidades de corte entre 100 e 220 m/min. Para a realização da pesquisa foi preparada a infraestrutura para a condução de ensaios, projetando-se dispositivos e interfaces mecânicas para a fixação de corpos de prova e o sistema de medição de força na máquina ferramenta, de dispositivo de medição de desgaste no microscópio de ferramentaria, elaborou-se programas para aquisição de dados e respectiva documentação. Foram analisados o desgaste dos insertos de PCBN em que se procurou identificar os mecanismos de desgaste dominantes avaliando-se imagens digitais obtidas por microscópio eletrônico de varredura (MEV) das regiões do flanco e da face afetadas pelo desgaste, bem como através da análise química realizada por espectroscopia por dispersão em energia (EDS) de regiões de interesse nas marcas de desgaste dos insertos e aquisição das componentes força de corte (F_c) e força de avanço (F_f) através de plataforma piezométrica. Foram observados traços de material dos corpos de prova aderidos aos flancos de todos os insertos e, para todas as velocidades de corte utilizadas. Os desgastes predominantes observados foram os de adesão seguidos dos de arrancamento e em menor intensidade a abrasão. Foram verificados indícios de formação de desgaste de cratera para algumas situações. Os insertos de alto teor de CBN, de gume chanfrado e de gume arredondado, apresentaram lascamentos na face. A menor influência sobre o desgaste dos insertos, para ambas microgeometrias dos gumes foi verificada para a velocidade de corte de 100 m/min. Melhores resultados foram encontrados para o inserto com microgeometria de gume apenas arredondado (tipo E). Os maiores valores alcançados para a componente força de corte (F_c) e de avanço (F_f) foram para os insertos com microgeometria de gume chanfrado e arredondado (tipo S).

Palavras-chave: Microgeometria de gume. Mecanismos de desgaste da ferramenta. Ferramenta de PCBN. Aço rápido fabricado por metalurgia do pó. Torneamento longitudinal ortogonal.

ABSTRACT

Material manufactured by powder metallurgy used in automotive components, specifically valve seats of internal combustion engines require high wear resistance by being submitted to mechanical stresses at high temperatures and aggressive chemical environment. Specific alloy of high speed steel obtained by powder metallurgy are employed in this application, and tools of high performance, such as Polycrystalline Cubic Boron Nitride (PCBN), are required for finishing machining. The main objective is to investigate the influence of microgeometry of the edge and PCBN grade in orthogonal cutting of the quenched and tempered M2 high speed steel obtained by powder metallurgy. PCBN inserts were used with microgeometria chamfered edge and rounded (type S) and only rounded (type E) with high and low CBN content in the range of cutting speeds between 100 and 220 m/min. For the research, an infrastructure for conducting tests was prepared, by designing devices and mechanical interfaces for clamping specimens and force measurement system on the machine tool, device for measuring wear in the toolmaker microscope, programs for data acquisition and documentation were elaborated. We analyzed the wear of PCBN inserts which sought to identify the dominant wear mechanisms evaluating digital images obtained by Scanning Electron Microscope (SEM) of the flank regions of the face affected by wear, as well as by chemical analysis performed by Energy Dispersive Spectroscopy (EDS) of regions of interest in the marks of wear inserts. Were also performed acquisition of components cutting force (F_c) and thrust force (F_f) through piezoelectric platform. Were observed traces of materials of the specimens adhered in flank of all the inserts and for all cutting speed used. The predominant wear observed was adhesion followed by pullout and abrasion in lower intensity. It was found trace of formation of crater wear for some situations. The inserts of high CBN content, chamfered edge and rounded, presented chipping on the face. The smaller influence on the wear of the inserts for both edges microgeometry was verified for the cutting speed of 100 m/min. Better results were found for the inserts with edge microgeometry only rounded (E type). The highest values obtained for the components cutting force (F_c) and feed (F_f) were for inserts with edge microgeometry chamfered and rounded (S type).

Keywords: Edge microgeometry. Tool wear mechanisms. PCBN tools. High Speed Steel manufactured by powder metallurgy. Longitudinal orthogonal turning.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - (a) Representação esquemática de um motor de combustão interna, mostrando a localização do anel da válvula.	25
Figura 2 - Formas de processamento do aço rápido convencional e da metalurgia do pó.....	31
Figura 3 - Propriedades de materiais para ferramentas de corte.....	34
Figura 4 - Insertos: (a) integral de PCBN e (b) com camada de PCBN aplicada em substrato de metal duro.	36
Figura 5 - Obtenção de insertos com quina aplicada sobre substrato de metal-duro.	36
Figura 6 - (a) Quina e (b) camada de PCBN aplicada sobre substrato de metal duro e (c) integral de PCBN.	37
Figura 7 - (a) Revestimento em ferramentas de PCBN e (b) Inseto CBN050C revestido.	37
Figura 8 - Preparação do gume de ferramentas: (a) chanfrado, (b) chanfrado duplo (c) chanfrado com arredondamento (d) apenas arredondado (e) parabólico em forma de corneta (f) parabólico em forma de cascata e (g) arredondamento variado.	40
Figura 9 - Padronização de desgaste em ferramenta.	43
Figura 10 - Desgastes em ferramenta de PCBN.	44
Figura 11 - Desgaste em ferramenta de PCBN (imagem obtida em MEV).....	46
Figura 12 - Desgaste de flanco em inserto de PCBN (10X).....	46
Figura 13 - Inseto com chanfro de largura e ângulo variável.....	53
Figura 14 - Desgaste de flanco em diversas classes de PCBN.....	54
Figura 15 - Velocidades de corte ótimas para diversas classes de ferramentas de PCBN.....	55
Figura 16 - Representação dos fatores que influenciam o desempenho da usinagem no torneamento.....	58
Figura 17 - Fixação para torneamento de materiais endurecidos.	60
Figura 18 - Torneamento ortogonal radial do assento de um anel sincronizador.....	61
Figura 19 - Representação esquemática do torneamento longitudinal ortogonal.	62
Figura 20 - Componentes da força de usinagem no torneamento.	62
Figura 21 - Dependência das componentes da força de usinagem.	63
Figura 22 - Sistemática utilizada nos ensaios.....	68
Figura 23 - Sistema experimental para aquisição de F_c e F_f	69
Figura 24 - Representação esquemática da superfície de corte para o (a) torneamento ortogonal e (b) para o torneamento longitudinal.	70

Figura 25 - Representação esquemática do ensaio de torneamento ortogonal do anel (13 cortes de 0,4 mm).....	71
Figura 26 - (a) Torneamento ortogonal de um anel (b) 1º percurso de avanço e (c) 13º percurso de avanço (último).	71
Figura 27 - Representação esquemática da posição do desgaste de flanco e de cratera na ferramenta.	72
Figura 28 - Marca de desgaste de flanco limite (medição feita sobre uma imagem digital empregando o software CAD).	72
Figura 29 - Tela do computador para aquisição das componentes da força de usinagem F_c e F_f	73
Figura 30 - Torno CNC fabricante ROMI®, modelo Galaxy 20.	74
Figura 31 - Plataforma piezométrica tipo 9257A, marca Kistler®.	74
Figura 32 - Fixação da plataforma piezométrica na torre do torno CNC.	75
Figura 33 - (a) Castanha e (b) placa com as castanhas.....	76
Figura 34 - Dispositivo de fixação da pastilha para medição da marca de desgaste de flanco.	76
Figura 35 - Microscópio Eletrônico de Varredura (a) Hitachi (b) e ZEISS.....	77
Figura 36 - Ferramentas (a) gume S e (b) gume E (20X).....	78
Figura 37 - (a) Imagem de MEV para CBN10 e (b) CBN200.	78
Figura 38 - Corpo de prova e dimensões.....	79
Figura 39 - Estrutura da liga de aço rápido obtida em MEV.	80
Figura 40 - Perfil Térmico da liga em estudo durante a sinterização.	82
Figura 41 - Perfil térmico da liga em estudo durante o revenimento.	83
Figura 42 - Curvas de desgaste de flanco VB_B obtidas em pré-ensaio ..	84
Figura 43 - Comportamento de desgaste VB_B x Cortes e (b) comportamento da v_c x nº de cortes para insertos com baixo teor de CBN, gume chanfrado e arredondado (CBN10S).....	88
Figura 44 - Desgaste de Flanco (a, c, e, g) e ampliação do desgaste (b, d, f, h) - CBN10S	90
Figura 45 - Valores capturados da F_c e F_f a cada 260 cortes - CBN10S - v_c 100 m/min.	91
Figura 46 - Flanco do inserto CBN10S (a) corte 260 e (b) corte 1820 - v_c 100 m/min (Ampliação 20X).	91
Figura 47 - (a) Face do inserto CBN10S - corte 1820 - v_c 100 m/min (Ampliação 20X) e (b) detalhe da adesão metálica (MEV).	92
Figura 48 - Valores capturados da F_c e F_f a cada 260 cortes - CBN10S - v_c 140 m/min.	92
Figura 49 - Flanco do inserto CBN10S (a) corte 260 e (b) corte 1820 - v_c 140 m/min (Ampliação 20X).	92
Figura 50 - Face do inserto CBN10S - corte 1820 - v_c 140 m/min	

(Ampliação 20X).....	93
Figura 51 - Valores capturados da F_c e F_f a cada 260 cortes - CBN10S - v_c 180 m/min.	93
Figura 52 - Flanco do inserto CBN10S (a) corte 260 e (b) corte 2080 - v_c 180 m/min (Ampliação 20X)	93
Figura 53 - Face do inserto após 2080 cortes - v_c 180 m/min (Ampliação 20X).....	94
Figura 54 - Valores capturados da F_c e F_f a cada 260 cortes - CBN10S - v_c 220 m/min.	94
Figura 55 - Flanco do inserto CBN10S (a) corte 260 e (b) corte 2080 - v_c 220 m/min (Ampliação 20X)	95
Figura 56 - Face do inserto CBN10S - corte 2080 - v_c 220 m/min (Ampliação 20X).....	95
Figura 57 - (a) Comportamento de desgaste VB_B x Cortes e (b) comportamento da v_c x n° de cortes para insertos com baixo teor de CBN, gume apenas arredondados CBN10E.....	96
Figura 58 - Desgaste de flanco (a, c, e, g) e ampliação do desgaste (b, d, f, h) - CBN10E.	97
Figura 59 - Valores capturados da F_c e F_f a cada 260 cortes - CBN10E - v_c 100 m/min.	98
Figura 60 - Flanco do inserto CBN10E (a) corte 260 e (b) corte 2340 - v_c 100 m/min (Ampliação 20X).	98
Figura 61 - Face do inserto CBN10E - corte 2340 - v_c 100 m/min (Ampliação 20X).....	99
Figura 62 - Valores capturados da F_c e F_f a cada 260 cortes - CBN10E - v_c 140 m/min.	99
Figura 63 - Flanco do inserto CBN10E (a) corte 260 e (b) corte 1820 - v_c 140 m/min (Ampliação 20X).	100
Figura 64 - Face do inserto CBN10E - corte 1820 - v_c 140 m/min (Ampliação 20X).....	100
Figura 65 - Valores capturados da F_c e F_f a cada 260 cortes - CBN10E - v_c 180 m/min.....	100
Figura 66 - Flanco do inserto CBN10E (a) corte 260 e (b) corte 2600 - v_c 180 m/min (Ampliação 20X).	101
Figura 67 - Face do inserto CBN10E - corte 2600 - v_c 180 m/min (Ampliação 20X).....	101
Figura 68 - Valores capturados da F_c e F_f a cada 260 cortes - CBN10E - v_c 220 m/min.....	101
Figura 69 - Flanco do inserto CBN10E (a) corte 260 e (b) corte 2080 - v_c 220 m/min (Ampliação 20X).	102
Figura 70 - Face do inserto CBN10E - corte 2080 - v_c 220 m/min	

(Ampliação 20X).....	102
Figura 71 - (a) Comportamento de desgaste VB_B x Cortes e (b) comportamento da v_c x nº de cortes para insertos com baixo teor de CBN, gume apenas arredondados - CBN200S.....	104
Figura 72 - Desgaste de flanco (a, c, e, g) e ampliação do desgaste (b, d, f, h) - CBN200S.	105
Figura 73 - Valores capturados da F_c e F_f a cada 260 cortes - CBN200S - v_c 100 m/min.....	107
Figura 74 - Flanco do inserto CBN200S após (a) 260 cortes e (b) 4680 cortes - v_c 100 m/min (Ampliação 20X).	107
Figura 75 - Face do inserto após 4680 cortes - v_c 100 m/min (MEV)..	107
Figura 76 - Valores capturados da F_c e F_f a cada 260 cortes - CBN200S - v_c 140 m/min.	108
Figura 77 - Flanco do inserto CBN200S (a) corte 260 e (b) corte 2730 - v_c 140 m/min (Ampliação 20X).	108
Figura 78 - Face do inserto CBN200S - corte 2730 - v_c 140 m/min (MEV).	108
Figura 79 - Valores capturados da F_c e F_f a cada 260 cortes - CBN200S - v_c 180 m/min.	109
Figura 80 - Flanco do inserto CBN200S (a) corte 260 e (b) corte 1950 - v_c 180 m/min (Ampliação 20X).	109
Figura 81 - Face do inserto CBN10S - corte 1950 - v_c 180 m/min (MEV).	110
Figura 82 - Valores capturados da F_c e F_f a cada 260 cortes - CBN200S - v_c 220 m/min.	110
Figura 83 - Flanco do inserto CBN200S (a) corte 260 e (b) corte 1820 - v_c 220 m/min (Ampliação 20X).	111
Figura 84 - Face do inserto CBN200S - corte 1820 - v_c 220 m/min (MEV).	111
Figura 85 - (a) Comportamento de desgaste VB_B x Cortes e (b) comportamento da v_c x nº de cortes para insertos com baixo teor de CBN, gume apenas arredondados CBN200E.....	112
Figura 86 – Desgaste de flanco (a, c, e, g) e ampliação do desgaste (b, d, f, h) - CBN200E.	113
Figura 87 - Exemplo de análise por EDS realizada sobre uma aderência no flanco no inserto CBN200E (v_c 220 m/min).	114
Figura 88 - Valores capturados da F_c e F_f a cada 260 cortes - CBN200E - v_c 100 m/min.	115
Figura 89 - Flanco do inserto CBN200E (a) corte 260 e (b) corte 6630 - v_c 100 m/min (Ampliação 20X).	115
Figura 90 - Face do inserto CBN200E - corte 6630 - v_c 100 m/min	

(Ampliação 20X).....	116
Figura 91 - Valores capturados da F_c e F_f a cada 260 cortes – CBN200E - v_c 140 m/min.....	116
Figura 92 - Flanco do inserto CBN200E (a) corte 260 e (b) corte 4680 - v_c 140 m/min (Ampliação 20X).	116
Figura 93 - Face do inserto CBN200E - corte 4680 (Ampliação 20X).117	
Figura 94 - Valores capturados da F_c e F_f a cada 260 cortes - CBN200E - v_c 180 m/min.....	117
Figura 95 - Flanco do inserto CBN200E (a) corte 260 e (b) corte 3380 - v_c 180 m/min (Ampliação 20X).	117
Figura 96 - Face do inserto CBN200E - corte 3380 - v_c 180 m/min (Ampliação 20X).....	118
Figura 97 - Valores capturados da F_c e F_f a cada 260 cortes – CBN200E - v_c 220 m/min.....	118
Figura 98 - Flanco do inserto CBN200E (a) corte 260 e (b) corte 2600 - v_c 220 m/min (Ampliação 20X).	119
Figura 99 - Face do inserto CBN200E - corte 2600 - v_c 220 m/min (Ampliação 20X).....	119
Figura 100 – Número de cortes para insertos de PCBN até atingir a marca de desgaste VB_B de 0,1mm ou ocorrência de lascamentos para a faixa de velocidade de corte entre 100 e 220 m/min.	120
Figura 101 - Força de corte F_c e força de avanço F_f no torneamento ortogonal no corte 260 (20° anel).	121
Figura 102 - Força de corte F_c e força de avanço F_f no torneamento ortogonal (últimas leituras).	122
Figura 103 - Numero de cortes x velocidade de corte.	123
Figura 104 - Caracterização da F_c e F_f - v_c 100 m/min- CBN10S.....	139
Figura 105 - Caracterização da F_c e F_f - v_c 140 m/min - CBN10S.....	139
Figura 106 - Caracterização da F_c e F_f - v_c 180 m/min - CBN10S.....	140
Figura 107 - Caracterização da F_c e F_f - v_c 220 m/min - CBN10S.....	140
Figura 108 - Caracterização da F_c e F_f - v_c 100 m/min - CBN10E.....	141
Figura 109 - Caracterização da F_c e F_f - v_c 140 m/min - CBN10E.....	141
Figura 110 - Caracterização da F_c e F_f - v_c 180 m/min - CBN10E.....	142
Figura 111 - Caracterização da F_c e F_f - v_c 220 m/min - CBN10E.....	142
Figura 112 - Caracterização da F_c e F_f - v_c 100 m/min- CBN200S.....	143
Figura 113 - Caracterização da F_c e F_f - v_c 140 m/min - CBN200S	143
Figura 114 - Caracterização da F_c e F_f - v_c 180 m/min- CBN200S.....	144
Figura 115 - Caracterização da F_c e F_f - v_c 220 m/min - CBN200S	144
Figura 116 - Caracterização da F_c e F_f - v_c 100 m/min- CBN200E.....	145
Figura 117 - Caracterização da F_c e F_f - v_c 140 m/min - CBN200E....	145
Figura 118 - Caracterização da F_c e F_f - v_c 180 m/min - CBN200E....	146

Figura 119 - Caracterização da F_c e F_f - v_c 220 m/min - CBN200E.....146

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Descrição do sistema experimental de aquisição (F_c e F_f). ..	69
Tabela 2 - Tempos obtidos relacionado a usinagem de um anel.	73
Tabela 3 - Propriedades do material das ferramentas de PCBN.....	79
Tabela 4 - Especificação e características da liga do corpo de prova e pó M2.	81
Tabela 5 - Número de cortes realizados com insertos CBN10.....	87
Tabela 6 - Número de cortes realizados com insertos CBN200.....	103

LISTA DE ABREVIATURAS, SIGLAS E FÓRMULAS QUÍMICAS

AFNOR	<i>Association Française de Normalization</i>
AISI	<i>American Iron and Steel Institute</i>
AlN	Nitreto de alumínio
Al ₂ O ₃	Óxido de alumínio
ASME	<i>American Society of Mechanical Engineers</i>
CBN	Nitreto de boro cúbico
CEM	Centro de Microscopia Eletrônica
Cermet	Material composto de ferramenta de corte (cerâmica + metal)
CETEMP	Centro Tecnológico de Mecânica de Precisão
CNC	Comando Numérico Computadorizado
EDS	<i>Energy Dispersive Spectrometry</i>
FURG	Fundação Universidade de Rio Grande
hBN	Nitreto de boro hexagonal
HIP	<i>Hot Isostatic Pressing</i>
ISO	<i>International Organization for Standardization</i>
IttFUSE	Instituto Tecnológico em Ensaios e Segurança Funcional
LdSM	Laboratório de Design e Seleção de Materiais
LMP	Laboratório de Mecânica de Precisão
M2	Marca de aço rápido AISI/SAE (equivalente a VWM2 da Villares, S600 da Böhler).
MEV	Microscópio Eletrônico de Varredura
MoS ₂	Bissulfeto de Molibdênio
NDT	Núcleo de Desenvolvimento Tecnológico
PCBN	Nitreto de boro cúbico policristalino
PCD	Diamante policristalino
SENAI	Serviço Nacional de Aprendizagem Industrial
Si ₃ N ₄	Nitreto de silício
SiC	Carboneto de silício
TiC	Carboneto de titânio
TiN	Nitreto de titânio
TNGN	Codificação de inserto de torneamento
UFRGS	Universidade Federal do Rio Grande do Sul
UFSC	Universidade Federal de Santa Catarina
UNISINOS	Universidade do Vale do Rio dos Sinos
ZrO ₂	Óxido de zircônio

LISTA DE SÍMBOLOS

Símbolo	Descrição	Unidade
BW	Desgaste do fim da cratera	μm
C	Celsius	$^{\circ}\text{C}$
HB	Dureza Brinell	HB
F_c	Força de corte	N
F_f	Força de avanço	N
F_p	Força passiva	N
F	Força de usinagem	N
HRC	Dureza Rockwell C	HRC
HV	Dureza Vickers	HV
K	Kelvin	adm.
K_M	Distância do centro da cratera ao gume	μm
K_T	Profundidade de cratera	μm
SW	Largura de início da cratera	μm
VB_B	Largura média da marca de desgaste de flanco	mm
VB_C	Largura da marca do desgaste de entalhe no flanco secundário	mm
VB_{\max}	Largura máxima da marca de desgaste de flanco	mm
VB_N	Largura da marca do desgaste de entalhe no flanco principal	mm
W	Comprimento do chanfro	mm
a_p	Profundidade de corte	mm
f	Avanço	mm
r_{ε}	Raio de quina da ferramenta	mm
r_{β}	Raio de arredondamento do gume	mm
v_c	Velocidade de corte	m/min
α	Ângulo de incidência	$^{\circ}$
χ_t	Ângulo de direção do gume	$^{\circ}$
γ	Ângulo de saída	$^{\circ}$
λ	Ângulo de inclinação	$^{\circ}$

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO.....	25
1.1 OBJETIVOS	27
1.2 ESTRUTURA DA TESE.....	28
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	29
2.1 METALURGIA DO PÓ.....	30
2.2 TRATAMENTO TÉRMICO E DUREZA APARENTE EM AÇO RÁPIDO FABRICADO POR METALURGIA DO PÓ.....	32
2.2.1 Endurecimento no Processo de Sinterização (<i>sinter-hardening</i>)	32
2.2.2 Endurecimento Secundário.....	32
2.2.3 Dureza Aparente.....	33
2.3 FERRAMENTAS DE CORTE DE PCBN	33
2.3.1 Generalidades.....	33
2.3.2 Ferramenta de PCBN.....	34
2.3.3 Composição do material da ferramenta	35
2.3.4 Obtenção da ferramenta	35
2.3.5 Revestimentos em ferramentas.....	37
2.3.6 Aplicações de ferramentas de geometria definida de PCBN..	38
2.3.7 Microgeometria do gume	39
2.4 DESGASTES E MECANISMOS DE DESGASTE DAS FERRAMENTAS DE CORTE	42
2.4.1 Desgaste em ferramentas de corte.....	42
2.4.2 Desgaste em ferramentas de PCBN.....	44
2.4.3 Mecanismos de desgaste em ferramentas de PCBN	46
2.4.4 Ferramentas com baixo teor de CBN.....	49
2.4.5 Ferramentas com alto teor de CBN.....	50
2.5 INFLUÊNCIAS NA VIDA DA FERRAMENTA DE PCBN	51
2.5.1 Influência da microgeometria do gume na vida da ferramenta de PCBN.....	51
2.5.2 Influência da microgeometria do gume nas componentes da força de usinagem.....	52
2.5.3 Influência da velocidade de corte na vida da ferramenta de PCBN.....	53
2.5.4 Influência da dureza da peça na vida da ferramenta PCBN	56
2.6 TORNEAMENTO DE AÇOS TEMPERADOS E REVENIDOS..	56
2.6.1 Exatidão da máquina-ferramenta	59
2.6.2 Torneamento longitudinal ortogonal	60
2.7 FORÇA DE USINAGEM.....	62
2.7.1 Influências dos parâmetros de corte e geometria da	

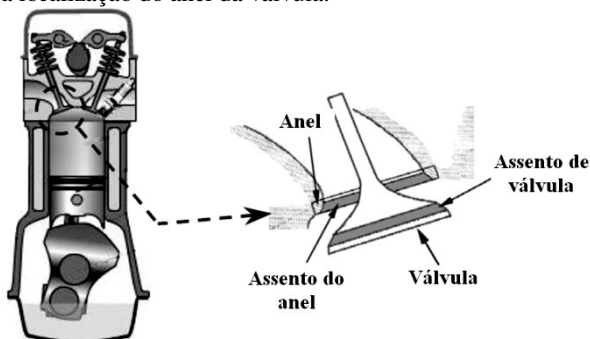
ferramenta sobre as componentes da força de usinagem	63
2.8 CONSIDERAÇÕES FINAIS SOBRE O ESTADO DA ARTE.....	65
3 METODOLOGIA, EQUIPAMENTOS E MATERIAIS.....	67
3.1 METODOLOGIA.....	67
3.1.1 Sistemática dos ensaios	68
3.1.2 Bancada de ensaios.....	68
3.1.3 Estratégia dos ensaios	69
3.1.4 Medição do desgaste de flanco.....	71
3.1.5 Aquisição da F_c e F_f.....	73
3.2 EQUIPAMENTOS	74
3.3 FERRAMENTAS DE CORTE E MATERIAIS DOS CORPOS DE PROVA.....	77
3.3.1 Suporte e insertos	77
3.3.2 Corpos de prova.....	79
3.3.3 Parâmetros de corte	83
3.3.4 Ensaio com ferramenta de Cermet	84
4 RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	87
4.1 ENSAIOS COM INSERTOS DE BAIXO TEOR DE CBN COM GUME CHANFRADO E ARREDONDADO (S) E GUME APENAS ARREDONDADO (E).....	87
4.1.1 Ensaio com insertos de baixo teor de CBN e gume chanfrado e arredondado (CBN10S)	88
4.1.2 Ensaio com insertos de baixo teor de CBN com gume apenas arredondamento (E) (CBN10E).....	95
4.2 ENSAIOS COM INSERTOS DE ALTO TEOR DE CBN COM GUME CHANFRADO E ARREDONDADO (S) E GUME APENAS ARREDONDADO (E).....	103
4.2.1 Ensaio com insertos de alto teor de CBN com gume chanfrado e arredondado (CBN200S).....	103
4.2.2 Ensaio com insertos de alto teor de CBN com gume apenas arredondado (CBN200E).....	111
4.3 INFLUÊNCIA DA VARIAÇÃO DA VELOCIDADE DE CORTE SOBRE O NÚMERO CORTES E SOBRE AS FORÇAS F_c E F_f	119
5 CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA FUTUROS TRABALHOS	125
5.1 PROPOSTA PARA TRABALHOS FUTUROS	126
REFERÊNCIAS.....	129
APÊNDICES.....	139

1 INTRODUÇÃO

Pesquisas arqueológicas mostram que o homem já produzia armas, lanças e ferramentas a partir de aglomerados de ferro, há cerca de 6000 anos a.C. Somente no século XIX foram dados os primeiros passos para o desenvolvimento da moderna metalurgia do pó (MORO e AURAS, 2007). No início do século XX foram desenvolvidos processos para fabricação de peças de tungstênio e molibdênio através da metalurgia do pó; entretanto a produção só se expandiu após a Segunda Guerra Mundial para atender à demanda inicial da indústria automobilística. Hoje as aplicações industriais de peças fabricadas através da metalurgia do pó são abundantes. Comparada à metalurgia por fundição, esta tecnologia tornou-se competitiva por razões tecnológicas e econômicas.

Dentre as peças fabricadas pelo processo da metalurgia do pó, tem-se o inserto (anel) para assento de válvula para motores de combustão interna, Figura 1. Um dos requisitos imprescindíveis para este anel é a alta resistência ao desgaste em condições de altas temperaturas e meio químico agressivo, caracterizando uma situação em que existe sollicitação mecânica, desgaste mecânico, corrosão e erosão, atuando simultaneamente e em altas temperaturas (SALGADO *et al.* 2001).

Figura 1 - (a) Representação esquemática de um motor de combustão interna, mostrando a localização do anel da válvula.



Fonte: Adaptado de JESUS (2006).

As exigências de qualidade dimensional, da qualidade de superfícies ou de geometrias complexas que não podem ser obtidas diretamente pelo processo da metalurgia do pó, fazem com que haja a

necessidade de que estas peças sejam concluídas por usinagem após esse processo de fabricação. Atualmente, para o acabamento dessas peças, são normalmente usados os processos de retificação.

Torneamento em mergulho, que é uma forma altamente produtiva vem sendo utilizado no torneamento de materiais endurecidos. Neste processo se utiliza a totalidade ou parte do gume principal para criar um corte ortogonal (HUDDLE, 2002). O corte ortogonal também é adotado no processo de fresamento. O conceito de torneamento de mergulho aplicado na usinagem de materiais endurecidos não é uma ideia nova. Segundo Huddle (2002), com utilização desta técnica, pode-se reduzir o tempo de usinagem em até 90%, produzindo-se peças com integridade de superfície comparável à obtida pela retificação.

Para este procedimento de usinagem de materiais endurecidos se utilizam ferramentas de nitreto de boro cúbico policristalino (PCBN) devido a estas possuírem estabilidade química, resistência a impactos e resistência a choques térmicos, preenchendo desta forma requisitos importantes da engenharia de fabricação para aplicação em operações de usinagem com elevadas velocidades de corte e taxas de remoção (TÖNSHOFF *et al.*, 2000; SCHNEIDER, 2002).

O torneamento do aço rápido obtido por metalurgia do pó, endurecido, com composições químicas variadas, exige a utilização de ferramentas com características de alta dureza e resistência a quente, características encontradas em ferramentas de PCBN.

Ferramentas de PCBN são fabricadas com diferentes teores de CBN (alto e baixo teor), sendo as de alto teor contendo aproximadamente de 80 a 95% de CBN com ligante metálico e as de baixo teor de CBN podendo conter de 40 a 70% de CBN, sendo a maioria com matriz ligante a base de cerâmica (KÖNIG *et al.*, 1984; TONSHOFF *et al.*, 2000; LAHIFF *et al.*, 2007). Quanto a geometrias de gume tem-se chanfrado, chanfrado duplo, chanfrado com arredondamento, apenas arredondado, parabólico em forma de corneta, parabólico em forma de cascata e arredondamento variado (KARPAT e ÖZEL, 2007). Velocidades de corte empregadas em materiais fabricados por metalurgia do pó, temperados e revenidos, estão na faixa de 180 m/min (SECO TOOLS, 2005).

Ferramentas de alto teor de CBN são mais duras com condutividade térmica maior. Já as ferramentas de baixo teor possuem condutividade menor e menor dureza.

Com relação à microgeometria de gume, essas tendem a influenciar nos valores das componentes da força de usinagem (força de corte, força de avanço e força passiva).

Para as velocidades de corte, o seu aumento, na grande maioria, proporciona maior desgaste nas ferramentas pela elevação da temperatura na região de corte.

Na literatura se encontram poucas informações relacionadas à usinagem de aço rápido fabricado por metalurgia do pó, temperado e revenido, empregando-se ferramentas de PCBN. Este fato motivou o estudo do processo de torneamento ortogonal desse material empregando ferramentas de PCBN.

O foco do estudo foi para a liga de aço rápido M2 modificado, fabricado por metalurgia do pó, temperado e revenido, utilizada na fabricação de anéis assentos de válvula de admissão (detalhe na Fig. 1b) para motores a gasolina, álcool e FLEX (gasolina e álcool).

Levando-se em conta que os estudos relacionados à usinagem de materiais endurecidos com ferramentas de PCBN realizados nas últimas décadas trazerem poucas informações com relação à usinagem de aço rápido obtido por metalurgia do pó, temperado e revenido, e em especial à liga em estudo, verificou-se a necessidade de ampliar os conhecimentos através de um estudo planejado, analisando a influência de variáveis de entrada do processo sobre as características e sobre os resultados de trabalho, no que se refere ao comportamento de desgaste de insertos de PCBN, em torneamento longitudinal ortogonal com corte contínuo a seco.

A proposta deste trabalho é investigar a influência de duas microgeometrias do gume, bem como a variação do teor de CBN de insertos de PCBN pela variação da velocidade de corte no torneamento longitudinal ortogonal de perfil do aço rápido M2, temperado e revenido, obtido por metalurgia do pó.

Este trabalho foi desenvolvido no Centro Tecnológico de Mecânica de Precisão (CETEMP-SENAI) e contou com o apoio da Universidade do Vale do Rio dos Sinos (UNISINOS), da Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC), da Fundação Universidade de Rio Grande (FURG), da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), bem como com a empresa Bleistahl Brasil Metalurgia S/A, fabricante de peças automotivas em aço rápido por metalurgia do pó e empresa Seco Tools[®], fabricante de ferramentas de corte em PCBN.

1.1 OBJETIVOS

Esta pesquisa tem como objetivo geral investigar a influência de duas microgeometrias de gume em insertos de PCBN, a influência do teor de CBN e da variação da velocidade de corte, no desgaste e na

componente força de avanço (F_f) e força de corte (F_c) na usinagem de aço rápido M2 com composição química modificada, obtido por metalurgia do pó, temperado e revenido, em operação de torneamento longitudinal ortogonal.

Para atingir o objetivo geral, os seguintes objetivos específicos são propostos:

- elucidar as consequências da variação da microgeometria do gume (chanfrado com arredondamento e apenas arredondado) sobre o desgaste de flanco das ferramentas PCBN;
- investigar o comportamento de desgaste para a variação da composição de CBN (alto e baixo teor de CBN);
- investigar o comportamento de desgaste para variação da velocidade de corte;
- investigar as influências da microgeometria do gume (chanfrado com arredondamento e apenas arredondado) e da velocidade de corte, nas componentes da força de usinagem (força de corte F_c e força de avanço F_f).

1.2 ESTRUTURA DA TESE

O documento escrito foi organizado em cinco capítulos. O primeiro traz a introdução do trabalho. O segundo engloba uma revisão do estado da arte sobre a metalurgia do pó, insertos de PCBN, teor de CBN, desgastes e mecanismos de desgaste em ferramentas de PCBN, torneamento de aços endurecidos, força de usinagem, tratamento térmico e dureza aparente em aço rápido obtido por metalurgia do pó. No terceiro capítulo são apresentados a metodologia, os equipamentos e os materiais utilizados. O quarto apresenta os resultados obtidos nos ensaios referentes à influência da geometria, do teor de CBN, da velocidade de corte e argumentações sobre os resultados. No quinto são apresentadas as conclusões e sugestões para futuros trabalhos.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A utilização de aço rápido produzido por metalurgia do pó na fabricação de peças, devido às suas propriedades mecânicas e químicas, torna-o interessante para aplicações onde anteriormente não compensava a sua aplicação. As características do aço rápido permitem que o mesmo seja utilizado em aplicações que necessitem alta resistência ao desgaste em altas temperaturas, em meio químico agressivo, sob solicitação mecânica, desgaste mecânico, corrosão e erosão (SALGADO *et al.*, 2001).

Em comparação à usinagem de aços carbono, as grandezas de entrada relacionadas à usinagem do aço rápido produzido por metalurgia do pó temperado e revenido são diferenciadas principalmente quanto ao tipo material da ferramenta de corte. Na sua usinagem são utilizadas ferramentas de alto desempenho. Além disto, a usinagem de materiais endurecidos exige o emprego de uma máquina-ferramenta de elevada rigidez, sem folgas nas guias e nos sistemas de avanço longitudinal e transversal. As ferramentas de alto desempenho são caras e exigem uma melhora contínua do processo para tornar o processo competitivo com outros processos de fabricação. Uma estratégia para verificar o desempenho de uma ferramenta é identificar qual a microgeometria de gume mais propícia, teor de CBN e velocidade de corte. Para a usinagem de aços temperados e revenidos, ferramentas com microgeometria de gume chanfrado mostram melhores desempenhos (DOGRA *et al.*, 2010). Já para a usinagem de ligas de aço rápido, obtidas por metalurgia do pó temperado e revenido, poucas informações são encontradas relacionadas ao impacto da microgeometria do gume no seu desempenho, tanto para gume chanfrado com arredondamento, como para gume apenas arredondado.

Entre as modificações propostas pelos fabricantes de ferramentas de PCBN encontram-se microgeometrias alteradas com chanfros e gumes apenas arredondados. O efeito dessas modificações na microgeometria do gume não é compreendido quanto sua aplicação na usinagem da liga em estudo.

Este capítulo aborda assuntos relacionados à metalurgia do pó, generalidades sobre ferramentas de PCBN quanto à composição, obtenção, revestimento e aplicações. São também descritos os tipos de desgaste em insertos de PCBN, ferramentas de baixo e alto teor de CBN, influência da microgeometria do gume na vida da ferramenta em função da velocidade de corte e da dureza da peça, pré-requisitos para o torneamento de materiais endurecidos, características da usinagem em

mergulho, tratamento térmico e dureza aparente em aço rápido obtido por metalurgia do pó. Ao final são colocadas as considerações finais sobre o estado da arte.

2.1 METALURGIA DO PÓ

Metalurgia do pó é a técnica de produção de peças metálicas a partir de pós de metais e suas ligas. Os pós, de diversos tipos, depois de convenientemente misturados, são submetidos a uma operação de compactação, utilizando-se matrizes com a forma e dimensões definitivas ou quase definitivas (*near net shape*), de acordo com o desenho da peça a ser fabricada (JESUS, 2006).

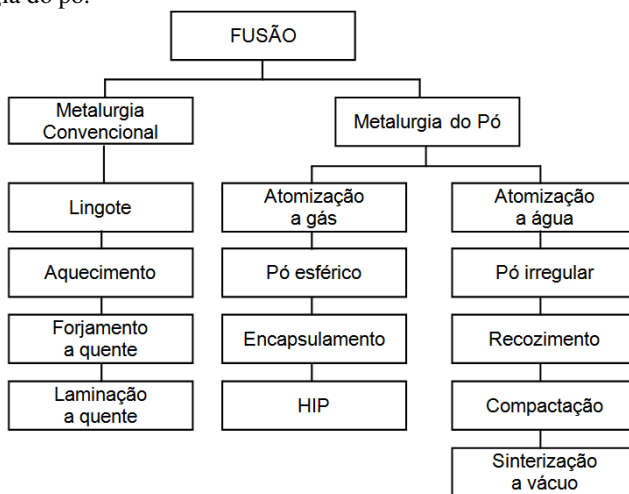
A partir dos anos 70, século passado, componentes produzidos por metalurgia do pó aumentaram seu desempenho, devido a um melhor controle da micro-estrutura, homogeneidade da composição e materiais com propriedades mecânicas em níveis iguais ou frequentemente melhores do que aos produtos obtidos por fundição ou conformação mecânica. No período entre a década de 1960 e 1970, peças de automóveis começaram a ser produzidas por esta tecnologia; na década de 1980 passou a se produzir componentes de turbinas de aeronaves e na década de 1990, peças feitas por forjamento de pós, moldagem por injeção e compactação a quente ampliaram os processos associados à metalurgia do pó (GERMAN, 1984; JANG, 2000).

O processo de metalurgia do pó é considerado um processo de conservação de energia, pois mais de 94% da matéria-prima inicial permanece na peça, levando grande vantagem neste sentido, com relação a outros processos (THÜMMLER, 1993; ZAPATA, 1987). Produtos produzidos por metalurgia do pó com mistura adequada de pós e sinterização com transformações na fase sólida, permitem um alto grau de uniformidade do material com homogeneidade de micro-estrutura, apresentando melhores propriedades mecânicas do componente fabricado.

A metalurgia do pó se distingue dos processos metalúrgicos convencionais pelas seguintes características (CHIAVERINI, 2001): utilização de pós-metálicos e não-metálicos como matéria-prima; ausência da fase líquida ou presença apenas parcial de fase líquida durante o processo de fabricação; produção de peças com formas definitivas ou quase definitivas dentro de tolerâncias estreitas; geralmente não necessitam necessidade de operações de usinagem posteriores ou de qualquer outro tipo de acabamento; produção de componentes com características estruturais e físicas impossíveis de se

obter por qualquer outro processo metalúrgico; obtenção de peças em grandes séries, tornando o processo altamente competitivo em relação aos processos convencionais. Segundo IGHARO (1990), aços-rápidos produzidos por metalurgia do pó seguem as mesmas etapas de fabricação, com aplicação na produção de peças que necessitem resistência ao desgaste abrasivo em altas temperaturas, ferramentas de corte de formas complexas, além de peças e matrizes para trabalho a frio. As formas de obtenção de aço rápido pelo processo convencional e por metalurgia do pó podem ser verificadas na Figura 2.

Figura 2 - Formas de processamento do aço rápido convencional e da metalurgia do pó.



Fonte: Adaptado de ASM Metals Handbook (1991)

O aço rápido sinterizado obtido pelo processo de metalurgia do pó permite um melhor controle do tamanho dos grãos, bem como a adição controlada e bem distribuída de elementos de liga, resultando numa estrutura uniforme e fina em toda a seção transversal do material. Segundo Stemmer (2001), o aço rápido obtido por metalurgia do pó apresenta as seguintes vantagens:

- Microestruturas mais finas e homogêneas com carbonetos uniformemente distribuídos em toda a matriz, melhor ajuste da composição e melhores ligas;
- Menor deformação durante a têmpera e o revenimento;
- Tempos de austenitização mais curtos;
- Menor tendência de ocorrer formação de trincas e tensões

internas;

- Melhores condições de aderência de revestimentos de TiN;
- Melhora da tenacidade e da resistência ao desgaste;
- Maior vida para ferramentas.

2.2 TRATAMENTO TÉRMICO E DUREZA APARENTE EM AÇO RÁPIDO FABRICADO POR METALURGIA DO PÓ.

2.2.1 Endurecimento no Processo de Sinterização (*sinter-hardening*)

O endurecimento realizado no processo de sinterização (*sinter-hardening*) é um método alternativo para peças utilizado na metalurgia do pó, sem a utilização da tradicional austenitização, têmpera em óleo e ciclos de têmpera. Esse endurecimento acontece porque a velocidade de resfriamento na zona de arrefecimento do forno de sinterização é suficientemente rápida para que a matriz de aço seja transformada em martensita (BARAN, 2013). Esse processo tem várias vantagens, incluindo redução do número de etapas de processamento e evitar a contaminação da peça com óleo (MARUCCI, 2004). Além dessas vantagens tem-se, segundo Haberberger (2013), custos menores de processamento, tempo de produção reduzidos e estabilidade dimensional superior. A melhor estabilidade dimensional reduz distorções, melhora concentricidade e melhora tolerâncias geométricas.

2.2.2 Endurecimento Secundário

Endurecimento secundário consiste no aumento da dureza durante o processo de revenimento. Esse aumento na dureza é proporcionado pela precipitação de carbonetos na matriz (Tungstênio e Vanádio) em quantidades suficientes para retardar o amolecimento e formar carbonetos finos, formados com os elementos da liga e a transformação da austenita retida em martensita, produzindo assim um acréscimo na dureza em temperaturas de revenimento mais altas. Essas temperaturas de revenimento são superiores a 500 °C.

O processo padrão de endurecimento secundário consiste na compactação do componente por metalurgia do pó, a sinterização, um ciclo de recozimento, têmpera e dois ou mais ciclos de revenimento. Segundo Marucci (2004), cada uma destas fases deve ser otimizada para garantir a produção consistente de peças com endurecimento secundário. Uma variedade de microestruturas e propriedades pode ser obtida através da variação da taxa de resfriamento após a sinterização. Ao

controlar esta taxa, a microestrutura pode ser manipulada para produzir a quantidade requerida de martensita para se obter as propriedades mecânicas desejadas (RUTZ, 1997).

2.2.3 Dureza Aparente

A dureza aparente é verificada em componentes obtidos por metalurgia do pó que apresentem uma porosidade residual. Os valores de macrodureza determinados pelos métodos convencionais Brinell, Rockwell ou Vickers para peças obtidas por metalurgia do pó são geralmente menores do que aqueles de materiais inteiramente sólidos, com a mesma composição e condição metalúrgica porque o penetrador encontrará menor resistência à penetração. A presença aleatória dos poros faz com que a diferença entre os valores mínimo e máximo da dureza seja muito maior do que aqueles obtidos no material inteiramente sólido (FIGUEIRA, 2013). Os valores de dureza aparente de peças obtidas por metalurgia do pó nunca devem ser convertidos de uma escala para outra e muitas vezes os valores de dureza aparente podem ser diferentes em diversos pontos da peça. Segundo Iervolino (2013) e Figueira (2013), valores mais baixos da dureza aparente em peças obtidas por metalurgia do pó não significam que as propriedades funcionais do material obtido por metalurgia do pó sejam sempre afetadas negativamente.

2.3 FERRAMENTAS DE CORTE DE PCBN

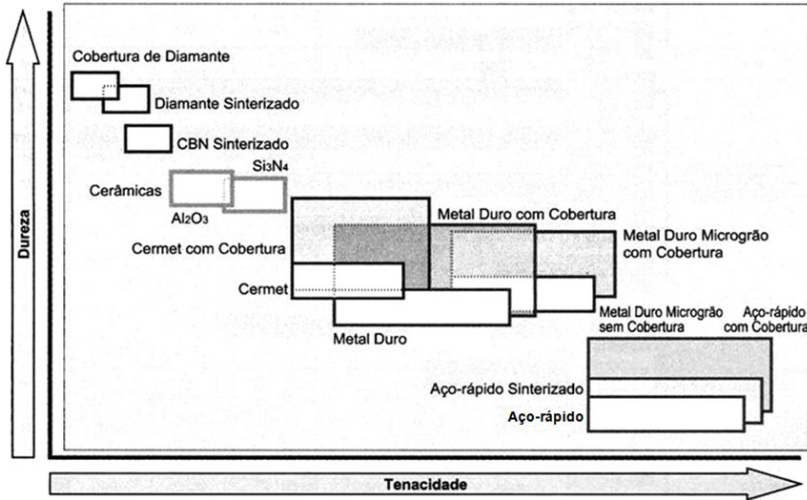
2.3.1 Generalidades

A utilização de ferramentas de PCBN requer máquinas-ferramentas que possam potencializar sua utilização. Elas precisam ter mais rigidez e ausência de folgas. Uma vez superadas estas lacunas novos horizontes são abertos no setor produtivo para uso de materiais de ferramentas como cerâmica, diamantes e PCBN.

Quanto às propriedades desejadas para uma ferramenta de corte tem-se: resistência à compressão, dureza, flexão e tenacidade, resistência do gume, resistência interna de ligação, resistência mecânica à elevadas temperaturas, resistência a oxidação, pequena tendência à difusão e caldeamento, resistência a abrasão, boa condutividade térmica, calor específico e baixo coeficiente de dilatação térmica. Deve-se ter em mente que nenhuma ferramenta tem todas estas características (KÖNIG, 1981).

Em relação aos materiais para fabricação de ferramentas, salientam-se características de dureza e tenacidade. Dentre as ferramentas, encontram-se ferramentas de PCBN, que apresentam características de elevada dureza com baixa tenacidade, Figura 3, tornando-as propícias à usinagem de materiais endurecidos.

Figura 3 - Propriedades de materiais para ferramentas de corte.



Fonte: Adaptado de Mitsubishi (2008).

2.3.2 Ferramenta de PCBN

As ferramentas de PCBN são constituídas por partículas de CBN e um ligante. O CBN é o material mais duro abaixo do diamante, sintetizado pela primeira vez com sucesso em 1957, pela empresa General Electric Co[®]. É fabricado a partir do boro e o nitrogênio, produzindo inicialmente o nitreto de boro hexagonal que corresponde à forma do grafite, e a partir desta a cúbica (CBN) e a wurtzita.

O CBN (monocristal) é fabricado a partir do nitreto de boro hexagonal (hBN) a elevadas pressões e temperaturas. O pó de BN obtido nesse método é, geralmente, muito fino e a estrutura hexagonal. Com a adição de solventes catalisadores, consegue-se reduzir a faixa de temperatura e pressões necessárias para a transformação do hBN em CBN, com valores típicos em forno de 5 a 7 GPa e 1500 °C.

O dispositivo para alta pressão e temperatura utilizado para obtenção de CBN foi concebido por H. T. Hall e posteriormente

modificado por HP Bovenkerk e por Wentorf (1961), com a finalidade de melhorar sua capacidade e durabilidade.

A fabricação de materiais para ferramentas de corte de PCBN (SECO TOOLS, 2005) é feito em um processo de produção de extrema pressão. O pó de nitreto de boro hexagonal (hBN), após submetido a pressões em torno de 75 kbar e 2000 K, é transformado em partículas de nitreto de boro cúbico (CBN). Na sequência, as partículas de CBN são classificadas pelo tamanho e misturadas com um ligante específico ou catalisador utilizado na preparação das formulações necessárias para produzir a variedade de classes. A mistura pó de CBN e ligante é submetida às pressões e temperaturas necessárias para produzir o PCBN em formato de disco sólido. Como exemplo de classes de insertos sólidos tem-se: CBN050C, CBN100, CBN300 e CBN350 (SECO TOOLS, 2005). Insertos também são fabricados em discos onde a camada de PCBN é aplicada sobre substrato de metal-duro (denominada *full layer*). Para este tipo de ferramentas têm-se as classes CBN050C, CBN010, CBN150 e CBN200 (SECO TOOLS, 2005).

2.3.3 Composição do material da ferramenta

PCBN é um material compósito de grãos de nitreto de boro cúbico (CBN) em uma matriz ligante, podendo receber a classificação de alto e baixo teor de CBN. Classes com alto teor CBN contêm aproximadamente 80-95% de CBN, com um ligante metálico (Co, W e Al). Classes com baixo teor podem conter de 40-70% de CBN, sendo que a maioria tem matriz ligante à base de cerâmica como TiC e TiN (KÖNIG *et al.*, 1984; TONSHOFF *et al.*, 2000; LAHIFF *et al.*, 2007).

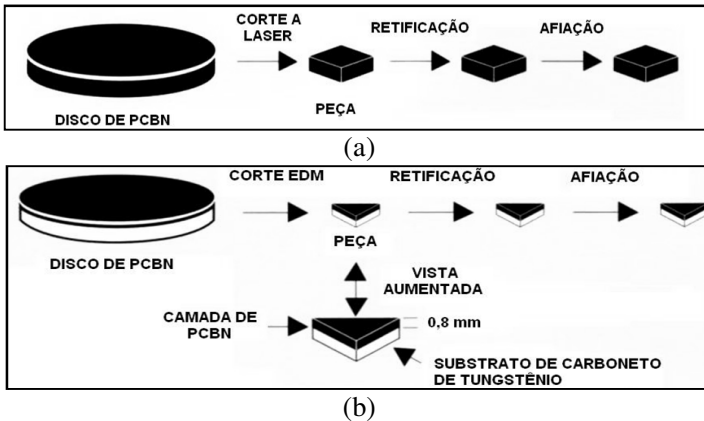
O uso de ligante de cerâmica proporciona, segundo Eda *et al.* (1980) e Klimenko *et al.* (1992), maior resistência de união entre os grãos de CBN do que a proporcionada por ligantes metálicos. Esta união com ligantes de cerâmica resulta em aumento da dureza da ferramenta. Este estudo também mostrou um aumento de dureza quando se diminuem os tamanhos de grão do ligante cerâmico para dimensões submicrométricas. Assim, a composição ligante e CBN utilizadas em insertos de PCBN para usinagem de materiais endurecidos é de suma importância para o processo de usinagem.

2.3.4 Obtenção da ferramenta

A Figura 4 mostra respectivamente como são obtidos os insertos de PCBN, partindo de discos de PCBN. Os insertos integrais (Figura

4a), bem como os com camada sobre toda a sua face (Figura 4b), são obtidos por corte a Laser e EDM, respectivamente, e após são retificados em todas as faces e finalmente submetidas à preparação dos gumes em processos específicos.

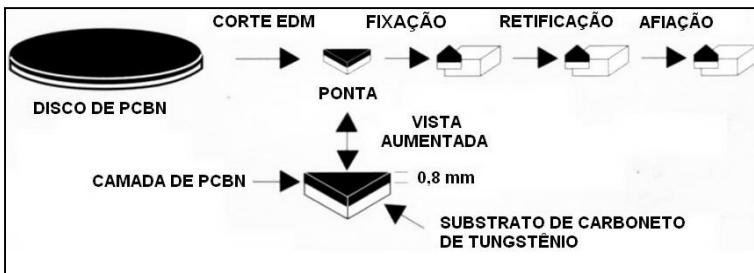
Figura 4 - Insertos: (a) integral de PCBN e (b) com camada de PCBN aplicada em substrato de metal duro.



Fonte: Adaptado de SECO TOOLS (2005).

Para os insertos de quina de PCBN aplicados sobre substrato de metal-duro, a base suporte de metal-duro dispõe de uma ou mais cavidades nas quais são aplicados pequenos segmentos de PCBN, Figura 5.

Figura 5 - Obtenção de insertos com quina aplicada sobre substrato de metal-duro.

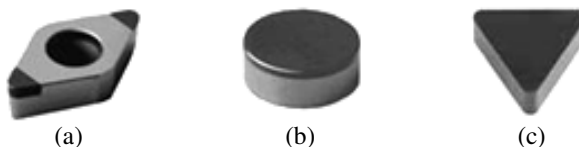


Fonte: Adaptada de SECO TOOLS (2005).

A Figura 6a mostra inserto com ponta de CBN, a Figura 6b com camada aplicada em substrato de metal duro e Figura 6c, integral em

CBN.

Figura 6 - (a) Quina e (b) camada de PCBN aplicada sobre substrato de metal duro e (c) integral de PCBN.



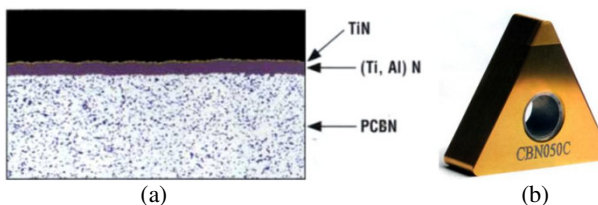
Fonte: SECO TOOLS (2005).

Características dos inserts de PCBN, descritas por Hodgson e Trendler (1981), Klimenko (1992), Farhat (2003), Benga e Abrão (2003) são: dureza (somente superada pelo diamante, mantendo-a em temperaturas superiores a 1000 °C), estabilidade termoquímica e inertes a materiais que contêm carbono. Chou *et al.* (2002) também citam resistência abrasiva e Diniz (2005), alta condutividade térmica e um baixo coeficiente de expansão térmica.

2.3.5 Revestimentos em ferramentas

Os inserts de PCBN apresentam uma coloração cinzenta escura/preta, que faz com que a identificação de gumes desgastados seja difícil de ser verificada a olho nu. Isto dificulta a identificação do fim de vida e pode-se descartar um inserto com pouco uso ou utilizar um já com desgaste excessivo. O revestimento de PCBN com TiN (Figura 7a), de cor dourada brilhante, facilita a identificação de gumes desgastados, mas não tem influência sobre a vida da ferramenta, pois o TiN é consideravelmente menos duro que o CBN. A Figura 7b mostra um inserto de PCBN com revestimento TiN.

Figura 7 - (a) Revestimento em ferramentas de PCBN e (b) Inserto CBN050C revestido.



Fonte: SECO TOOLS (2005).

Desde que o nitreto de boro cúbico policristalino (PCBN) foi introduzido como um material de ferramenta de corte de geometria definida, há mais de trinta anos, uma quantidade significativa de pesquisas dedicadas a compreender os mecanismos de corte e o desgaste da ferramenta permitiu o torneamento de aços temperados e revenidos na faixa de 45 a 65 HRC. Esta aplicação continua em expansão. As tendências verificadas em processos de fabricação apontam para maiores velocidades de corte e aumento das taxas de remoção de material. Em resposta, o número de ferramentas de geometria definida de PCBN disponíveis no mercado está aumentando, sendo muitas destas adaptadas para aplicações muito específicas. Huddle (2002) afirma que o custo do PCBN pode chegar até 20 vezes mais do que o custo com ferramentas convencionais. Entretanto, ainda a vida destas ferramentas apresentam resultados em torno de 4 a 20 vezes mais que a vida da ferramenta de metal-duro para a maioria das aplicações.

2.3.6 Aplicações de ferramentas de geometria definida de PCBN

As ferramentas de PCBN são utilizadas no torneamento de materiais temperados e revenidos, principalmente em operações de acabamento, devido à sua menor afinidade com materiais ferrosos e pela sua alta dureza (SAHIN, 2009). Prever o desempenho destas ferramentas, sob diversas condições de corte, é de grande importância para a otimização de um processo global no acabamento em torneamento de materiais temperados e revenidos (HUANG, 2005).

Apesar da ferramenta de PCBN ter custo elevado, este é compensado pelo tempo de vida longo de usinagem, permitindo um grande número de peças usinadas por gume. Estudos têm sido conduzidos para verificar o desempenho de ferramentas de PCBN na usinagem de aços temperados e revenidos (SAHIN, 2009), principalmente em operações de acabamento.

Na operação de acabamento são utilizadas ferramentas com cerca de 90% de CBN na sua composição, oferecendo maior dureza devido à maior quantidade de grãos de CBN, se comparada com ferramentas de baixo teor (TRENT e WRIGHT, 2000). Estas são mais eficientes quando o mecanismo de desgaste ocorre por abrasão, em altas forças de corte e cortes interrompidos.

Devido à sua elevada dureza, para utilização de ferramentas de CBN no processo de usinagem deve-se observar os seguintes aspectos: o sistema máquina-ferramenta-dispositivo de fixação deve ser rígido; a

geometria da ferramenta deve ser negativa para resistir a choques; o gume da ferramenta deve ser chanfrado, direcionando os esforços para o centro da ferramenta, diminuindo assim a possibilidade de quebra do inserto KÖNIG *et al.* (1984).

O desempenho de um inserto de PCBN depende do tipo do material ligante e do conteúdo de CBN utilizado (ZAREENA *et al.*, 2005). Esta afirmação pode ser exemplificada com o desgaste durante a usinagem de ligas de titânio com inserto de PCBN, onde ocorre a difusão do material ligante, por exemplo, o cobalto, junto ao cavaco (SUMIYA *et al.*, 2000).

Zareena *et al.* (2005) apontam que insertos de PCBN de alto teor de CBN, com pouca quantidade de ligante, exibem excelentes propriedades mecânicas, superior estabilidade térmica e resistência a trincas térmicas, propriedades estas que são essenciais à seleção de material de ferramenta de corte para usinagem a altas velocidades e que o desempenho de ferramentas de PCBN depende do teor de CBN e do tipo de material ligante utilizado em sua fabricação.

Segundo Dogra *et al.* (2010), ferramentas com baixo teor de CBN com ligante cerâmico possuem menor dureza, mas melhor estabilidade química. Com relação ao teor de CBN, Narutaki e Yamane (1979), ao usinarem aços ferramentas, encontraram melhor resultado para ferramentas de baixo teor de CBN. Os autores relatam este melhor resultado em função do menor atrito e a maior força de união dos grãos da ferramenta com maior quantidade de ligante. Já ao usinarem aços rápidos M50 (com 62-64 HRC), com ferramentas de alto teor de CBN, obteve-se melhor resultado apresentando maior resistência à abrasão imposta pelas partículas duras de carboneto do material da peça.

Davies *et al.* (1996), ao tornear aços M50 obtidos por três diferentes processos, sendo eles convencional, fundição por indução a vácuo com refusão por arco elétrico em vácuo (*vacuum induction melt vacuum arc remelt* - VIMVAR) e metalurgia do pó (PM) com ferramentas de PCBN de tamanho de grãos de 3, 1 e 0,5 μm , relataram que a resistência ao desgaste de ferramentas PCBN aumenta uniformemente com a diminuição do tamanho do grão de CBN e que o desgaste foi proporcionado por fadiga e microfaturas.

2.3.7 Microgeometria do gume

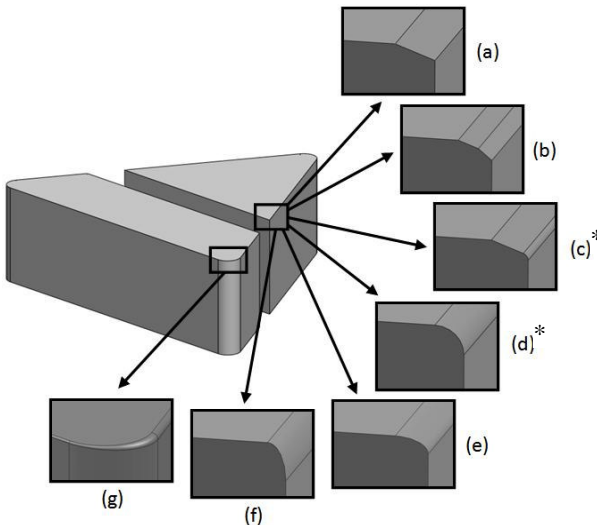
No torneamento e fresamento de materiais endurecidos, onde a espessura do cavaco a ser cortada e a dimensão do raio do gume da ferramenta estão na mesma ordem de grandeza, exigem geometrias que

possam resistir a altas tensões mecânicas e térmicas, com finalidade de aumentar a resistência ao desgaste e com isso, obter maior tempo de vida (LAHIFF, 2007; DOGRA *et al.*, 2010).

Ferramentas frágeis, dependendo de sua utilização, precisam que seu gume seja preparado com chanfro ou arredondamento com a finalidade de proteger a ferramenta contra lascamentos e quebras. Para estas situações, gumes preparados devem ser selecionados de acordo com sua aplicação, pois podem gerar danos na região sub-superficial usinada e também resultar em grande tensão residual trativa sobre a superfície da peça usinada (KLOCKE e KRATZ, 2005; ÖZEL, 2009; DOGRA *et al.*, 2010).

Segundo Karpát e Özel (2007), as preparações de gume em ferramentas de PCBN apresentam diversas formas como: chanfro (Figura 8a), duplo chanfro (Figura 8b), chanfro com pequeno arredondamento (Figura 8c), apenas arredondamento (Figura 8d), arredondamento parabólico em forma de corneta (Figura 8e), em forma de cascata (Figura 8f) e com arredondamento variável (Figura 8g), possuindo características específicas de acordo com sua aplicação. Pode-se observar na Figura 8c e Figura 8d, a microgeometria dos gumes utilizados nos ensaios desta pesquisa.

Figura 8 - Preparação do gume de ferramentas: (a) chanfrado, (b) chanfrado duplo (c) chanfrado com arredondamento (d) apenas arredondado (e) parabólico em forma de corneta (f) parabólico em forma de cascata e (g) arredondamento variado.



O chanfrado é a forma mais simples de preparação de um gume. Consiste na preparação de uma superfície inclinada no contorno do gume principal, quina e gume secundário com um ângulo de 15 a 20° e largura entre 0,10 a 0,20 mm. O gume apenas arredondado simetricamente é formado pela preparação de um arredondamento no gume, geralmente feito pelo processo de escovação (RECH, 2005) ou pela usinagem por jato com micro-abrasivo (WYEN, 2011). Gume chanfrado e arredondado é preparado com a mesma microgeometria do chanfro, mas com pequeno arredondamento entre o chanfro e o flanco. Gume parabólico consiste no arredondamento do flanco com a face em forma de “cascata” (*waterfall shape* - raio de gume com aumento do raio de gume em direção ao flanco) ou em forma de “corneta” (*trumpet shape* - raio de gume com diminuição em direção ao flanco).

Ferramentas com gume de arredondamento variado apresentam raios diferentes de arredondamento, com seu valor decrescendo em direção à quina da ferramenta. Desta forma o raio de arredondamento de gume torna-se adequado à espessura de usinagem em cada posição de corte. Em relação aos tipos de gumes, Wyen (2011) cita que o perfil de cascata provoca cargas mais elevadas no flanco da ferramenta, enquanto que um perfil de corneta tende a diminuir as forças no flanco. Para este autor, esses gumes assimetricamente arredondados têm efeito semelhante às ferramentas com gumes com arredondamento excessivamente pequeno ou excessivamente grande e que ferramentas com perfil em forma de “corneta” tem maior vida do que ferramentas de gumes com perfil em “cascata”.

Pesquisas revelam que, dependendo da usinagem, um gume chanfrado influencia nas tensões residuais de compressão e o aumento do ângulo do chanfro causa aumento nestas tensões. Estes aumentos de tensões foram encontrados por Hodgson e Trendler (1981) ao usinarem aços-ferramentas AISI D2, D6 e M42. Resultados semelhantes foram encontrados por Thiele e Melkote (2000) na usinagem de acabamento do AISI 52100 temperado e revenido (com 41 e 57 HRC), por Zhou *et al.* (2003) e Kurt e Seker (2005), mas com dureza de 60-62 HRC. Hua *et al.* (2005) ao usinar este mesmo material, mas em operação de faceamento, verificaram que o efeito do chanfro na ferramenta é equivalente ao aumento do raio de arredondamento. Também verificaram que seu aumento facilita a tensão de compressão residual abaixo da superfície, mas provoca o aumento da temperatura da ferramenta. Além de influenciar as tensões residuais de compressão, o chanfro influencia os valores das componentes da força de usinagem.

Karpat e Özel (2007) ao usinarem o aço AISI H13, temperado e revenido (55 HRC), com ferramentas de baixo teor de CBN (50%), uma com gume chanfrado e outra com gume arredondado, verificaram menores valores para as componentes da força de usinagem e menor desgaste de flanco para ferramentas gume arredondado. Para ferramentas com gume chanfrado, verificaram que estas proporcionam maior concentração de tensões na intersecção do chanfro e da face, causando maiores desgastes.

Em relação a ferramentas com gume arredondado, Lahiff (2007) cita que estas ferramentas possuem maior superfície de contato com a peça e o cavaco, aumentando a transferência de calor da zona de corte para a ferramenta, apresentando melhora no acabamento da superfície e a integridade da superfície da peça usinada. Pode-se complementar com Karpat e Özel (2008) e Dogra *et al.* (2010) que a finalidade da utilização de ferramentas com gumes arredondados é a de proteger o gume de lascamentos, melhorar a sua resistência a impactos e aumentar a área de superfície para a transferência de calor da zona de corte. Também citam que o raio do gume deve ser selecionado de acordo com as condições de corte.

2.4 DESGASTES E MECANISMOS DE DESGASTE DAS FERRAMENTAS DE CORTE

A detecção ou controle de desgaste em ferramentas de corte é um fator importante para assegurar a qualidade dos componentes usinados. O desgaste da ferramenta, se não detectado, também pode resultar em danos ao suporte, à peça e à máquina-ferramenta. Mesmo que a grande maioria das peças fabricadas por metalurgia do pó não necessite de processos de usinagem (CHIAVERINI, 2001; HUDDLE, 2002), quando estes forem necessários, as ferramentas de corte devem satisfazer os requisitos de desempenho para atuarem no processo.

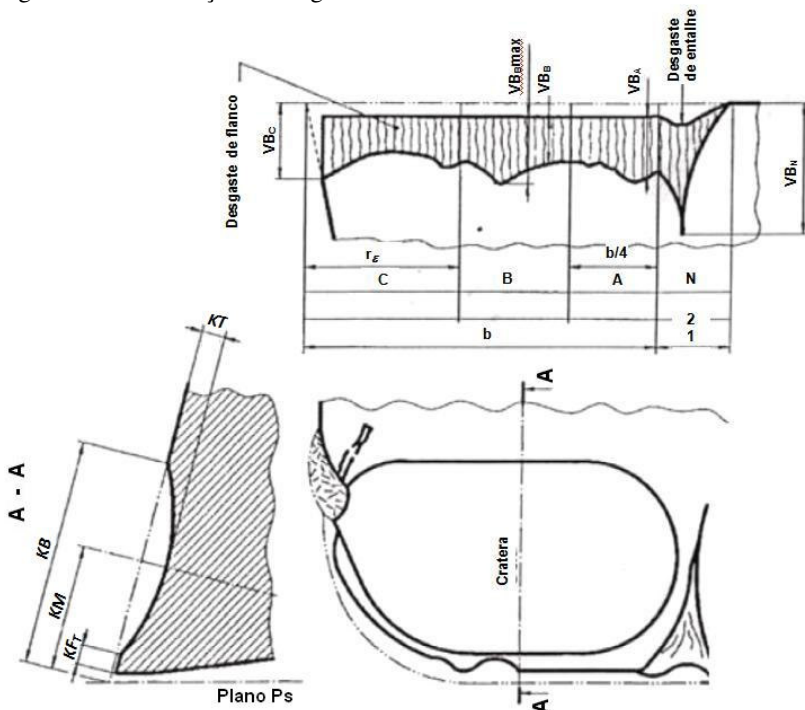
2.4.1 Desgaste em ferramentas de corte

Um dos fatores importantes que afetam a otimização do processo de usinagem é o desgaste de ferramenta. O fim de vida de uma ferramenta é estabelecido por um limite em um dos critérios de usinabilidade. O mais comum é empregar um determinado valor do desgaste de flanco como critério de fim de vida. A Figura 9 mostra a medição padronizada do desgaste em ferramentas de usinagem com detalhes da marca de desgaste de flanco (frontal), de entalhe no flanco e

do desgaste de cratera, na face da ferramenta.

Para fim de vida é comum se empregar o valor de $VB_{B\text{máx}}$ na região B na superfície de folga (ou incidência), conforme Figura 9. Tem-se como VB_B o desgaste médio de flanco; $VB_{B\text{máx}}$ o desgaste máximo de flanco; VB_N o desgaste de entalhe no gume principal; VB_C o desgaste de entalhe no gume secundário. Já na face mede-se a profundidade da cratera (K_T) e a distância do centro da cratera ao gume original (K_M).

Figura 9 - Padronização de desgaste em ferramenta.



Fonte: Adaptado de ISO (1993).

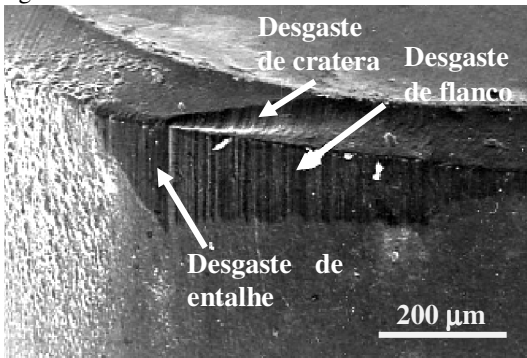
O desgaste da ferramenta influencia na qualidade de produtos, custos de usinagem e produtividade (GHASEMPOOR *et al.*, 1999). Assim, faz-se necessário identificar o tipo de desgaste que ocorre em ferramentas.

Desgaste de flanco (Figura 10) é, em geral, uma das identificações relacionadas ao critério de fim de vida de ferramenta de corte, que ocorre pela diminuição do ângulo de incidência da

ferramenta, ocasionando aumento na área de contato entre a superfície de incidência da ferramenta e o material da peça.

Outro tipo de desgaste é o de cratera (Figura 10), que está geralmente associado às elevadas temperaturas geradas na interface cavaco-ferramenta e a diminuição da resistência ao desgaste por abrasão pela formação de compósitos de menor resistência formados pela afinidade entre os materiais em contato, sendo esse material menos resistente retirado pelo deslizamento do cavaco (LUO *et al.*, 1999; ROCHA *et al.*, 2004). A posição da cratera varia de acordo com o material usinado, das condições de corte, ocorrendo sempre na face, no sentido de saída do cavaco.

Figura 10 - Desgastes em ferramenta de PCBN.



Fonte: Adaptado de LUO *et al.* (1999).

A profundidade e a largura da cratera, formada na face da ferramenta, estão relacionadas à velocidade de corte e ao avanço empregado durante o corte (FERRARESI, 1977). Em relação à profundidade de cratera, Childs (2000) destaca que K_T , entre 0,05 e 0,10 mm é, geralmente, usado como critério de fim de vida. O aumento do desgaste de cratera tende a proporcionar a quebra da ferramenta quando acontece o encontro da cratera com flanco (DINIZ *et al.*, 2003). Relativo à localização da máxima profundidade de cratera, Vieregge (1959) declara estar próxima ao ponto médio do comprimento de contato entre o cavaco e a superfície de saída, local em que a temperatura atinge seu maior valor.

2.4.2 Desgaste em ferramentas de PCBN

A principal vantagem das ferramentas de corte de CBN é possuir

estabilidade em altas temperaturas durante a usinagem em contato com materiais ferrosos, o qual se mantém estável, usinando sem refrigeração, por longos períodos em temperaturas acima de 1000 °C (TRENT e WRIGHT, 2000).

Klimenko *et al.* (1992 e 1996) ao pesquisar o desgaste de insertos de PCBN ao usinar aços temperados e revenidos encontraram a formação de uma camada de material aderido no estado fundido sobre a face da ferramenta, imediatamente após a região de corte, identificado via EDS. Segundo estes autores, a formação desta camada é devida à menor temperatura de fusão do composto químico formado e a evidências de fusão deste composto químico os quais são expelidos para a superfície da ferramenta, próxima a região de corte. Os autores colocam que a camada formada ocorre devido às interações químicas do material da ferramenta com material da peça e o ambiente. Os produtos encontrados na face da ferramenta consistem em boretos, carbonetos, nitretos e óxidos de elementos de ferro/cromo/titânio oriundos da peça de trabalho e da ferramenta.

Klimenko *et al.* (1996) e Luo *et al.* (1999) enfatizam que os desgastes em ferramentas de PCBN podem ser influenciados pela composição, dureza e micro-estrutura da peça.

Poulachon *et al.* (2001) apresentaram vários modos de desgaste e avarias em ferramentas de corte de PCBN, sob diferentes condições, durante a usinagem de aço para rolamentos 52100 (45-65 HRC), relatando que mecanismos de desgaste dependem não somente da composição química do PCBN e da natureza da fase do ligante, mas também do valor da dureza e acima de tudo, da micro-estrutura da peça (porcentagem de martensita, tipo, composição, etc.) e da sua usinabilidade. Zhou *et al.* (2003) acrescentam a influência da microgeometria da ferramenta, e Arsecularatne *et al.* (2006a) às condições de corte.

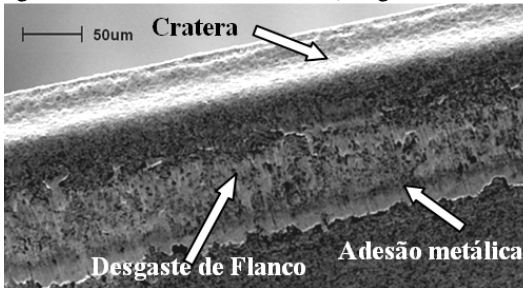
Os desgastes mais estudados em ferramentas de PCBN são os desgastes de flanco e de cratera. Normalmente estabelece-se um valor de desgaste de flanco como critério de fim de vida devido à grande influência que esta característica tem sobre o acabamento da superfície e a exatidão dimensional da peça usinada (LAHIFF *et al.*, 2007). A formação de uma cratera na face do inserto leva a uma variação da geometria da cunha de corte, cujo enfraquecimento pode levar ao colapso da ferramenta.

A formação da cratera na face da ferramenta pode ser explicada por mecanismos triboquímicos. Na superfície da cratera verifica-se uma concentração de boro e nitrogênio menor do que no restante do material

PCBN, sendo causada por mecanismos de abrasão e reações químicas na interface do cavaco e face do inserto. Este mecanismo é possível devido às pressões e temperaturas extremamente elevadas na região.

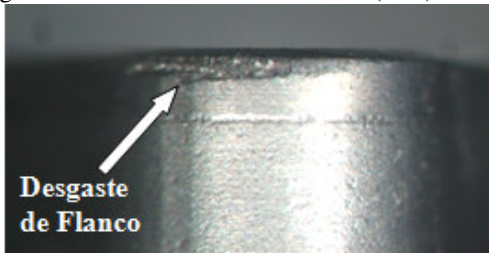
Na Figura 11 pode-se verificar início de formação de cratera no chanfro (superfície do inserto) e também presença de material aderido no flanco, em um inserto de PCBN classe CB100, verificado em ensaios de torneamento de aço rápido obtido por metalurgia do pó em forma de anel temperado e revenido, com v_c 180 m/min e avanço 0,05 mm.

Figura 11 - Desgaste em ferramenta de PCBN (imagem obtida em MEV)



A Figura 12 mostra o desgaste de flanco após usinagem de 400 peças em aço AISI 1050 temperado e revenido (58-61 HRC) em corte interno intermitente, em uma ferramenta com quina de PCBN aplicada sobre substrato de metal-duro, classe FP894, geometria S14-N, fabricante Mapal®, utilizando avanço de 0,15 mm, profundidade de corte de 0,30 mm e velocidade de corte de 150 m/min.

Figura 12 - Desgaste de flanco em inserto de PCBN (10X)



2.4.3 Mecanismos de desgaste em ferramentas de PCBN

Os mecanismos mais comumente utilizados para explicar o

desgaste de ferramentas de PCBN são abrasão (NARUTAKI e YAMANE, 1979; POULACHON *et al.*, 2004), adesão (NARUTAKI e YAMANE, 1979; FARHAT, 2003; KÖNIG e NEISES, 1993, SALES *et al.*, 2009), difusão (NARUTAKI e YAMANE, 1979; ZIMMERMANN *et al.*, 1997; KÖNIG e NEISES, 1993), desgaste químico (LUO *et al.*, 1999; FARHAT, 2003; BARRY e BYRNE, 2001; HOOPER *et al.*, 1988) e adesão seguida de arrancamento e arrastamento (*attrition*) (KATUKU *et al.*, 2010).

O mecanismo de desgaste por abrasão é causado por grãos de CBN que se desprendem da ferramenta de corte (NARUTAKI e YAMANE, 1979; POULACHON *et al.*, 2004). Mecanismo de desgaste por abrasão foi encontrado ao usinar aço ferramenta para trabalho a frio AISI D11 por Ohtani e Yokogawa (1988). Esse mecanismo de desgaste ocorre quando o material ligante é desgastado pela peça, expondo os grãos de CBN, sendo estes mais facilmente removidos, contribuindo para a abrasão (LUO *et al.*, 1999).

A adesão ocorre quando o material da peça fixa-se nas superfícies de saída e de folga da ferramenta proporcionada em grande parte pelas altas temperaturas e pressão de contato (HOOPER *et al.*, 1989; LUO *et al.*, 1999; BARRY e BYRNE, 2001; FARHAT, 2003), que ao ser arrancada, transporta grãos de CBN da ferramenta através de arrancamento. A área e a espessura da camada depositada dependem das condições de corte e da taxa de desgaste da ferramenta, sendo que estes fatores determinam a temperatura na região de corte. A estrutura, a composição e o grau de aderência da camada são determinados pelo material da ferramenta de PCBN (KÖNIG e NEISES, 1993; CHOU *et al.*, 2002).

A difusão acontece devido às elevadas temperaturas atingidas durante o processo de corte de metal (ZIMMERMANN *et al.*, 1997; NARUTAKI e YAMANE, 1979; KÖNIG e NEISES, 1993). O ligante da ferramenta de corte PCBN é relatado como sendo o mais sensível a esta forma de desgaste e que algumas das fases reagem muito facilmente com o material da peça, resultando em mudanças estruturais, podendo tornar o ligante menos resistente ao desgaste e levar ao aumento do desgaste abrasivo (KÖNIG e NEISES, 1993). Difusão foi observada por Zimmermann *et al.* (1997) em ferramentas de baixo teor de CBN com ligante cerâmico (TiC), após usinagem de AISI 5115 temperado e revenido, com velocidade de corte de 240 m/min. Camadas de materiais oriundos da peça, formadas frequentemente em ferramentas de PCBN, após o corte de metais, são devido à reação química na zona de contato entre a peça e a ferramenta ou entre a ferramenta e a atmosfera,

proporcionadas pelas altas temperaturas na região de corte (HOOPER *et al.*, 1989; LUO *et al.*, 1999; BARRY e BYRNE, 2001; FARHAT, 2003). Este tipo de mecanismo de desgaste foi encontrado por Farhat (2003) ao usinar AISI P20-L, temperado e revenido com ferramenta de PCBN, quando analisou a topografia do flanco desgastado.

Em relação à reação química que ocorre entre o material da peça e do inserto, diferentes pesquisadores têm verificado a presença de uma camada de material oriunda da peça usinada e aderida sobre a superfície de insertos de PCBN, fora da área de contato (HOOPER *et al.*, 1989; LUO *et al.*, 1999; FARHAT, 2003). Há um pensamento geral de que o material aderido fora da área de contato seja oriundo de uma reação química entre a ferramenta e a peça na área de contato da peça usinada, facilitada pelas altas temperaturas geradas, sendo conduzido durante o processo de corte para fora da região de contato. A área coberta da superfície da ferramenta e a espessura desta camada dependem das condições de corte, da taxa de desgaste da ferramenta e de como estes fatores determinam a temperatura na zona de contato.

König e Neises (1993) relataram a presença de alumínio em torno da zona de contato, sugerindo que o cavaco pode remover alumínio do ligante da ferramenta de PCBN e depositá-lo na superfície da ferramenta. Nos experimentos feitos por Luo *et al.* (1999) em testes de torneamento de AISI 4340 (55 HRC) com ferramentas de PCBN, também identificaram a presença de elementos da peça (Fe, Ni e Mn) e do ligante (Al e Ti) na camada aderida na superfície do inserto.

Arsecularatne *et al.* (2006a) durante a usinagem de AISI D2 (62 HRC), verificaram que os mecanismos de desgaste de insertos de alto teor de CBN (~85%), usando como critério de fim de vida o desgaste de flanco, foram de natureza química. Lahiff *et al.* (2007) com base nos estudos dos pesquisadores em usinagem com ferramentas de PCBN, concluíram que os compostos formados pelas reações químicas na zona de contato entre cavaco-ferramenta e flanco-superfície da peça não são tão duros como os do material da ferramenta de PCBN e, portanto, mais facilmente desgastados por abrasão, sendo a estrutura e composição das reações químicas determinadas pelo material da ferramenta de PCBN.

O desgaste por adesão e ruptura de adesões, ou simplesmente denominado de desgaste por adesão, ocorre na faixa de velocidade de corte na qual ocorre a formação do gume postiço. Por isto as superfícies usinadas na presença do mecanismo de desgaste de adesão são ásperas em comparação com as superfícies resultantes do desgaste de difusão. Este desgaste, de acordo com Machado e Silva (2004) pode ocorrer em altas velocidades de corte se o fluxo de material que desliza na face da

ferramenta for irregular, podendo não ser identificado devido à presença de difusão e deformações que acabam por ocultar a presença deste mecanismo.

2.4.4 Ferramentas com baixo teor de CBN

Ferramentas com baixo teor de CBN possuem cerca de 40-70% de CBN, sendo a maioria constituída de ligante cerâmico como o TiN.

Em pesquisas realizadas em torneamento de AISI 52100 endurecido, por Narutaki e Yamane (1979), Barry e Byrne (2001) e Chou *et al.* (2002), ferramentas de baixo teor de CBN apresentaram menor taxa de desgaste que as de alto teor de CBN. Bossom (1990) cita que o desgaste em ferramentas de baixo teor de CBN é devido à sua baixa condutividade térmica, que retém calor na região de corte.

Pesquisas realizadas por König e Neises (1993) ao utilizar dois tipos de ferramentas de PCBN, uma contendo alto teor de CBN com ligante metálico (Al) e uma de baixo teor de CBN com um ligante cerâmico (TiC), concluíram que a composição do percentual e do ligante usado no material PCBN determina a estabilidade térmica. Testes de difusão foram realizados com estes materiais de PCBN em contato com a peça a uma temperatura em torno de 950°C. Em avaliações subseqüentes, usando um modelo de ensaio de abrasão, os autores revelaram redução na resistência ao desgaste do CBN, atribuído à recristalização termicamente induzida das fases ligantes, não evidenciando nenhuma reação entre o CBN e nenhuma alteração na integridade dos grãos de CBN.

Ao pesquisarem o desgaste de ferramentas de baixo teor de CBN na usinagem de AISI 4340, temperado e revenido, para diferentes durezas, Barry e Byrne (2001) sugeriram que o desgaste destas ferramentas teve origem na natureza química e que houve a presença de material aderido na superfície das ferramentas desgastadas.

Chou *et al.* (2002), ao usar AISI 52100 constataram nas ferramentas de baixo CBN presença de ranhuras no flanco em situações de maior velocidade de corte (240 m/min). Os autores concluíram que a adesão foi o mecanismo de desgaste atuante, afirmando que ferramentas contendo baixo teor de CBN têm melhor resistência ao desgaste em relação às ferramentas de alto teor.

Luo *et al.* (1999), Poulachon *et al.* (2003; 2004) estudaram o desgaste de ferramentas de baixo teor de CBN ao usar diferentes aços temperados e revenidos. Com base nos sulcos observados em marcas de desgaste de flanco das ferramentas, eles concluíram que o mecanismo

principal para o desgaste das ferramentas de PCBN está relacionado à abrasão do ligante da ferramenta por partículas duras de carboneto da peça, expondo os grãos da ferramenta ao arrancamento.

Já ao usinar liga de aço rápido M657BA.12T obtida por metalurgia do pó, com ferramentas de baixo teor de CBN, Rocha *et al.* (2004), identificaram a quebra da ferramenta de PCBN. Quebra da ferramenta, utilizando ferramenta de baixo teor de CBN com gume chanfrado, também foi verificada por Mahfoudi *et al.* (2008) ao usinar AISI 4140, 50 HRC, com $v_c = 400$ m/min, avanço de 0,10 mm, profundidade de corte de 1,0 mm.

Embora em algumas pesquisas os resultados apresentem quebra de ferramenta, Lahiff *et al.* (2007) concluem que ferramentas contendo baixo teor de PCBN, em relação as ferramentas de alto teor de CBN, apresentam melhor desempenho no torneamento de materiais endurecidos quanto à vida da ferramenta e acabamento da superfície usinada.

2.4.5 Ferramentas com alto teor de CBN

Ferramentas de alto teor de CBN possuem entre 80-95% de CBN, geralmente com ligante metálico como Co, W e Al. Possuem maior condutividade térmica, conseqüentemente dissipam melhor o calor, diminuindo a temperatura na região de corte (HOOPER *et al.*, 1989). Com relação a esta diferença da condutividade térmica, Bossom (1990) concluiu como sendo esta a razão para o desempenho inferior para as ferramentas de alto teor de CBN, durante o torneamento de materiais temperados em operação de acabamento.

Ao estudar marcas de desgaste de flanco em ferramentas de alto teor de CBN no torneamento de AISI 52100 temperado e revenido (61-63 HRC), com auxílio de MEV, Chou *et al.* (2002) concluíram que as camadas aderidas formadas nas ferramentas são fortemente ligadas e que o desgaste por adesão foi o mecanismo de desgaste dominante. Este tipo de adesão em ferramentas de alto teor de CBN também foi observada por Arsecularatne *et al.* (2006b), ao usinar AISI D2 com ferramenta com alto teor de CBN.

No material de alto teor de CBN a camada aderida é mais difícil de ser removida, onde o desgaste, formado pelo arrancamento de grãos de CBN, é atribuído ao desgaste adesivo. Lahiff *et al.* (2007) sugerem que a falta de ligação entre o CBN e a matriz ligante resulta na retirada dos grãos de CBN, originando sulcos no flanco da ferramenta de CBN.

Em relação ao lascamentos em ferramentas de PCBN, resultados

encontrados por Hodgson e Trendler (1981) ao usinar AISI M2, obtido por metalurgia convencional, com ferramentas com gume chanfrado, velocidades de corte de 80, 100 e 120 m/min e avanço de 0,05 mm/rotação, mostram ser insatisfatório o desempenho da ferramenta sob essas condições devido à falha prematura do gume da ferramenta. Lascamentos e quebra, em torneamento com corte interrompido de AISI O1 para trabalho a frio, com dureza de 58 HRC, foram identificados por Diniz *et al.* (2005), em ferramenta somente chanfrada de alto teor de CBN e também em ferramenta chanfrada e arredondada de baixo teor de CBN, com $v_c = 120, 150$ e 180 m/min. A razão desses lascamentos foi a maior frequência e energia dos impactos causados pela alta velocidade de corte. Resultados semelhantes relacionados aos lascamentos também foram encontrados por Sales *et al.* (2009), mas usinando AISI H10, temperado e revenido, atribuindo-os às elevadas forças de impacto geradas pela interrupção do corte causados pelos sulcos nas superfícies das peças.

2.5 INFLUÊNCIAS NA VIDA DA FERRAMENTA DE PCBN

2.5.1 Influência da microgeometria do gume na vida da ferramenta de PCBN

A microgeometria da quina da ferramenta (ângulo de chanfro, largura do chanfro e arredondamento do gume) tem influência significativa na vida da ferramenta de corte e determina o acabamento da superfície e a integridade da peça usinada. O desgaste no flanco e na face constitui em uma alteração da microgeometria do gume. Quando o desgaste de flanco for dominante, o fim de vida da ferramenta é definido por uma marca de desgaste de flanco previamente estabelecida. Para o torneamento longitudinal o desgaste de flanco que ocorre na quina do inserto influencia significativamente o acabamento da superfície usinada e a exatidão dimensional da peça. Quando a profundidade de corte e o avanço são muito pequenos, a região do gume utilizada se limita à região da quina da ferramenta de corte.

Ângulo de saída negativo é empregado na usinagem de materiais endurecidos para garantir maior resistência da cunha da ferramenta. Ao usinar o AISI 4218 cementado, temperado e revenido para dureza 55-61 HRC, em corte contínuo com ferramenta de PCBN, contendo aproximadamente 60% de CBN, com um ligante TiN-AlN, Shintani *et al.* (1989) mostraram que a microgeometria da ferramenta é determinante para o comportamento da vida da ferramenta. Neste estudo

variaram a largura do chanfro para ferramentas com raio de quina de 0,8 mm e um raio de gume de 0,050 mm. A vida da ferramenta foi limitada por uma largura da marca de desgaste de flanco (V_B) de 0,25 mm. Verificaram que a vida aumenta com o aumento da largura do chanfro até um ponto crítico e após mantém-se constante. Esta largura crítica de chanfro foi encontrada como sendo igual ao comprimento de contato ferramenta-cavaco. Foi também encontrado que a vida da ferramenta aumenta com o aumento do raio da quina até um valor de 0,8 mm e, em seguida, mantém-se constante.

2.5.2 Influência da microgeometria do gume nas componentes da força de usinagem

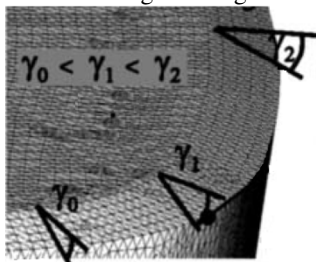
A forma de preparação do gume de uma ferramenta de PCBN com chanfros e arredondamentos típicos mostrados na Figura 8, influenciam as componentes da força de usinagem. Resultados apresentados por Shintani *et al.* (1989) mostram que o aumento do ângulo e da largura do chanfro proporciona aumento na força de corte. Resultados semelhantes foram observados por Bossom (1990) ao verificar o efeito da microgeometria do gume do inserto sobre a força radial e desgaste na usinagem de AISI D3, temperado e revenido, para trabalho a frio com inserto de baixo teor de CBN.

Thiele e Melkote (2000) citam que as componentes da força de usinagem, passiva e de avanço, são em grande parte determinadas pela microgeometria do gume, aumentando com o aumento do arredondamento e/ou com a adição de um chanfro no gume. O aumento da força de corte devido a um gume chanfrado, também foi relatado por Özel (2003) no corte ortogonal de aço ferramenta AISI H13 (55 HRC), verificando que as ferramentas de PCBN com um gume apenas arredondado (sem chanfro) resultam em menor força de corte que em gumes chanfrados.

Ao tornear AISI 52100, Kurt e Seker (2005) mostraram que todas as componentes da força de usinagem, mas em especial a força passiva aumenta com o aumento do ângulo do chanfro. Kountanya *et al.* (2005), também na usinagem do aço AISI 52100 (60 HRC) em corte ortogonal, variando as condições de corte, verificaram que um aumento do raio de gume aumenta a força corte e a força passiva, e que estas forças diminuem com o aumento da velocidade de corte e aumentam para um chanfro mais negativo. Verificaram também que a força passiva aumenta mais que a força de corte, de forma que e a proporção entre força passiva e de corte aumenta.

Em relação à influência do chanfro em ferramentas de PCBN, Klocke e Kratz (2005) apresentaram o projeto de um chanfro em que o ângulo e a largura variam em torno do raio de quina para acomodar as mudanças das condições de uso do gume (Figura 13).

Figura 13 - Inseto com chanfro de largura e ângulo variável.



Fonte: Adaptado de Klocke e Kratz (2005).

Segundo Klocke e Kratz (2005), os benefícios desta concepção de gume do inserto são o aumento da vida da ferramenta, da taxa de remoção de material e da qualidade da superfície da peça em torneamento de alta precisão.

A microgeometria do gume da ferramenta tem um significativo impacto na integridade da superfície usinada e nas tensões residuais da camada limite no torneamento de acabamento de aços temperados e revenidos (THIELE e MELKOTE, 2000; HUA *et al.*, 2005). Pawade *et al.* (2008) ao analisar a superfície de peças torneadas em Inconel 718 com ferramentas de PCBN com gumes apenas chanfrados e chanfrados com arredondamento, citam que em maiores velocidades de corte, menores avanços e pequenas profundidades de corte ferramentas com gume arredondado proporcionam menores tensões de compressão na superfície usinada.

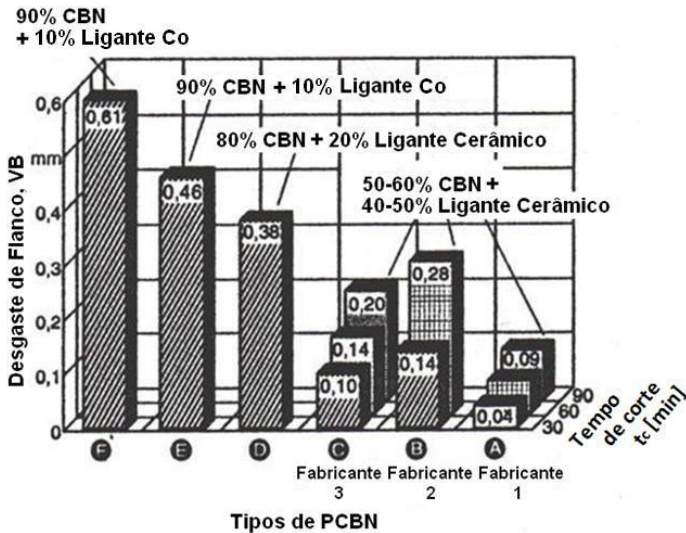
2.5.3 Influência da velocidade de corte na vida da ferramenta de PCBN

Em geral, o aumento da velocidade de corte faz com que ocorra o aumento a taxa de desgaste e em decorrência aconteçam modificações na microgeometria da ferramenta (KÖNIG, 1990). Um aumento no avanço também aumenta a taxa de desgaste da ferramenta. Estas modificações acarretam aumento na força de usinagem e alterações dimensionais na peça usinada.

Para minimizar o desgaste na ferramenta é necessária

principalmente a identificação da velocidade ótima de corte (KOCH, 1996). A Figura 14 mostra o desgaste de flanco na usinagem do aço temperado e revenido AISI 52100 (60-62 HRC), para diferentes classes de PCBN relacionados ao desgaste de flanco para um tempo de corte de 30, 60 e 90 min (KOCH, 1996). Nesta figura, pode-se observar o melhor desempenho para ferramentas de baixo teor de CBN, com ligante cerâmico, em especial do fabricante A (VB de 0,04 mm), em relação a ferramentas de alto teor de CBN com ligante tanto metálico como cerâmico (fabricantes D, E e F com desgastes VB de 0,38, 0,46 e 0,61 mm respectivamente), para um tempo de corte de 30 minutos.

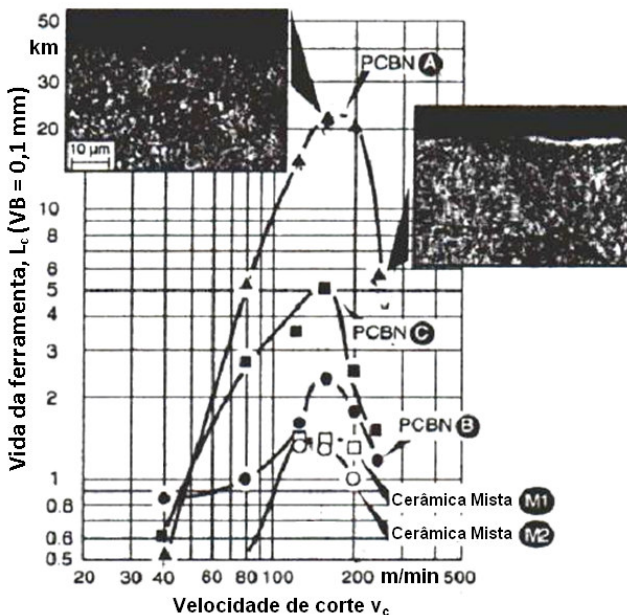
Figura 14 - Desgaste de flanco em diversas classes de PCBN.



Fonte: Adaptado de KOCH (1996).

Koch (1996) mostra que na usinagem do aço AISI 52100 temperado e revenido, a vida da ferramenta de PCBN apresenta um comportamento não esperado. Cita que para todos os insertos ensaiados as curvas de vida apresentam um valor máximo como função da variação da velocidade de corte, tendo como critério de fim de vida a marca de desgaste de flanco de 0,10 mm, Figura 15. Nos ensaios de Koch (1996) a velocidade ótima situou-se na faixa de 160 m/min.

Figura 15 - Velocidades de corte ótimas para diversas classes de ferramentas de PCBN.



Fonte: Adaptado de KOCH (1996).

A vida útil para a ferramenta de CBN e de cerâmica aumenta com o aumento da velocidade de corte até atingir um valor máximo e, posteriormente, começa a diminuir (Figura 15). Koch (1996) cita para essa situação de vida ótima a distribuição de calor da raiz do cavaco para a peça e para o cavaco, onde o calor da deformação plástica preaquece o material a ser usinado, diminuindo assim os esforços sobre a ferramenta.

Ensaio com variação de velocidade de corte também foram realizados, mas na faixa de 70-120 m/min por Arsecularatne *et al.* (2006a) na usinagem de aço AISI D2 (62 HRC) com ferramentas de alto teor de CBN revestidas (85% de CBN com ligante cerâmico). Nestes ensaios, onde foi observada a evolução do desgaste de flanco VB_B , os resultados mostraram a presença de ranhuras no flanco da ferramenta. Os autores atribuíram essas ranhuras ao desgaste do ligante pelas partículas duras da peça, fazendo com que os grãos de CBN ficassem mais expostos e ao serem arrastados, proporcionassem essas ranhuras.

2.5.4 Influência da dureza da peça na vida da ferramenta PCBN

Ensaio de torneamento de aços CrMo, de diferentes durezas, foram realizados por Enomoto *et al.* (1987) os quais verificaram que as ferramentas de CBN tiveram maior vida do que quando usinando aço macio (35 HRC).

König e Neises (1993) em ensaios de usinagem de diversos materiais cementados, temperados e em aços ferramenta, todos na mesma dureza (55 HRC), constataram que a menor vida da ferramenta de PCBN foi obtida ao usinar o aço ferramenta, por ter alto teor de carbonetos. Estes ensaios também mostraram que para os aços com matriz essencialmente martensítica a taxa de desgaste da ferramenta aumenta com o aumento do teor de martensita.

Em pesquisas realizadas por Davies *et al.* (1996) ao usinar peças de aço AISI M50, mas com diferentes micro-estruturas, apontaram uma correlação entre a taxa de desgaste de flanco e o tamanho dos carbonetos, pois em peças com menores carbonetos, ocorreu menor desgaste de flanco da ferramenta.

Luo *et al.* (1999) analisaram a influência da dureza da peça no comportamento do desgaste de ferramentas de PCBN, ao usinar ligas de AISI 4340 com dureza de 35, 45, 50 e 55 HRC. Identificaram com auxílio do MEV a presença de sulcos no flanco da ferramenta, que é uma microgeometria típica de desgaste abrasivo. Os autores sugeriram que o ligante da ferramenta foi desgastado por partículas duras do material da peça, os quais proporcionam o arrancamento dos grãos de CBN do ligante, originando os sulcos no seu flanco.

Em relação ao tamanho dos grãos de carbonetos, testes foram realizados por Poulachon *et al.* (2004) com ferramentas de PCBN em diferentes aços AISI D2, AISI H11 e AISI 52100, com mesma macrodureza (54 HRC), mas com diferentes micro-estruturas. Dois continham grande quantidade de carbonetos, um com tamanho de carbonetos entre 10-15 μm e o outro com carbonetos extremamente finos (1,0 μm). Segundo o autor, a presença de estrias na superfície do flanco da ferramenta possui características de processo abrasivo, proporcionadas pelos diferentes tamanhos de grãos de carboneto do material usinado resultando em sulcos de diferentes tamanhos no flanco das ferramentas, para todos os materiais usinados.

2.6 TORNEAMENTO DE AÇOS TEMPERADOS E REVENIDOS

O torneamento de materiais endurecidos é definido como o processo de corte de gume único em peças com valores de dureza acima de 45 HRC, tipicamente entre 58-65 HRC (PAULACHON, 2001; Özel *et al.*, 2005; LAHIFF *et al.*, 2007; DOGRA *et al.*, 2010; BARTARYA e CHOUDHURY, 2012), com uso de uma variedade de ferramentas de corte de metal-duro, materiais cerâmicos e também PCBN. Desde a introdução do torneamento de materiais endurecidos, em meados da década de 1980, este tem aumentado em popularidade, aumentando significativamente a utilização de ferramentas de PCBN.

Os sistemas de usinagem também contribuem para a qualidade e repetibilidade do processo. Dentre estes sistemas são destacados por Chryssolouris e Tönshoff (1982) e Klocke e Kratz (2005) o sistema ferramenta de corte (fixação do inserto e do suporte, tipo de castelo), o sistema peça-sistema de fixação (placa de castanhas, pinça, contraponto), o sistema máquina-ferramenta (eixo árvore, as guias e os fusos de avanço, tipo de estrutura da máquina). KÖNIG *et al.* (1984) mencionaram que os pré-requisitos para o sucesso da usinagem de peças curtas e rígidas fabricadas em ligas de aços temperados e revenidos incluem: uso de uma máquina ferramenta extremamente rígida e de alta exatidão, material da ferramenta muito duro e resistente, microgeometria da ferramenta com ângulo negativo e grande ângulo de cunha, microgeometria da cunha resistente com chanfro ou raio apropriado, gume da ferramenta arredondado, suportes de ferramenta com alta rigidez e condições apropriadas de corte. A escolha das ferramentas precisa ser feita de acordo com a aplicação, a produção desejada e as metas dos custos operacionais.

Nem todas as máquinas são satisfatórias para operações de torneamento de aços temperados e revenidos. Empregando-se máquinas rígidas, precisas e com boa repetibilidade de posicionamento, é comum que a superfície da peça endurecida após torneamento, tenha a precisão desejada e acabamento próximo ou igual ao obtido pelo processo de retificação.

Algumas vantagens da tecnologia do torneamento de materiais endurecidos citados por Huddle (2001) são:

- o torno oferece versatilidade para torneamento de materiais macios e endurecidos, na mesma máquina ferramenta;
- uso de ferramentas com gume único para torneamento de contornos complexos, sem a necessidade de custos com rebolos de formas complexas;
- múltiplas operações podem ser realizadas com um único *set-up*, resultando em menos manipulação e possibilidade de erros nas

peças;

- torneamento de materiais temperados e revenidos pode alcançar acabamento de superfície cujas rugosidades R_z variam de 0,1 μm a 0,4 μm ;
- inventário de ferramentas é menor em relação ao processo de retificação.

O desenvolvimento simultâneo de máquinas e ferramentas foi fundamental para aumentar o uso e aplicações de ferramentas de PCBN. Atualmente, tornos de alta precisão estão disponíveis e em uso, proporcionando que peças de altíssima precisão dimensional e qualidade de acabamento de superfície sejam torneadas (CHRYSSOLOURIS e TOENSHOFF, 1982; BYRNE *et al.*, 2003; KLOCKE e KRATZ, 2005).

A Figura 16 mostra as interações entre as diversas características do processo de usinagem que permitem avaliar o desempenho de uma ferramenta de corte no torneamento de materiais temperados e revenidos. Para avaliar a produtividade outras considerações devem ser feitas com relação ao custo de máquina e mão de obra, tempo de máquina, taxa de remoção de material e número de peças produzidas, entre outras.

Figura 16 - Representação dos fatores que influenciam o desempenho da usinagem no torneamento.



Fonte: Adaptado de BYRNE *et al.* (2003).

Tornos de alta precisão e elevada rigidez proporcionam torneamento de peças duras que necessitem de maior exatidão

dimensional e melhor qualidade de acabamento da superfície (TÖNSHOFF *et al.*, 2000; BYRNE *et al.*, 2003; KLOCKE e KRATZ, 2005). Estas máquinas são projetadas para atender aos requisitos de precisão geométrica, cinemática e rigidez do sistema. O emprego de máquinas com estas características permite a produção de peças de alta qualidade, como componentes de transmissão e rolamentos.

É importante que o equipamento, para trabalhar com usinagem de materiais endurecidos, opere com baixos níveis de vibração e com faixa de frequência de ressonância alta. O acabamento da superfície e a vida da ferramenta são ditados pela rigidez dinâmica da máquina-ferramenta fazendo com que esta seja uma característica vital para o bom desempenho do processo. Para aumentar a rigidez dinâmica é necessário aumentar o amortecimento, sendo este alcançado através do uso de tecnologias, como por exemplo, bases preenchidas com compósitos poliméricos e sistemas de fusos e guias hidrostáticos (KUSHNIR *et al.*, 2001). Compósitos poliméricos nas bases de máquinas fazem com que características de amortecimento sejam menores (em torno de 1,5 a 2 vezes), do que em máquinas com base de ferro fundido, sem perder a rigidez (KUSHNIR *et al.*, 2001). Dependendo do desempenho e custos, a base pode ser toda de compósito polimérico ou fundido convencional com cavidades preenchidas estrategicamente com compósitos poliméricos.

Com isto obtém-se uma característica da dinâmica da máquina-ferramenta que garante maior vida de ferramenta. Com baixos níveis de vibração se pode explorar melhor a capacidade do material da ferramenta de corte.

2.6.1 Exatidão da máquina-ferramenta

A exatidão proporcionada por uma máquina-ferramenta durante a usinagem é consequência de uma série de considerações que abrangem o projeto da máquina, sua construção e seu uso adequado.

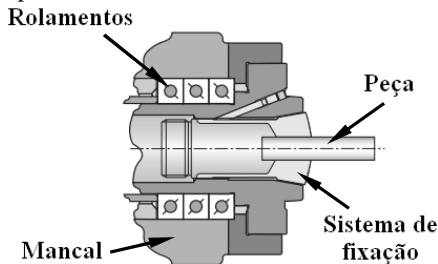
No projeto considera-se a estrutura da máquina ferramenta (fundida, soldada, concreto polimérico e combinações das anteriores), os elementos de movimentação (guias, mancais, trocadores de ferramentas), os atuadores dos sistemas de movimentação (motores elétricos, sistemas hidráulicos), o projeto térmico da máquina-ferramenta (motores internos à estrutura, motores externos à estrutura), sistemas de estabilização da temperatura (circulação de ar, líquido, tubos de calor, barras de cobre embutidas na estrutura). Observa-se também as características dimensionais dentro de tolerâncias mais estreitas que em

máquinas convencionais. Para atingir este objetivo considera-se a fundição, o resfriamento (eventualmente o envelhecimento natural ou forçado), a usinagem, o ajuste, a montagem e a aferição.

Na sua utilização, o ambiente de trabalho deve ser adequado à aplicação. Ambientes termicamente controlados podem atingir o rigor de um ambiente de metrologia para calibração de blocos padrão.

A exatidão da máquina, apesar de crítica, é derivada de um conjunto de elementos, como: resolução dos eixos, características de controle, compensação de erros, alinhamentos geométricos, rigidez do eixo-árvore e efeito de distorções da geração de corrente térmica de calor de fontes internas e externas. Quanto ao eixo-árvore e ao suporte de ferramentas, um processo de torneamento de materiais endurecidos necessita de eixo-árvore e suporte de ferramenta rígidos. Outra característica é a da posição e do sistema de fixação das peças que devem ser o mais próximo do mancal dianteiro (Figura 17).

Figura 17 - Fixação para torneamento de materiais endurecidos.



Fonte: Adaptado de HARDINGEUS (2009).

Segundo Hardingeus (2009), para ter sucesso no processo de usinagem de materiais endurecidos, se faz necessária uma máquina com alta rigidez dinâmica; dispositivos eficientes de fixação; correta escolha da classe de ferramentas; alta qualidade dos gumes; suportes de ferramenta rígidos; parâmetros de usinagem apropriados; fixação da peça de forma que a parte a ser usinada fique rígida; e de sistemas de lubrificarrefrigeração.

2.6.2 Torneamento longitudinal ortogonal

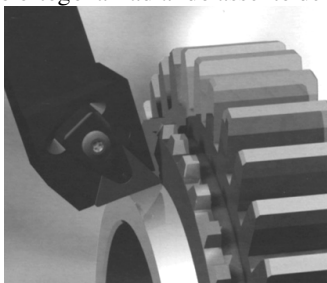
O processo de torneamento longitudinal ortogonal é um processo no qual o gume principal da ferramenta gera a superfície da peça acabada. É possível trabalhar com gumes retilíneos e com gumes de forma livre. Num processo bem controlado e com ferramentas afiadas

adequadamente com elevada resistência de gume são produzidas peças com qualidade microgeométrica comparável à obtida pela retificação (HUDDLE, 2002). Na operação de torneamento longitudinal ortogonal a extensão do gume empregado (largura de usinagem) se reflete no acabamento da superfície usinada. As estrias produzidas sobre a superfície usinada são concêntricas. O processo é empregado na produção de componentes anelares de aço temperado e revenido sendo considerada uma forma altamente produtiva para torneamento de materiais endurecidos de anéis de assentos de válvulas.

Quando se emprega o torneamento longitudinal ortogonal, o gume responsável pela produção da superfície usinada (igual à superfície de corte) percorre um percurso muito menor que a quina do inserto no faceamento convencional, de forma que se obtêm vidas mais longas da ferramenta de corte, para a mesma qualidade final do componente usinado. A qualidade da superfície usinada obtida em anéis de válvulas de motores obtidas por torneamento longitudinal ortogonal e propriedade de vedação é igual ou melhor do que superfícies retificadas (HUDDLE, 2002).

O conceito de torneamento ortogonal (Figura 18) não é uma idéia nova, mas está sendo aplicada na usinagem de materiais endurecidos.

Figura 18 - Torneamento ortogonal radial do assento de um anel sincronizador

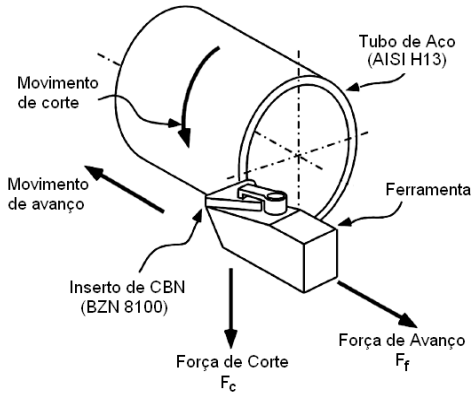


Fonte: SECO TOOLS (2005).

No torneamento ortogonal os tempos podem ser reduzidos em torno de 60% em relação ao torneamento convencional de materiais endurecidos e em até 90% em relação ao processo de retificação (HUDDLE, 2001). Nessa estratégia pode ser utilizada largura de usinagem com base na largura do gume do inserto.

O torneamento ortogonal de tubos de aço AISI H13 com altas velocidades de corte foi utilizado por Özel (2003) (Figura 19).

Figura 19 - Representação esquemática do torneamento longitudinal ortogonal.



Fonte: Adaptado de ÖZEL (2003).

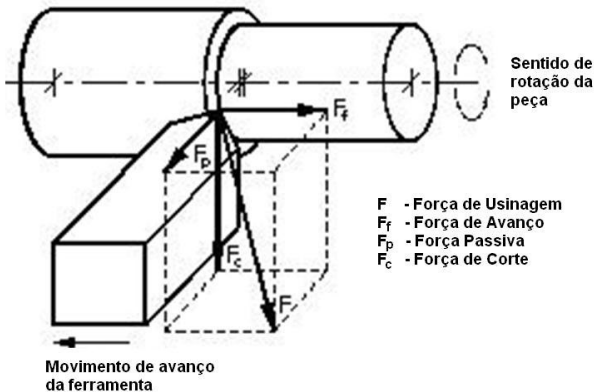
2.7 FORÇA DE USINAGEM

A força de usinagem “F” é a força que atua sobre a cunha da ferramenta durante a operação de usinagem (Figura 20).

Ela pode ser decomposta em componentes num sistema cartesiano que coincide com o sistema de coordenadas da máquina ferramenta: força de corte (F_c), força de avanço (F_f) e força passiva (F_p),

A importância de correlacionar as componentes da força de usinagem com o desgaste da ferramenta em operações de corte com ferramentas de geometria definida foi abordada por König *et al.* (1972).

Figura 20 - Componentes da força de usinagem no torneamento.



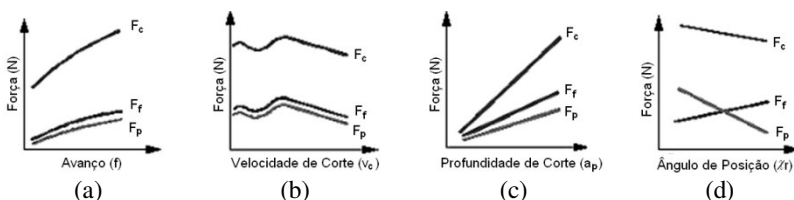
Fonte: Adaptado de VIEREGGE (1959).

Conhecer a grandeza e a direção da força de usinagem é considerado básico para projeto de máquina-ferramenta que envolve o dimensionamento da estrutura, acionamentos, fixação da ferramenta, guias, entre outros elementos. O conhecimento dessas grandezas é útil para determinar as condições de corte e para avaliar a exatidão de uma máquina-ferramenta em condições de trabalho preestabelecidas (deformação da peça e da máquina).

2.7.1 Influências dos parâmetros de corte e geometria da ferramenta sobre as componentes da força de usinagem

A utilização de parâmetros de corte, meio lubrificante e ferramenta de corte, influenciam as componentes da força e a potência de usinagem. Alteração em qualquer uma dessas variáveis de entrada vem a alterar os valores da força e da potência de usinagem. As dependências das componentes da força de usinagem apresentadas por König (1981) são apresentadas na Figura 21. Esta apresenta, qualitativamente, a dependência das componentes da força de usinagem em função dos parâmetros de corte (v_c , f , a_p) e do ângulo de posição do gume (χ_r).

Figura 21 - Dependência das componentes da força de usinagem.



Fonte: KÖNIG (1981).

Em relação à influência do avanço, seu aumento mostra um decréscimo nas três componentes da força de usinagem e com isto melhor eficiência na remoção de material, Figura 21a.

König (1981) observou que as componentes da força de usinagem diminuem com o aumento da velocidade de corte, Figura 21b, devido à redução da resistência do material em altas temperaturas. Também verificou que o aumento da profundidade de usinagem faz com que um maior volume de material seja retirado através da utilização de uma maior porção do gume da ferramenta, fazendo com que haja um

aumento nas componentes da força de usinagem, mostrada na Figura 21c.

O ângulo de direção do gume (χ_r) ao ser aumentado de 0 até 90° faz com que as componentes passiva (F_p) e de corte (F_c) da força de usinagem diminuam e componente de avanço (F_f) aumente, Figura 21d. O ângulo de direção do gume de 90° acarreta em menor força de corte, pois apresenta a maior espessura de usinagem, sendo que a variação deste ângulo causa alteração da geometria da seção do cavaco e mudanças na direção do cavaco. A força passiva para ângulos de direção do gume maiores que 90° pode se tornar negativa. Para Stemmer (1995), a diminuição do ângulo de direção, tem as seguintes funções e vantagens: distribuir as tensões de corte favoravelmente no início e fim de corte, diminuir a espessura do cavaco e aumentar o comprimento atuante do gume, aumentando a resistência mecânica e a dissipação de calor. O ângulo de direção atua na força passiva na ferramenta ajudando a diminuir e também eliminar eventuais vibrações, atuando também na alteração da direção de saída do cavaco.

Além do ângulo de direção do gume, em relação à geometria da ferramenta tem-se o ângulo de inclinação, o de incidência e o de saída. Todos, de uma forma ou outra, influenciam as componentes da força de usinagem.

O ângulo de inclinação, quando negativo, origina maior força passiva e deve ser empregado quando a máquina e ferramenta possuem suficiente rigidez (FERRARESI, 1977). Sua influência é maior sobre a força passiva do que sobre as demais, tendo as seguintes funções: controlar a direção de saída do cavaco, proteger a quina da ferramenta contra impactos e atenuar vibrações. Além de influir decisivamente na força de usinagem, também influencia na potência necessária ao corte, no acabamento da superfície usinada e no calor gerado (STEMMER, 1995).

O aumento do ângulo de saída (γ) leva à redução das componentes da força de usinagem (ASME, 1985).

O ângulo de incidência tem como principal função diminuir o atrito entre a superfície de corte e a superfície de incidência da ferramenta e, assim, permitir que o gume corte livremente o material. A limitação do aumento do ângulo de incidência está no enfraquecimento da cunha de corte (FERRARESI, 1977). Quando este ângulo é demasiadamente grande, o gume tende a quebrar, em virtude de seu enfraquecimento (STEMMER, 1995).

Outra influência é o raio de quina da ferramenta (r_ϵ), onde seu

aumento torna a quina mais resistente, mas aumenta a vibração devido ao aumento do atrito causado pelo maior comprimento de contato entre a quina da ferramenta e a peça (FERRARESI, 1977).

2.8 CONSIDERAÇÕES FINAIS SOBRE O ESTADO DA ARTE

Neste capítulo, buscou-se reunir, de forma resumida, o estado da arte relacionada à metalurgia do pó, usinagem de materiais temperados e revenidos, desgaste e mecanismos de desgaste em ferramentas de PCBN, critérios de fim de vida, ferramentas de PCBN, tipos de aplicações, visando obter subsídios para a formulação, análise dos experimentos e conclusões desenvolvidas neste trabalho. Nesta revisão verificou-se que os desgastes e mecanismos de desgastes variam com relação à microgeometria do gume da ferramenta, ao material usinado e sua dureza. Para o teor de grãos de CBN do inserto, verificou-se que ocorrem diferenças quanto à maior e menor quantidade de grãos.

Com relação à influência da velocidade de corte sobre a vida da ferramenta de PCBN, verifica-se que seu aumento está relacionado diretamente com desgaste da ferramenta. Não foram encontrados trabalhos que elucidem a influência da microgeometria do gume no comportamento de desgaste das ferramentas de PCBN para a liga dos anéis utilizados nesta pesquisa, que é uma liga específica para a aplicação em sede de válvulas de motores de combustão interna.

Assim, evidencia-se a necessidade de pesquisas que esclareçam o desgaste e seus mecanismos atuantes na usinagem do aço rápido obtido por metalurgia do pó, temperado e revenido, quando utilizados diferentes geometrias de gume da ferramenta, diferentes porcentagens de CBN e com variação da velocidade de corte. Por isto a importância de realização de pesquisas quanto à aplicabilidade das ferramentas de PCBN e suas características geométricas em estratégias de usinagem de torneamento longitudinal ortogonal, ao usinar aço rápido temperado e revenido, obtido por metalurgia do pó, na otimização de processos.

3 METODOLOGIA, EQUIPAMENTOS E MATERIAIS

3.1 METODOLOGIA

Para verificar a influência do gume chanfrado com arredondamento e gume apenas arredondado em ferramentas de baixo e alto teor de CBN e para a variação da velocidade de corte, sobre o desgaste e sobre os mecanismos de desgastes destas ferramentas, a metodologia empregada consistiu na realização de ensaios sistemáticos de torneamento ortogonal longitudinal em corpos de prova (anéis) fabricados por metalurgia do pó em aço rápido M2 modificado, temperado e revenido. O resultado do desgaste das ferramentas foi documentado com imagens ópticas e medições das grandezas dimensionais significativas do desgaste de flanco. Os resultados dos valores medidos são representados graficamente para melhor interpretação. Os ensaios contemplam também a medição das componentes da força de usinagem.

Inicialmente o contato com o cliente parceiro estabeleceu a escolha do material de ensaios, material de ferramentas de corte, projeto e fabricação de dispositivos, elaboração do programa para aquisição de dados e montagem do sistema de aquisição de dados. O aço M2, obtido por metalurgia do pó, dos corpos de prova, foi escolhido como material devido à necessidade de informações referentes à sua usinagem e as ferramentas de PCBN, devido a sua característica para usinagem de materiais de difícil usinabilidade.

A escolha da forma anelar do material dos corpos de prova deve-se em função desta ser uma das principais formas de componentes da linha de produção da empresa parceira e por apresentar sérios problemas de desgaste e avarias nas ferramentas de PCBN no processo de usinagem. Para a realização dos ensaios foram fornecidos 7.000 anéis.

Na sequência foram realizados os ensaios de vida, no torneamento ortogonal longitudinal dos anéis com medição dos desgastes de flanco e medição das componentes da força de usinagem.

Para a fixação dos insertos de PCBN foi empregado um suporte com sistema de fixação rígida. Foram empregados suporte e ferramentas da empresa SECO TOOLS®.

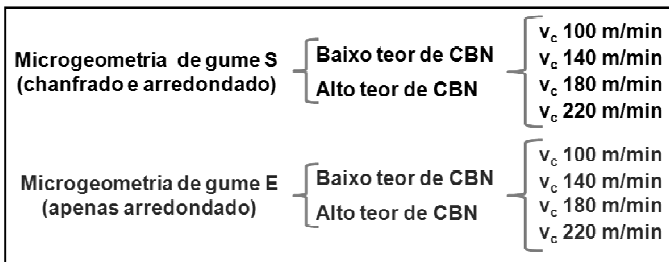
Os ensaios de torneamento dos corpos de prova, feitos no laboratório do Núcleo de Desenvolvimento Tecnológico (NDT) do SENAI-CETEMP-RS, foram realizados para determinar o comportamento de desgaste das ferramentas de PCBN. Depois de concluída cada etapa de usinagem, as ferramentas de PCBN foram

documentadas fotograficamente em microscópio eletrônico de varredura (MEV) para auxiliar na análise dos desgastes. Em cada inserto, na região da marca de desgaste de flanco, foram efetuadas análises químicas por (EDS) para identificar os elementos aderidos.

3.1.1 Sistemática dos ensaios

Os ensaios seguiram a sistemática apresentada na Figura 22. Essa sistemática contou com duas geometrias de gume, onde em cada microgeometria foi variado dois teores de CBN. Para cada teor de CBN utilizou-se quatro velocidades de corte.

Figura 22 - Sistemática utilizada nos ensaios.



Os ensaios não tiveram repetições devido à morosidade dos ensaios e ao custo elevado dos materiais (tanto das peças como das ferramentas). Assim, os resultados foram analisados com base em resultado de testes únicos.

3.1.2 Bancada de ensaios

A bancada de ensaios é constituída de um torno comandado numericamente (B). Esta dispõe de um dinamômetro piezelétrico para a medição da força de corte e força de avanço (A), amplificadores de carga com saída proporcional de tensão (C), placa de aquisição e conversão de sinais (D) e um computador *laptop* com *software* LabView® (E), Figura 23, cujas características são descritas na Tabela 1.

Figura 23 - Sistema experimental para aquisição de F_c e F_f .

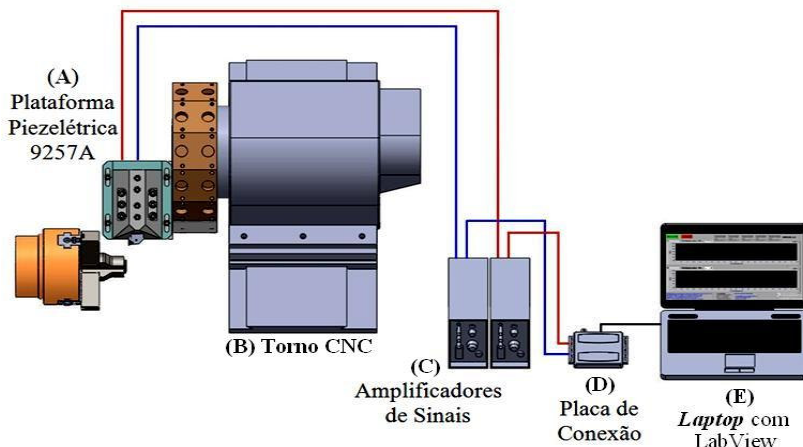


Tabela 1 - Descrição do sistema experimental de aquisição (F_c e F_f).

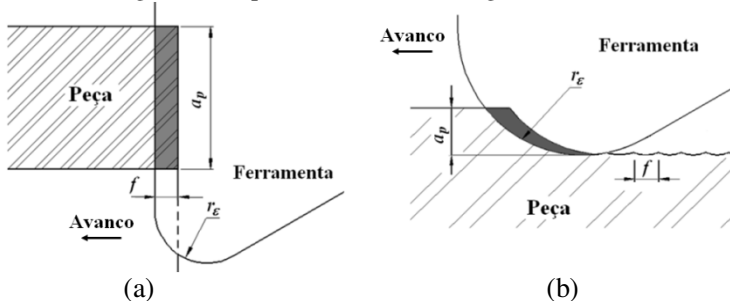
A. Aquisição de sinais de força	Plataforma de medição piezelétrica das componentes da força de usinagem.
B. Usinagem	Torno horizontal CNC.
C. Condicionamento de Sinais (amplificação e filtragem)	Amplificador de sinais que converte sinais de carga elétrica geradas por transdutores piezelétricos à base de cristais de quartzo, em tensão proporcional.
D. Condicionamento de sinais (conversão A/D)	Placa de aquisição de dados NI 6009 com taxa amostragem de 48 KS/s. Permite a conversão dos sinais analógicos oriundos dos condicionadores para sinais digitais que serão tratados e armazenados no computador.
E. Tratamento, armazenamento dos dados e visualização	Compreende toda a manipulação dos sinais digitais convertidos na etapa anterior, os quais serão armazenados e visualizados na última etapa.

3.1.3 Estratégia dos ensaios

O processo de usinagem adotado para a análise da influência da macro e microgeometria do gume da ferramenta, do teor de CBN e da velocidade de corte foi o de torneamento longitudinal ortogonal. Neste processo, a geometria do gume da ferramenta é espelhada sobre a espessura da parede do corpo de prova anelar e permite a investigação da influência da geometria do gume da ferramenta, do teor de CBN e da

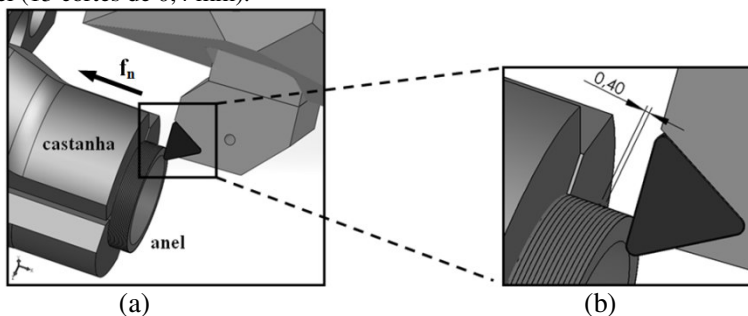
velocidade de corte sobre o desgaste da ferramenta. Na Figura 24a, está representada esquematicamente a geometria da seção de usinagem para o corte ortogonal e na Figura 24b, para o torneamento longitudinal. A figura mostra que para o torneamento ortogonal a largura do gume ativo está espelhada sobre o corpo de prova, ao passo que para o torneamento longitudinal apenas parte da região da quina é visível no corpo de prova. A interpretação do resultado para o corte ortogonal é simplificada pelo fato de a seção de usinagem ser retangular, ao passo que a seção de usinagem sobre a região da quina é em forma de vírgula, com espessura variada, apresentando maior dificuldade com relação à interpretação dos resultados.

Figura 24 - Representação esquemática da superfície de corte para o (a) torneamento ortogonal e (b) para o torneamento longitudinal.



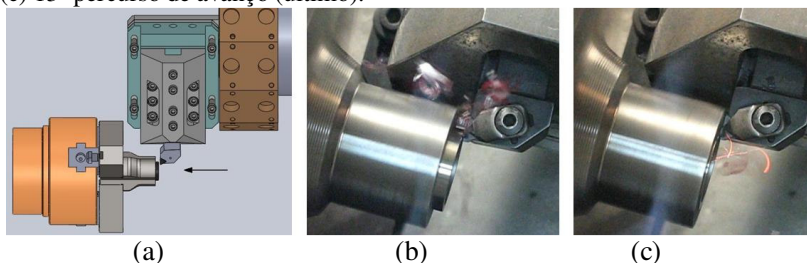
Os anéis são fixados na placa autocentrante do torno em castanhas específicas, num comprimento de 3,6 mm. O torneamento ortogonal de 5,2 mm de cada anel, com um comprimento total de 9,5 mm, foi realizado em 13 etapas, com 0,40 mm de percurso de corte com avanço (f_n) de 0,05mm/rot. O comprimento de corte médio em cada anel compreende 8,652 m. O percurso de avanço de 0,40 mm equivale à usinagem de um anel na aplicação industrial. Após cada percurso de 0,4 mm o sentido do avanço é invertido e a ferramenta (eixo Z) recua por 0,6 mm em G01 com a mesma velocidade de avanço. A distância adotada entre os cortes de 0,6 mm foi para que a aceleração e a desaceleração do carro de longitudinal não influenciasse nos resultados do ensaio. A Figura 25a mostra, de forma esquemática, o anel fixado nas castanhas e a Figura 25b, a estratégia de corte com as divisões que representam o comprimento do corte (0,40mm) sobre a superfície do anel.

Figura 25 - Representação esquemática do ensaio de torneamento ortogonal do anel (13 cortes de 0,4 mm).



A Figura 26 mostra o torneamento longitudinal de um anel (Figura 26a esquemático, Figura 26b o primeiro corte e Figura 26c o último corte (13°)).

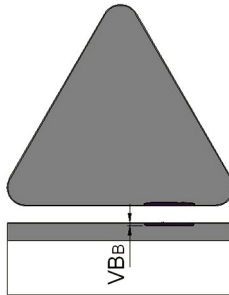
Figura 26 - (a) Torneamento ortogonal de um anel (b) 1° percurso de avanço e (c) 13° percurso de avanço (último).



3.1.4 Medição do desgaste de flanco

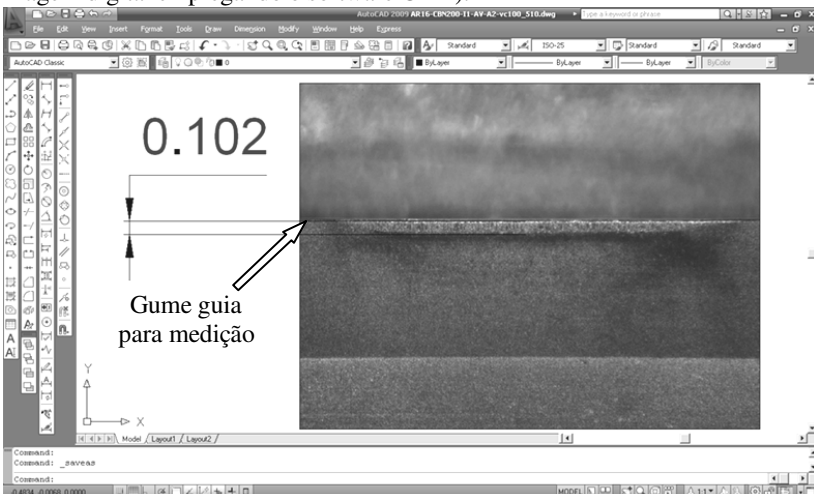
O procedimento para medir o desgaste da ferramenta de PCBN consistiu na remoção do inserto após a usinagem de 20 anéis, limpeza e colocação do inserto num dispositivo fixado ao microscópio Zeiss, modelo Stemi SV6. A imagem do desgaste de flanco e da superfície na região de corte foi obtida com uma câmera digital Canon Power Shot A640. Após a obtenção, as imagens foram armazenadas em computador com auxílio do *software* AxioVision. As imagens eram exportadas para o *software* CAD (AutoCAD® 2009). O programa CAD permite a medição do desgaste para armazenagem dos valores em uma planilha. A Figura 27 mostra, de forma esquemática, porém proporcional, a localização dos desgastes de flanco e de cratera.

Figura 27 - Representação esquemática da posição do desgaste de flanco e de cratera na ferramenta.



Após a obtenção das imagens do flanco e da face do inserto, o mesmo era recolocado e fixado no suporte para continuação dos ensaios. Os ensaios eram terminados quando o desgaste de flanco VB_B de 0,10 mm fosse atingido ou se ocorressem lascamentos e/ou quebra da ferramenta. A medição do desgaste de flanco teve como posição inicial de medição, o gume original da ferramenta situado antes e após a região do desgaste, Figura 28. Essa sistemática permitiu que o desgaste ocorrido na superfície do inserto não influenciasse nos valores do desgaste de flanco adquiridos.

Figura 28 - Marca de desgaste de flanco limite (medição feita sobre uma imagem digital empregando o software CAD).

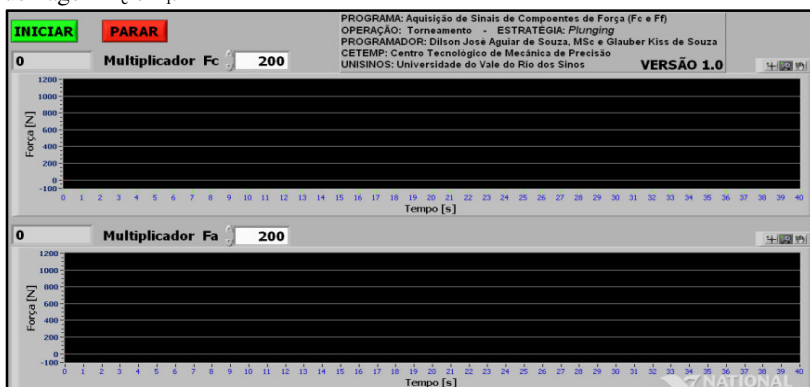


Para cada tipo de pastilha de PCBN foram realizados 4 ensaios (quatro velocidades), totalizando 16 ensaios (duas geometrias de gumes e dois teores de CBN). Nestes ensaios, durante a usinagem de cada vigésimo anel, foi realizada a aquisição dos valores da força de corte (F_c) e da força de avanço (F_f).

3.1.5 Aquisição da F_c e F_f

Para adquirir sinais de F_c e F_f , foi desenvolvido um programa computacional (VI - *Virtual Instrument*) empregando o *software* LabView[®] que, além de mostrar os valores de gráficos durante os ensaios, armazena estes valores no disco rígido de um computador. A Figura 29 mostra a tela do computador o *software* para aquisição da força de corte (F_c) e força de avanço (F_f).

Figura 29 - Tela do computador para aquisição das componentes da força de usinagem F_c e F_f .



Os tempos relacionados à usinagem de um anel são apresentados na Tabela 2.

Tabela 2 - Tempos obtidos relacionado a usinagem de um anel.

vc [m/min]	Tempo total de corte [s]	Tempo total em vazio [s]	Tempo total de corte efetivo [s]	Tempo em vazio entre cortes [s]	Tempo de um corte [s]	Rotação [rpm]	fn [mm/min]
100	27,3	22,1	5,2	2,76	0,65	1110	56
140	21,9	17,9	4,1	2,23	0,51	1554	78
180	16,4	13,2	3,2	1,66	0,40	1998	100
220	11,0	8,4	2,6	1,05	0,32	2443	122

3.2 EQUIPAMENTOS

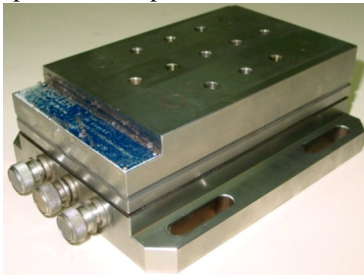
A máquina-ferramenta utilizada nos ensaios foi um torno horizontal CNC (Figura 30), fabricante ROMI[®], modelo GALAXY 20, comando GE Fanuc *Series 20iT*, rotação máxima de 5.000 rpm e potência de acionamento de 27 kW. A plataforma piezelétrica foi fixa na torre porta-ferramentas num dispositivo projetado e fabricado especialmente para os ensaios.

Figura 30 - Torno CNC fabricante ROMI[®], modelo Galaxy 20.



Para a medição das componentes da força de usinagem (F_c e F_f) foi utilizada uma plataforma piezelétrica, tipo 9257A, marca Kistler[®] (Figura 31), calibrada (para eixo Z, -3,77 pC/N; para o eixo X, -6,36 pC/N).

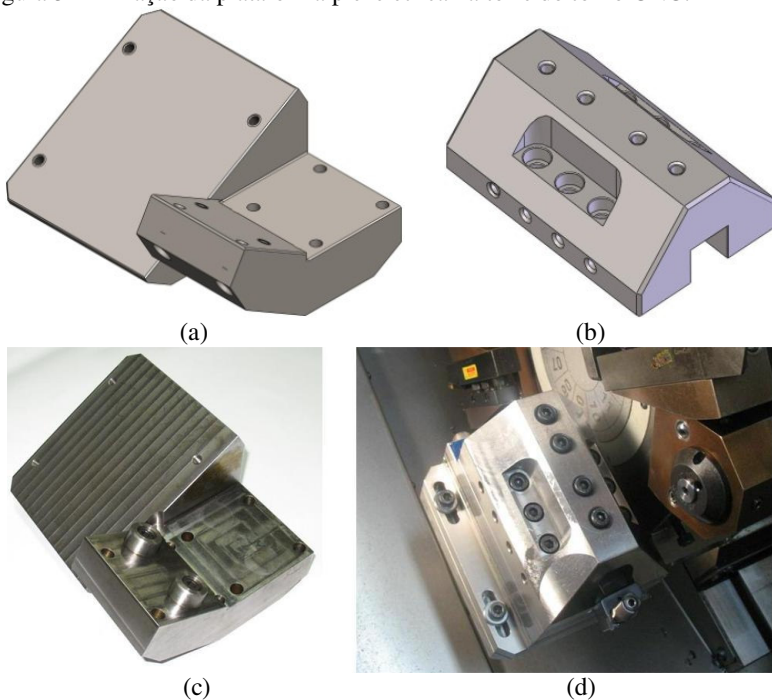
Figura 31 - Plataforma piezelétrica tipo 9257A, marca Kistler[®].



A plataforma piezelétrica foi fixada na torre de ferramentas do torno CNC, por uma base fabricada em aço SAE 1045, Figura 32a e Figura 32c. A haste suporte da pastilha foi montada sobre a plataforma piezelétrica por um dispositivo também fabricado em aço SAE 1045,

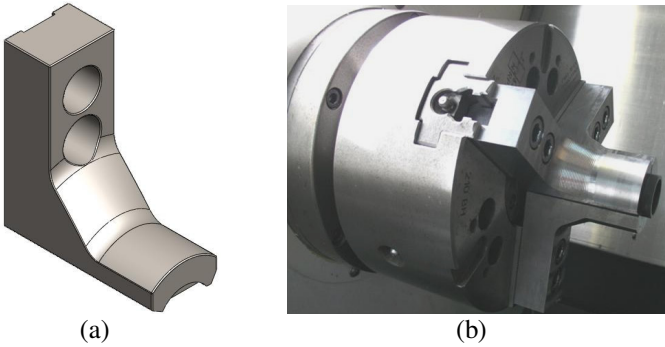
Figura 32b. Já a Figura 32d mostra a plataforma piezelétrica integrada no torno, fixada na torre, ocupando duas posições de ferramentas na torre.

Figura 32 - Fixação da plataforma piezelétrica na torre do torno CNC.



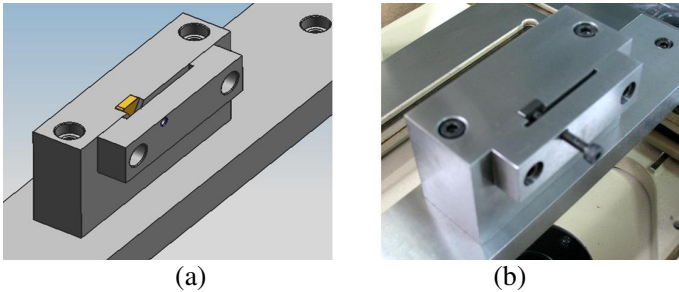
A fixação dos corpos de prova foi feita em placa autocentrante cujas castanhas foram especialmente fabricadas para este objetivo. Para obter rigidez e estabilidade dinâmica do sistema de fixação do corpo de provas, foram fabricadas castanhas que permitiram a fixação em quase toda a circunferência do diâmetro externo do anel. As castanhas foram confeccionadas também em aço SAE 1045, levando em consideração os requisitos de posição do suporte da ferramenta na plataforma piezelétrica, Figura 33.

Figura 33 - (a) Castanha e (b) placa com as castanhas.



Para permitir uma medição do desgaste de flanco do inserto de PCBN com repetibilidade de posicionamento, foi fabricado o dispositivo mostrado na Figura 34.

Figura 34 - Dispositivo de fixação da pastilha para medição da marca de desgaste de flanco.



Para a obtenção das imagens MEV e EDS foram empregados os microscópios eletrônicos de varredura da marca HITACHI, modelo TM3000 e ZEISS modelo SV6, Figura 35a e Figura 35b. Os dados coletados, através das imagens MEV e da análise química EDS do material aderido no flanco da ferramenta, foram analisados e empregados na formulação de novos conhecimentos e hipóteses, para explicar o desgaste e os mecanismos de desgastes atuantes nos inserts de PCBN na usinagem do aço rápido produzido por metalurgia do pó temperado e revenido.

Figura 35 - Microscópio Eletrônico de Varredura (a) Hitachi (b) e ZEISS.



As imagens obtidas por MEV propiciaram a verificação microscópica da superfície do inserto, objetivando a compreensão dos mecanismos de desgaste atuantes na usinagem da liga em estudo. As análises EDS contribuíram no entendimento da presença de elementos aderidos na região da superfície e da face do chanfro.

3.3 FERRAMENTAS DE CORTE E MATERIAIS DOS CORPOS DE PROVA

A escolha da melhor microgeometria do gume para o processo de usinagem depende do material da ferramenta, do material da peça e também das condições de corte. Através de estudos objetiva-se compreender as influências da microgeometria do gume da ferramenta sobre o desgaste da ferramenta e sobre as componentes da força de usinagem. A seguir são apresentadas as ferramentas e condições de corte para identificar a microgeometria de gume mais propícia para usinar aço rápido obtido por metalurgia do pó temperado e revenido.

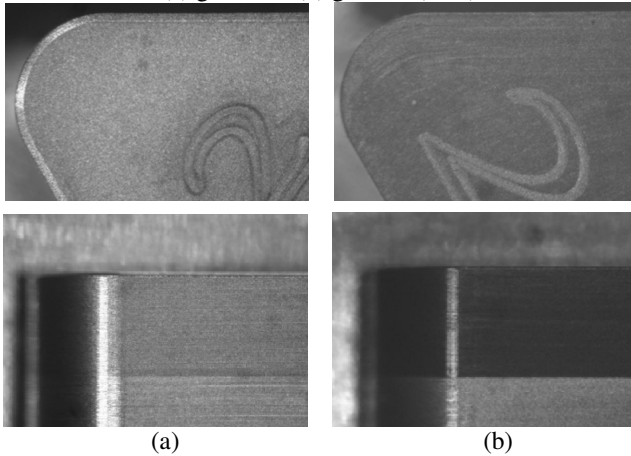
3.3.1 Suporte e insertos

Para garantir a rigidez na fixação do inserto, utilizou-se um suporte CTJNL2525M11, com ângulo de incidência (α) 6° , ângulo de saída (γ) de -6° , ângulo de inclinação (λ) de -6° , ângulo de direção do gume de (χ_r) 95° , fabricante Seco Tools.

Com base na revisão bibliográfica e aplicações em setores produtivos, optou-se por insertos de baixo e alto teor de CBN (CBN10 e CBN200), com microgeometria de gume S (chanfrado com arredondamento, Figura 36a) e E (apenas arredondado, Figura 36b), ambas com tamanho médio de grão de $2,0 \mu\text{m}$. Foram utilizados insertos

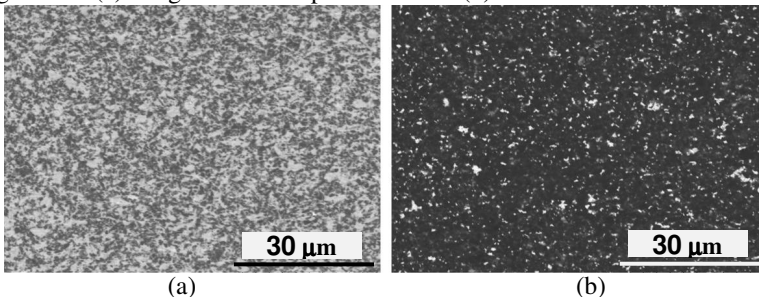
com uma camada de PCBN aplicada sobre toda a extensão de um substrato de metal-duro (código LF - *full layer*). A forma S apresenta chanfro com ângulo de 20° e largura de chanfro (W) de 0,10 mm com raio de arredondamento do gume (r_β) de aproximadamente 0,025 mm e a apenas arredondada, um raio de arredondamento do gume (r_β) em torno de 0,015 mm. Os códigos dos inserts utilizados foram TNGN110308S-LF-CBN200, TNGN110308E-LF-CBN200, TNGN110308S-LF-CBN10 e TNGN110308E-LF-CBN10.

Figura 36 - Ferramentas (a) gume S e (b) gume E (20X).



Na Figura 37 são mostradas imagens dos inserts, obtidas em MEV, das duas classes utilizadas nos ensaios, onde a parte escura são os grãos de CBN e a clara, o ligante. A Figura 37a mostra a imagem do inserto de baixo teor CBN, e a Figura 37b inserto com alto teor de CBN.

Figura 37 - (a) Imagem de MEV para CBN10 e (b) CBN200.



As características técnicas dos insertos são mostradas na Tabela 3 (Seco Tools, 2005).

Tabela 3 - Propriedades do material das ferramentas de PCBN.

Classe	Ligante	Dureza Knoop [GPa]	Tamanho médio dos grãos [μm]	Condutividade de Térmica [W/mK]	CBN [Vol. %]	Tenacidade
CBN10	Cerâmico (TiN)	27,5	2	44	50	Menor
CBN200	Metálico (Co-W-Al)	28,4	2	94	85	Maior

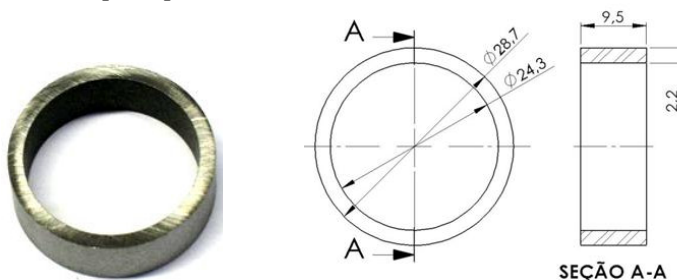
Fonte: Adaptado de Seco Tools (2006).

3.3.2 Corpos de prova

Os corpos de prova em forma de anel, Figura 38, utilizados nos ensaios são obtidos por metalurgia do pó com composição química base do aço rápido M2. O anel tem diâmetro externo de 28,7 mm, espessura de parede de 2,2 mm e comprimento de 9,5 mm. Os anéis são retificados nas duas faces e no diâmetro externo com a finalidade de garantir as dimensões e as geometrias de projeto.

Para confiabilidade do processo de usinagem dos corpos de prova, fez-se necessário a verificação dimensional. Para isto retirou-se uma amostra de anéis na qual foram realizadas as medições do comprimento, diâmetro externo e diâmetro interno utilizando micrômetro interno milesimal. Os valores apresentaram os seguintes medidas: comprimento de 9,50 mm; diâmetro externo de 28,67 mm e diâmetro interno de 24,29 mm. As diferenças dimensionais entre os corpos de prova não são significativas tornando possível realizar a usinagem de forma sistemática em todos os anéis.

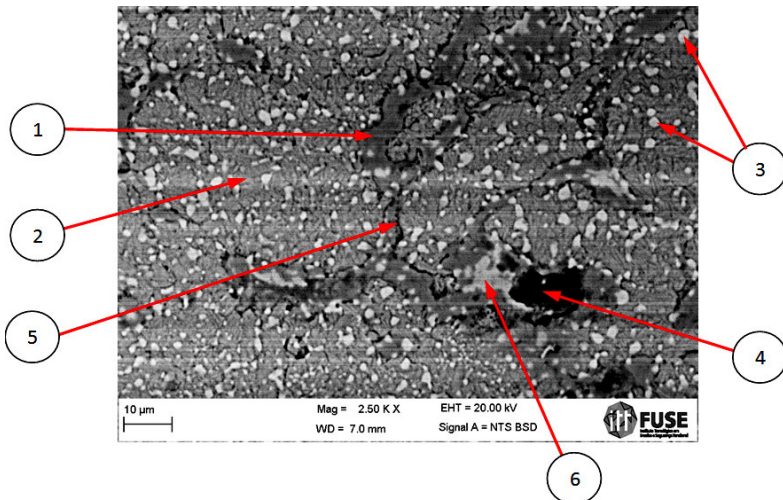
Figura 38 - Corpo de prova e dimensões.



Todos os corpos de prova são oriundos de um mesmo lote de fabricação e apresentam dureza aparente de 350 a 450 HB, depois de temperadas e revenidas. Esse baixo valor para a dureza é devido as peças obtidas por metalurgia do pó apresentam uma porosidade residual fazendo com que o penetrador encontre menor resistência à penetração durante a medição da dureza.

O material dos anéis possui estrutura martensítica com carbonetos esferoidizados e lubrificante sólido (MoS_2) uniformemente distribuído, com composição química modificada, em relação à liga M2, apresentada na Figura 39. Nesta figura pode-se observar: 1 - magnetita (Fe_3O_4): produto do processo de oxidação a vapor; 2 - estrutura martensítica; 3 - carbonetos esferoidais; 4 - poro (preenchido com algum contaminante do processo de preparação da amostra, geralmente algum composto de silício da lixa misturado com alumina do polimento); 5 - contorno do grão da matéria-prima de aço rápido M2 em pó; 6 - carbonetos esferoidais coalescidos.

Figura 39 - Estrutura da liga de aço rápido obtida em MEV.



O processo metalúrgico de obtenção dos anéis constituiu da compactação da mistura dos pós, a sinterização em forno contínuo, tratamento termoquímico em forno poço (oxidação a vapor) com estrutura final de acordo com especificações de produto.

Tabela 4 - Especificação e características da liga do corpo de prova e pó M2.

Descrição	Liga do corpo de prova ¹	Pó M2 ²	
Composição Química [% em Peso]	C	0,7-1,1	0,75-0,90
	W	5,5-6,5	6,20-6,80
	Mo	6,0-7,0	4,50-5,50
	Cr	3,5-4,5	3,75-4,50
	V	1,5-2,5	1,60-2,20
	S	1,0-1,4	<0,04
	Outros	2,0	----
	Fe	Restante	Restante
Densidade [g/cm³]		6,8	----
Dureza [Brinell]	HB - 2,5 mm - 187,5	350-450	----
Resistência à tração [N/mm ²]		> 700	----
Módulo E [N/mm²]		150.000	----
Condutividade térmica [W/m.K] 20°C		19,0	----

A liga utilizada difere com relação ao aço rápido padrão (M2) pela variação de elementos químicos, como o Enxofre e Molibdênio. Na Figura 40 é mostrado o perfil térmico da liga em estudo.

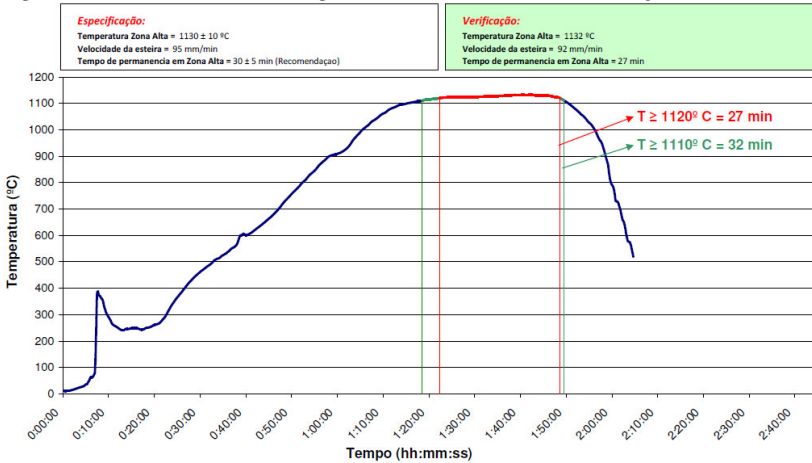
O perfil térmico do forno de sinterização, Figura 40, foi obtido através de termopar de arraste com medição da temperatura a cada 10 segundos. Observa-se inicialmente um rápido aquecimento e um pico de temperatura provocado pela cortina de fogo na entrada do forno (no tempo 0:10:00). Esse pico de temperatura (cortina de fogo na entrada do forno) tem a função de isolar o interior da parte exterior e iniciar a remoção e queima do estearato de zinco (microcera). A seguir tem-se a curva de aquecimento até o patamar de sinterização. Quando a temperatura máxima é atingida (~ no tempo 1:20:00), esta permanece por aproximadamente 30 minutos onde ocorre a sinterização propriamente dita, logo em seguida (~ até tempo 1:50:00) tem-se na saída do forno o resfriamento forçado por “chuveiros” em mufla refrigerada com água em atmosfera inerte por nitrogênio puro (têmpera).

¹ Especificação do material fornecido por certificado emitido pela empresa parceira.

² Dados retirados de certificado de análise emitido pela empresa fornecedora do pó M2, utilizado na elaboração da liga em estudo para fabricação dos anéis.

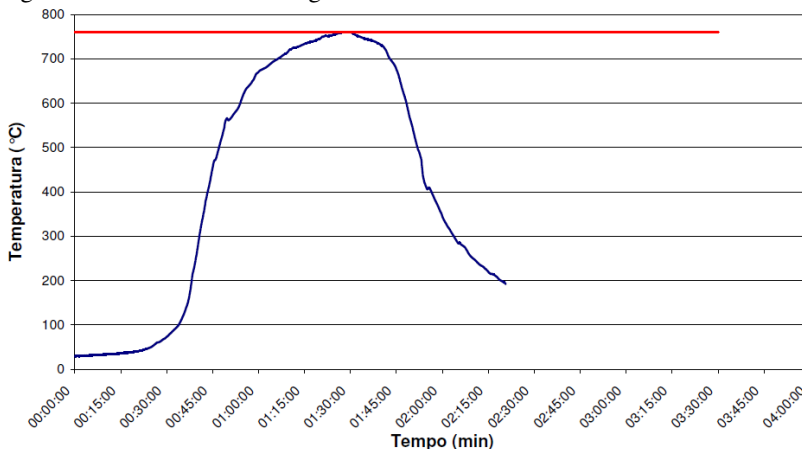
Esta taxa de resfriamento é de aproximadamente 1°C/segundo (~ do tempo 1:58:00 ao tempo 2:04:00). O tempo total de processo da fabricação do anel (sinterização mais resfriamento) é de aproximadamente 120 minutos. Após o resfriamento a peça apresenta estrutura martensítica.

Figura 40 - Perfil Térmico da liga em estudo durante a sinterização.



Depois de fabricados, os anéis são submetidos ao processo de oxidação a vapor em forno tipo poço por aproximadamente 150 minutos com temperatura em torno de 580 °C cujas funções são a de revestir os poros com o óxido magnetite. A oxidação a vapor melhora a resistência ao desgaste, a resistência à corrosão, aumenta a dureza e possui capacidade de selar os poros, bem como a melhora da usinabilidade do material (LINDSLEY, 2013). A outra função que acontece ao mesmo tempo é o “endurecimento secundário”, realizado via revenimento, a qual se consegue aumentar a dureza obtendo no material sinterizado uma estrutura final martensítica. Após o tratamento térmico os corpos de prova são retificados no seu diâmetro externo e em ambas as faces. Na Figura 41, é mostrado o perfil térmico da liga em estudo para o revenimento.

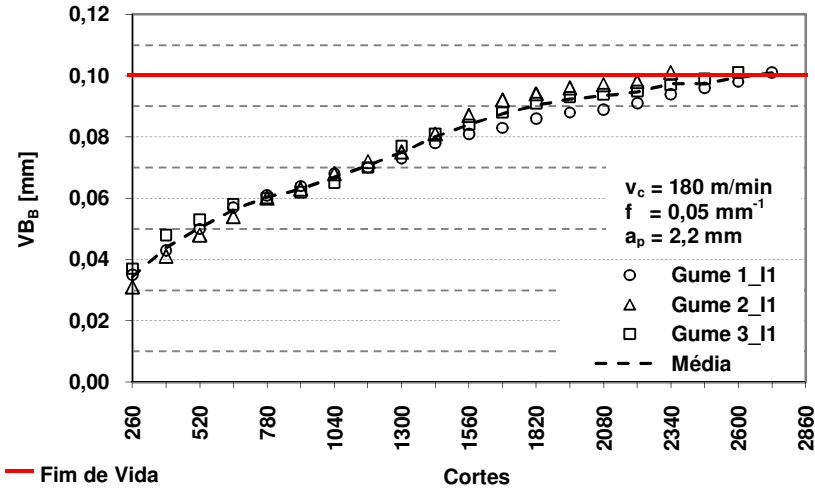
Figura 41 - Perfil térmico da liga em estudo durante o revenimento.



3.3.3 Parâmetros de corte

Com base em trabalhos descritos na literatura foram desenvolvidos ensaios para determinar o tamanho do lote de peças necessário para desenvolver os ensaios experimentais com resultados significativos.

Nos ensaios preliminares foi verificado o comportamento do desgaste e das componentes da força de usinagem no torneamento dos anéis. Para cada sequência de 130 cortes (10 anéis) se efetuava uma medição, até atingir uma marca de desgaste de flanco de $VB_B = 0,10\text{mm}$ ou se houvesse lascamento e/ou quebra da ferramenta. Foram utilizados três gumes de uma ferramenta de baixo teor de CBN (~50%), tamanho médio de grão $2\ \mu\text{m}$, ligante cerâmico (TiC), condutividade térmica de $44\ \text{Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$, com microgeometria de gume chanfrada com arredondamento. Os ensaios preliminares foram balizados empregando parâmetros de usinagem recomendados pelo fabricante das ferramentas, utilizados pela empresa parceira em seu processo produtivo e a partir de parâmetros recomendados nas referências bibliográficas. Para este ensaio foram determinados os seguintes parâmetros de usinagem: v_c de $180\ \text{m/min}$, f de $0,05\ \text{mm}$ e a_p de $2,2\ \text{mm}$. Os resultados de desgaste são mostrados na Figura 42 onde para o critério de desgaste VB_B de $0,10\ \text{mm}$, totalizaram uma média de 2730 cortes (210 anéis).

Figura 42 - Curvas de desgaste de flanco VB_B obtidas em pré-ensaio

Com base nos resultados preliminares foram estabelecidos valores para os ensaios. Em todos os ensaios, foram mantidas a largura de usinagem de corte 2,2 mm, avanço (espessura de usinagem) de 0,05 mm/rot e como critério de fim de vida, a marca de desgaste de flanco VB_B de 0,10 mm, lascamento e/ou quebra da ferramenta, variando a velocidades de corte de entre 100 e 220 m/min.

A largura de usinagem de 2,2 mm foi escolhida em função das dimensões do anel (Figura 38) e em relação à estratégia utilizada para usinagem.

A escolha do avanço de 0,05 mm foi teve como base valores utilizados por Zhou *et al.* (2003), Karpát e Özel (2007) e Katuku *et al.* (2010).

O valor de $VB_B = 0,10 \text{ mm}$ foi adotado devido ao tempo de usinagem realizados em ensaios preliminares.

Para a faixa da velocidade de corte levou-se em conta valores utilizados em ensaios realizados por König e Neises (1993), Luo *et al.* (1999), Poulachon *et al.* (2001), Kurt e Seker (2005), Diniz (2005), Klocke e Kratz (2005), Karpát e Özel (2007) e Özel (2009).

3.3.4 Ensaio com ferramenta de Cermet

Após o ensaio que determinou os parâmetros para usinar com ferramentas de PCBN, foi realizado um teste com uma ferramenta de

Cermet para verificar as condições de desgaste para esse tipo de material de ferramenta durante o torneamento da liga em estudo. O código da ferramenta utilizada foi WNMG 08 04 04-PF, classe CG1525, revestida com TiCN pelo processo de PVD, que possui alta resistência ao desgaste. Durante os testes, a ferramenta de Cermet não apresentou resultado satisfatório. Com os mesmos parâmetros utilizados para ferramenta de PCBN (v_c 180 m/min, f 0,05 mm e a_p 2,2 mm), a ferramenta de Cermet apresentou destruição do gume da ferramenta, não conseguindo usinar os 13 cortes (um anel). Assim, tendo em vista o alto desgaste de flanco da ferramenta, descartou-se ferramentas de Cermet, partindo-se para a utilização de ferramentas de PCBN.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo, são apresentados os resultados dos ensaios de torneamento ortogonal longitudinal de perfil do aço rápido obtido por metalurgia do pó endurecido pelo processo de oxidação a vapor em corte contínuo a seco, empregando insertos de PCBN. Na seção 4.1 são analisados os resultados do inserto de baixo teor de CBN em relação à microgeometria do gume chanfrado com arredondamento (S) e apenas arredondado (E), com velocidades de corte de 100, 140, 180 e 220 m/min. Na seção 4.2 são analisados os resultados dos insertos de alto teor de CBN como função das mesmas variáveis de entrada apresentadas na seção 4.1.

A avaliação dos resultados de usinagem foi realizada tendo como base a evolução do desgaste para a combinação das variáveis de entrada.

4.1 ENSAIOS COM INSERTOS DE BAIXO TEOR DE CBN COM GUME CHANFRADO E ARREDONDADO (S) E GUME APENAS ARREDONDADO (E)

Nas oito categorias de ensaios com insertos de baixo teor os anéis foram torneados com 16640 cortes, sendo 7800 realizados nos quatro ensaios para a microgeometria de gume chanfrado e arredondada (S) e 8840 nos quatro ensaios para a microgeometria de gume apenas arredondada (E). Na Tabela 5 são apresentados os números de cortes realizados em torneamento ortogonal com insertos de baixo teor de CBN, relacionadas com suas respectivas velocidade de corte. São também apresentados os desgastes e comportamento da força de corte (F_c) e força de avanço (F_f), para cada microgeometria de gume.

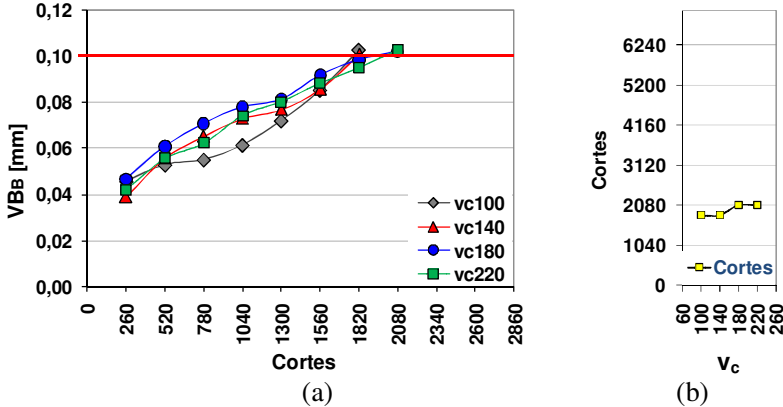
Tabela 5 - Número de cortes realizados com insertos CBN10.

Microgeometria do gume	v_c [m/min]	Quantidade [cortes]
S	100	1820
	140	1820
	180	2080
	220	2080
E	100	2340
	140	1820
	180	2600
	220	2080

4.1.1 Ensaios com insertos de baixo teor de CBN e gume chanfrado e arredondado (CBN10S)

Neste item são apresentados os resultados da influência da microgeometria do gume chanfrado e arredondado (S) para insertos de baixo teor de CBN. A Figura 43a mostra as curvas de desgaste de flanco para estes ensaios (microgeometria S) e Figura 43b mostra o número de cortes para a faixa de velocidade de corte entre 100 a 220 m/min para o critério de fim de vida adotado ($VB_B = 0,10$ mm)

Figura 43 - Comportamento de desgaste VB_B x Cortes e (b) comportamento da v_c x n° de cortes para insertos com baixo teor de CBN, gume chanfrado e arredondado (CBN10S).



O gráfico “a” da Figura 43 mostra que para as ferramentas chanfradas e arredondadas de PCBN de baixo teor de CBN o desgaste apresenta uma pequena diferença para as velocidades de corte ensaiadas. Observa-se no gráfico que a variação da velocidade de corte não mostrou uma diferença significativa sobre o comportamento de desgaste para os insertos chanfrados com arredondamento. Os resultados mostram que insertos com microgeometria de gume S de baixo teor apresentam melhores resultados para v_c 180 e v_c 220 m/min.

Na Figura 43, gráfico “b”, se verifica uma estabilização do número de cortes para v_c 100 e v_c 140 m/min e após um aumento do número de cortes com estabilização dos valores para v_c 180 e 220 m/min. Na caracterização da região do desgaste de flanco, verificada no final da vida de um gume para os ensaios com v_c de 100 m/min, observa-se a presença de material aderido no flanco do inserto, Figura

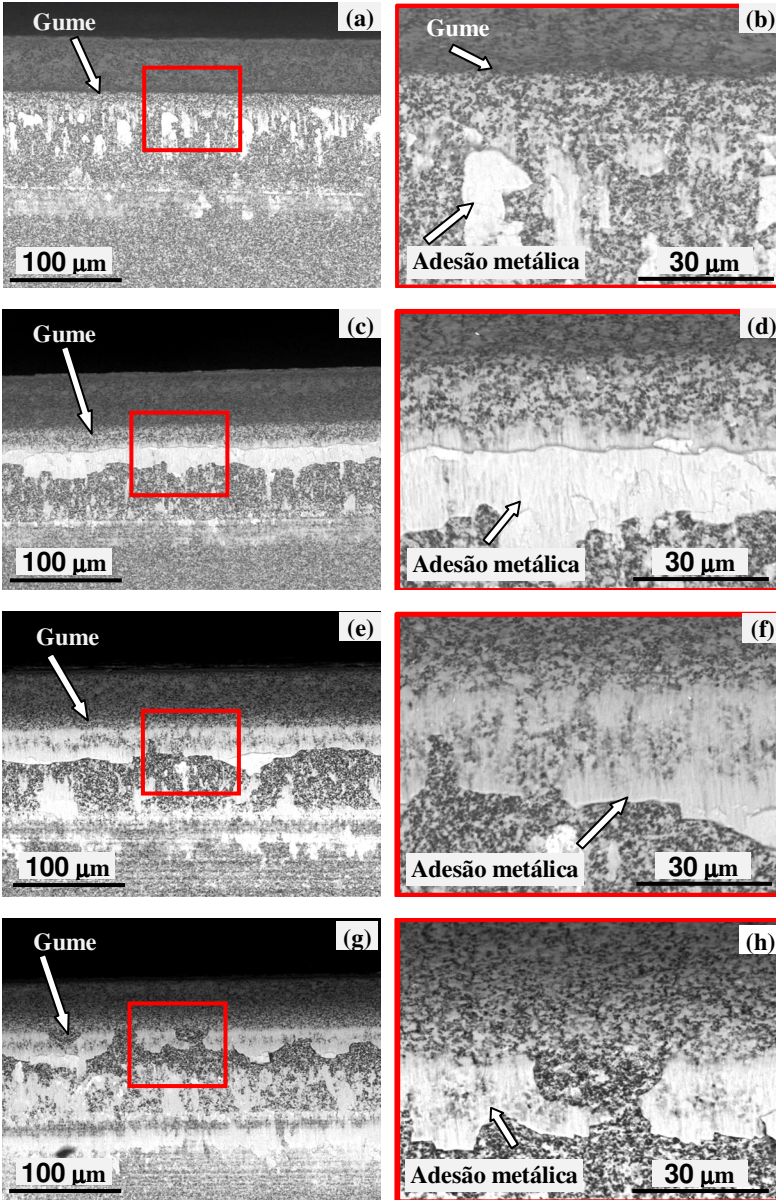
44.

A Figura 44 (a, c, e, g) e Figura 44 (b, d, f, h - regiões ampliadas) mostram as marcas de desgaste de flanco, onde se observam aderências. Essas aderências estão concentradas próximo ao gume, não estando distribuídas uniformemente sobre toda a largura do desgaste de flanco. Essa não uniformidade pode ser devido a um mecanismo de remoção destas aderências na reentrada da ferramenta no corte, pois ao reiniciar o corte, passa-se por uma rotação inteira do corpo de prova, até que a espessura mínima de usinagem seja alcançada. As aderências estão com menores temperaturas e mais duras, levando a uma abrasão mais significativa, que apenas a abrasão causada na usinagem com espessura de 0,05 mm. Da mesma forma, ao término do corte acontece a mesma situação, pelo afastamento da ferramenta da peça. O início e o final da usinagem podem determinar este tipo de adesão no flanco da ferramenta. Segundo König (1981), o acúmulo desse material aderido no flanco, com o decorrer do torneamento, quando alcança altura crítica, adquire pouca resistência, sendo removida. Neste processo são arrancadas partes do próprio inserto (grãos de CBN), os quais agem de forma abrasiva, aumentando o desgaste. Abrasão também foi identificada em ensaios realizados com ferramentas de PCBN por Narutaki e Yamane (1979), Farhat (2003), König e Neises (1993) e Sales *et al.* (2009).

Essas marcas de desgaste assemelham-se às encontradas por Katuku *et al.* (2010) e Silva (2010). Verificou-se que o material aderido no flanco da ferramenta, após análise da composição química por EDS, contém elementos químicos que compõe a liga utilizada na fabricação dos anéis. Também foi identificada a presença de adesão metálica imediatamente após a área de contato, na superfície dos insertos. Essa adesão de material na superfície da ferramenta é atribuída a uma reação química entre o inserto e o material da peça pelas altas temperaturas geradas, a qual é expelida pelo fluxo do cavaco sobre a região de corte (HOOPER *et al.*, 1989; LUO, 1999; FARHAT, 2003).

Desgaste de cratera depende da temperatura. Seu aumento ocasiona o amolecimento do ligante, propiciando o desgaste abrasivo, acarretando com isso a formação de cratera. Segundo Narutaki e Yamane (1979), Poulachon *et al.* (2004) e Silva *et al.* (2004) e Huang (2005), esse tipo de desgaste acontece pela ação do atrito, altas pressões e altas temperaturas ocasionado pelo mecanismo de desgaste por abrasão. Nas observações realizadas nos insertos, verificou-se indícios de formação de desgaste de cratera.

Figura 44 - Desgaste de Flanco (a, c, e, g) e ampliação do desgaste (b, d, f, h) - CBN10S

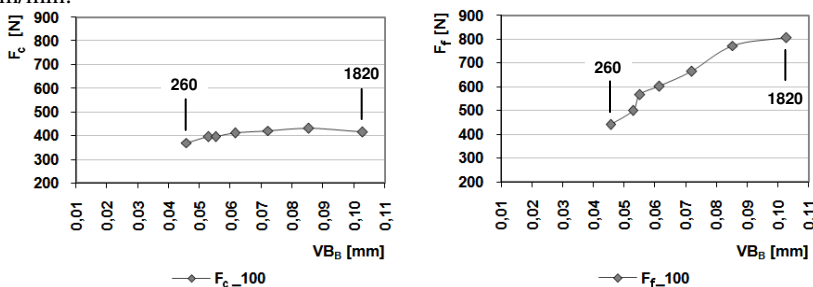


(a), (b) = v_c 100, (c) e (d) = v_c 140; (e), (f) = v_c 180 e (g), (h) = v_c 220 m/min

O valor da força F_c e F_f a cada 260 cortes durante a usinagem para os insertos de baixo teor de CBN (CBN10) com geometria de gume chanfrado (S), para as velocidades de corte entre 100 e 220 m/min são mostrados na Figura 45, Figura 48, Figura 51 e Figura 54.

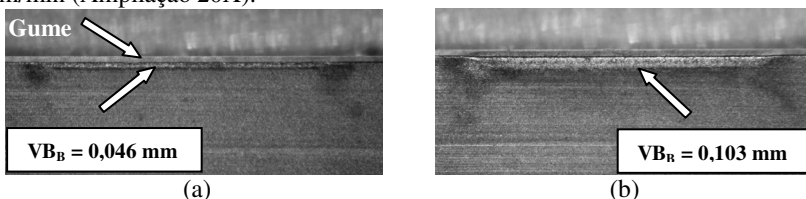
Para a velocidade de corte de 100 m/min, Figura 45, as F_c não apresentaram aumento significativo (~ 369 N no corte 260 e ~ 416 N no corte 1820). Esses valores, para a F_c , tiveram pouca elevação devido à área de corte constante durante a usinagem, sendo sua pequena elevação pela pequena alteração da geometria do gume causado pelo desgaste progressivo. Já para a F_f observa-se grande aumento (~ 440 N no corte 260 e ~ 806 N no corte 1820), comportamento este proporcionado pelo aumento da região de contato da peça e do flanco da ferramenta no decorrer do desgaste da ferramenta. Esse tipo de comportamento para F_c e F_f , repetiu-se para as velocidades de corte de 140, 180 e 220 m/min.

Figura 45 - Valores capturados da F_c e F_f a cada 260 cortes - CBN10S - v_c 100 m/min.



A Figura 46 mostra a progressão do desgaste de flanco ocorrido para a v_c de 100 m/min para o corte 260 e o corte 1820 e na Figura 47, início de formação de desgaste de cratera na face do inserto e presença de adesão metálica. Essas adesões foram mais evidentes e identificadas nas análises com maiores ampliações e EDS.

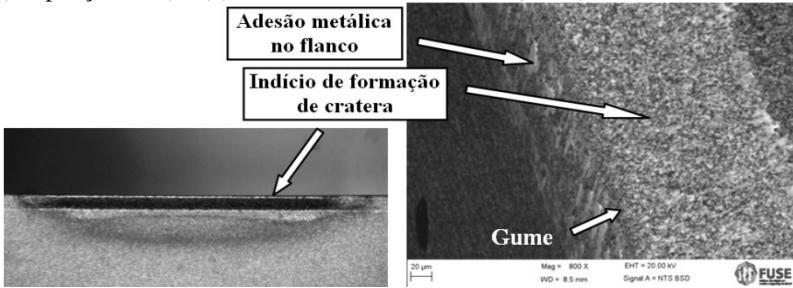
Figura 46 - Flanco do inserto CBN10S (a) corte 260 e (b) corte 1820 - v_c 100 m/min (Ampliação 20X).



(a)

(b)

Figura 47 - (a) Face do inserto CBN10S - corte 1820 - v_c 100 m/min (Ampliação 20X) e (b) detalhe da adesão metálica (MEV).



Em relação a v_c 140, da mesma forma que para a v_c 100 m/min (Figura 48), não houve elevação significativa nas F_c (~353 N no corte 260 e ~401 N no corte 1820). Para a F_f se verificou aumento significativo (~439 N no corte 260 e ~784 N no corte 1820).

Figura 48 - Valores capturados da F_c e F_f a cada 260 cortes - CBN10S - v_c 140 m/min.

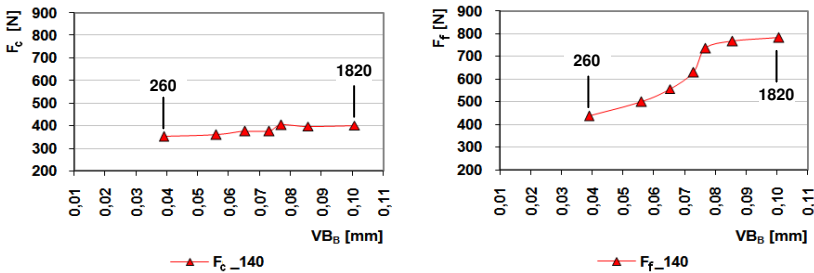


Figura 49 mostra a progressão do desgaste de flanco ocorrido para a v_c de 140 m/min para o corte 260 e o corte 1820, e na Figura 50 visualiza-se indício de formação de desgaste de cratera na face do inserto, bem como a presença de adesão metálica.

Figura 49 - Flanco do inserto CBN10S (a) corte 260 e (b) corte 1820 - v_c 140 m/min (Ampliação 20X).

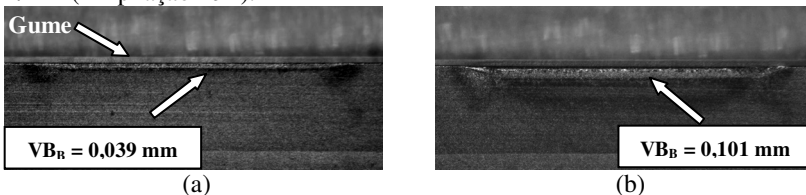
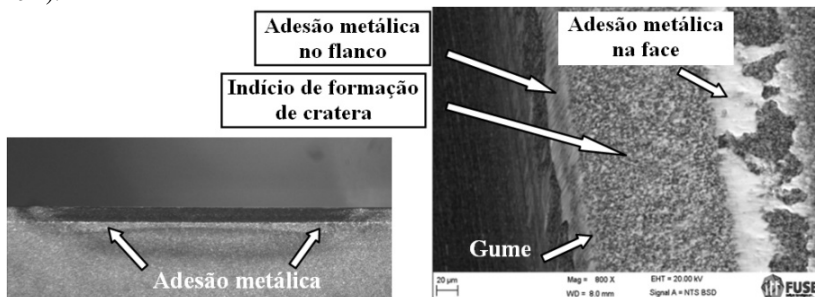
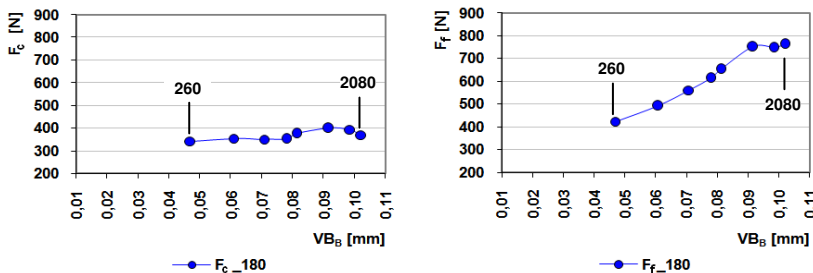


Figura 50 - Face do inserto CBN10S - corte 1820 - v_c 140 m/min (Ampliação 20X).



Para a v_c 180 m/min (Figura 51), nota-se pouca variação nos valores da F_c (~342 N no corte 260 e ~370 N no corte 2080). Para F_f os valores também apresentaram elevação significativa (~423 N no corte 260 e ~763 N no corte 2080).

Figura 51 - Valores capturados da F_c e F_f a cada 260 cortes - CBN10S - v_c 180 m/min.



Na Figura 52 é apresentada a progressão do desgaste de flanco ocorrido para a v_c de 180 m/min para o corte 260 e o corte 2080 e na Figura 53 indício de formação de desgaste de cratera na face do inserto e presença de adesão metálica.

Figura 52 - Flanco do inserto CBN10S (a) corte 260 e (b) corte 2080 - v_c 180 m/min (Ampliação 20X)

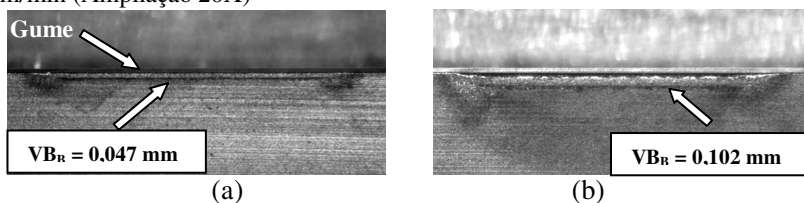
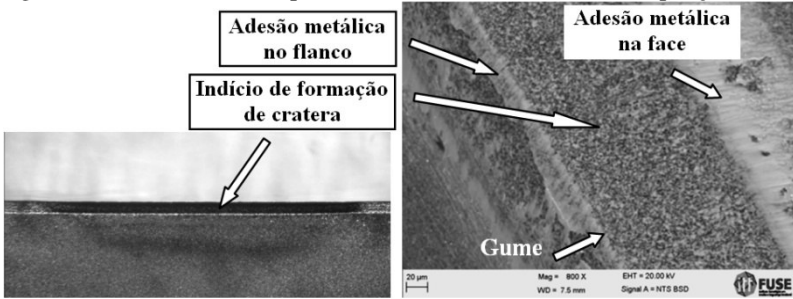
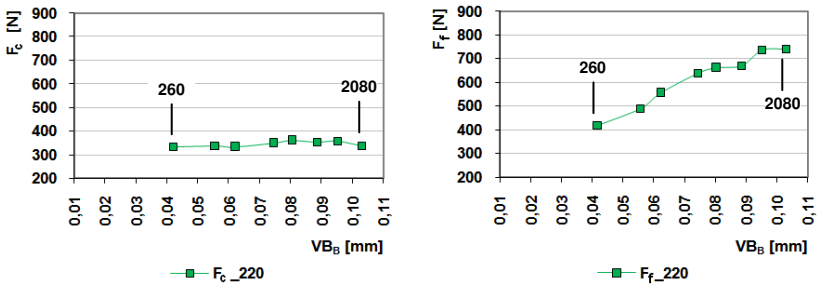


Figura 53 - Face do inserto após 2080 cortes - v_c 180 m/min (Ampliação 20X)



Da mesma forma que para as velocidades de corte anteriores, na v_c 220 m/min (Figura 54), verifica-se estabilização dos valores para F_c (~335 N no corte 260 e ~338 N no corte 2080) e valores com significativa elevação para F_f (~420 N no corte 260 e ~742 N no corte 2080).

Figura 54 - Valores capturados da F_c e F_f a cada 260 cortes - CBN10S - v_c 220 m/min.



A Figura 55 mostra a progressão do desgaste de flanco ocorrido para a v_c de 220 m/min para o corte 260 e o corte 2080 e na Figura 56 início de formação de desgaste de cratera na face do inserto e presença de adesão metálica.

Figura 55 - Flanco do inserto CBN10S (a) corte 260 e (b) corte 2080 - v_c 220 m/min (Ampliação 20X)

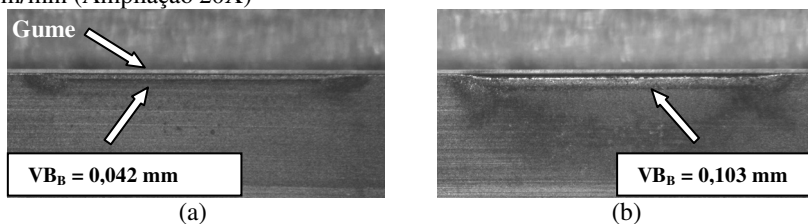
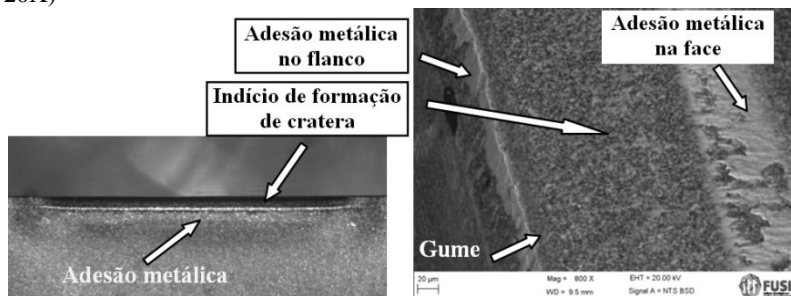


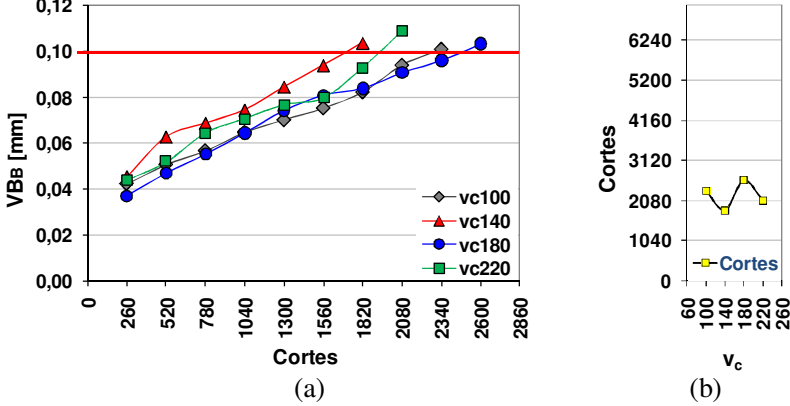
Figura 56 - Face do inserto CBN10S - corte 2080 - v_c 220 m/min (Ampliação 20X)



4.1.2 Ensaios com insertos de baixo teor de CBN com gume apenas arredondamento (E) (CBN10E)

Os resultados do torneamento com insertos com microgeometria de gume arredondado de baixo teor de CBN são apresentados nos gráficos da Figura 57. Pode-se observar que os insertos com microgeometria de gume E de baixo teor de CBN apresentaram uma acentuada variação do desgaste em relação à variação da velocidade de corte (Figura 57a). Na Figura 57b, se observa uma diminuição do número de cortes da v_c 100 para v_c 140 m/min. De v_c 140 m/min para v_c 180 m/min se verifica um aumento significativo do número de cortes. A partir desta velocidade de corte, 180 m/min, ocorre novamente uma diminuição do número de cortes.

Figura 57 - (a) Comportamento de desgaste $VB_B \times$ Cortes e (b) comportamento da $v_c \times n^\circ$ de cortes para insertos com baixo teor de CBN, gume apenas arredondados CBN10E.

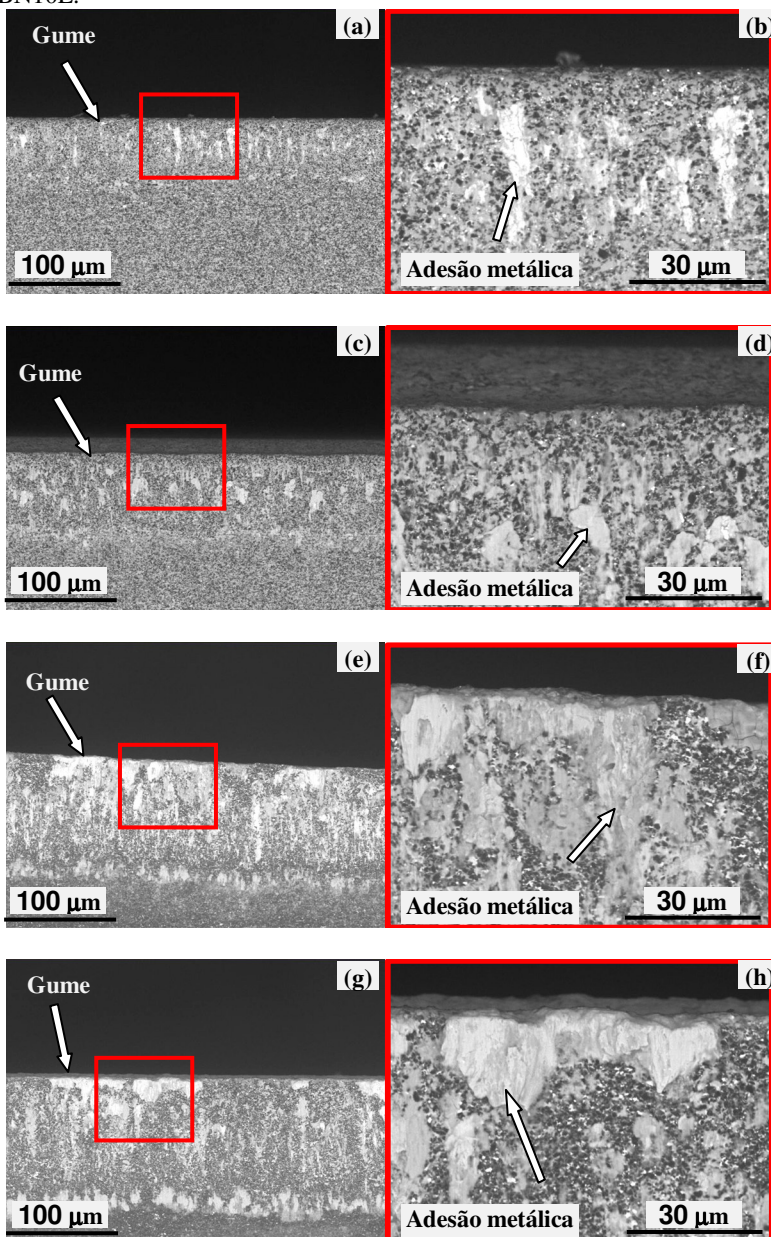


Na Figura 58 (a, c, e, g) e Figura 58 (b, d, f, h - regiões ampliadas), verifica-se a presença de adesão metálica na região do desgaste de flanco dos insertos, oriundas da liga torneada.

Para a microgeometria de gume apenas arredondado (E) em insertos de baixo teor de CBN, se comparada com a microgeometria de gume chanfrado e arredondado (S) também de baixo teor de CBN, observa-se que também houve início de formação de desgaste de cratera e adesão metálica em maior quantidade com o aumento da velocidade de corte.

Da mesma forma como para a microgeometria de gume chanfrado e arredondado (S) foram identificados nos insertos de gume apenas arredondado (E) a presença de material não distribuído uniformemente sobre a largura do desgaste de flanco. A não uniformidade deste material no flanco pode ser devido a um mecanismo de remoção destas aderências na reentrada e no afastamento da ferramenta no corte, determinando esse tipo de adesão no flanco da ferramenta.

Figura 58 - Desgaste de flanco (a, c, e, g) e ampliação do desgaste (b, d, f, h) - CBN10E.

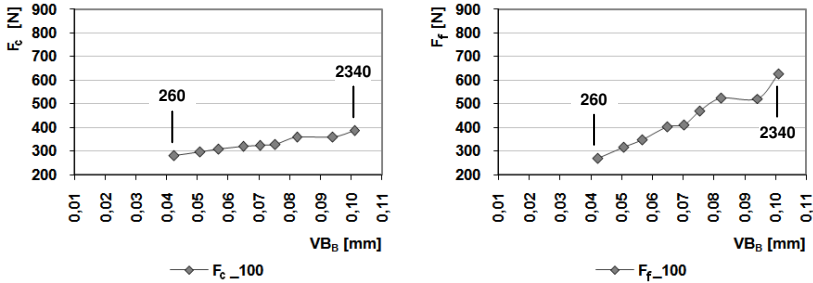


(a), (b) = v_c 100, (c) e (d) = v_c 140; (e), (f) = v_c 180 e (g), (h) = v_c 220 m/min.

Os valores da F_c e F_f obtidas a cada 260 cortes durante a usinagem com os insertos de baixo teor de CBN (CBN10) com geometria de gume apenas arredondado (E), para as velocidades de corte entre 100 e 220 m/min são mostrados na Figura 59, Figura 62, Figura 65 e Figura 68.

Para a velocidade de corte de 100 m/min, Figura 59, as F_c apresentaram pequeno aumento (~281 N no corte 260 e ~385 N no corte 2340). Já para a F_f observa-se grande elevação nos valores (~268 N no corte 260 e ~627 N no corte 2340).

Figura 59 - Valores capturados da F_c e F_f a cada 260 cortes - CBN10E - v_c 100 m/min.



A Figura 60 mostra a progressão do desgaste de flanco ocorrido para a v_c de 100 m/min para o corte 260 e o corte 2340 e na Figura 61 início de formação de desgaste de cratera na face do inserto e presença de adesão metálica, confirmadas em análises com MEV em maiores ampliações e EDS.

Figura 60 - Flanco do inserto CBN10E (a) corte 260 e (b) corte 2340 - v_c 100 m/min (Ampliação 20X).

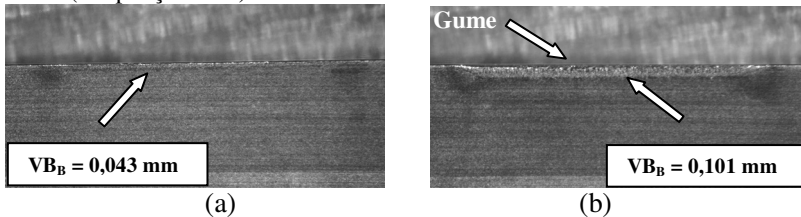
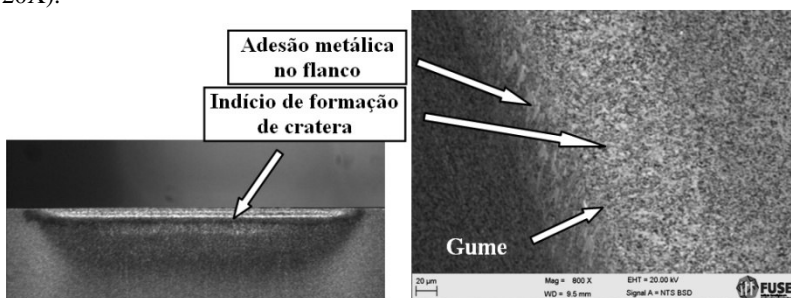
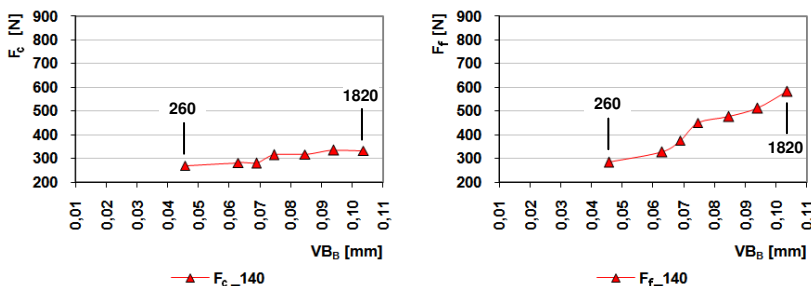


Figura 61 - Face do inserto CBN10E - corte 2340 - v_c 100 m/min (Ampliação 20X).



Os valores para a v_c 140 m/min, da mesma forma que para a v_c 100 m/min (Figura 62), apresentaram pequena elevação para as F_c (~271 N no corte 260 e ~333 N no corte 1820). Para a F_f se verificou aumento significativo (~283 N no corte 260 e ~584 N no corte 1820).

Figura 62 - Valores capturados da F_c e F_f a cada 260 cortes - CBN10E - v_c 140 m/min.



Na Figura 63 é apresentada a progressão do desgaste de flanco ocorrido para a v_c de 140 m/min para o corte 260 e o corte 1820 e na Figura 64 indício de formação de desgaste de cratera na face do inserto e presença de adesão metálica, confirmadas em análises com MEV em maiores ampliações e EDS.

Figura 63 - Flanco do inserto CBN10E (a) corte 260 e (b) corte 1820 - v_c 140 m/min (Ampliação 20X).

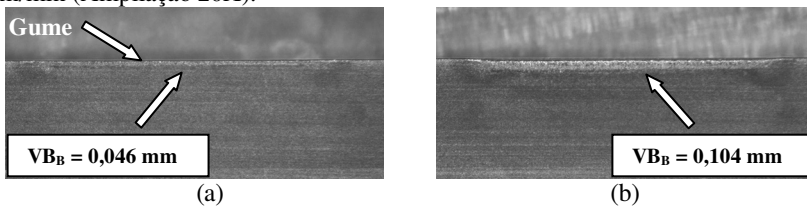
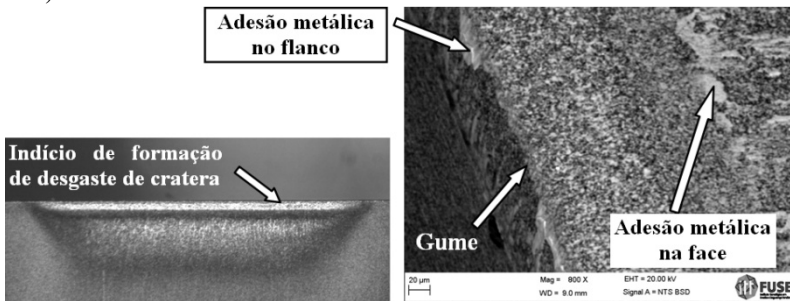
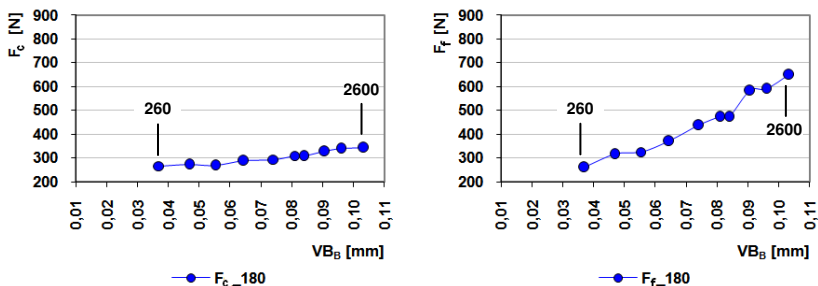


Figura 64 - Face do inserto CBN10E - corte 1820 - v_c 140 m/min (Ampliação 20X)



Para a v_c 180 m/min (Figura 65), observa-se pouca variação nos valores da F_c (~266 N no corte 260 e ~343 N no corte 2600). Para F_f os valores também apresentaram elevação significativa (~262 N no corte 260 e ~649 N no corte 2600).

Figura 65 - Valores capturados da F_c e F_f a cada 260 cortes - CBN10E - v_c 180 m/min



A Figura 66 mostra a progressão do desgaste de flanco ocorrido para a v_c de 180 m/min para o corte 260 e o corte 2600 e na Figura 67 indício de formação de desgaste de cratera na face do inserto e presença

de adesão metálica, confirmadas em análises com MEV em maiores ampliações e EDS.

Figura 66 - Flanco do inserto CBN10E (a) corte 260 e (b) corte 2600 - v_c 180 m/min (Ampliação 20X).

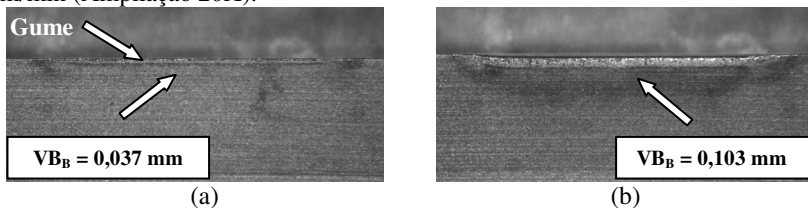
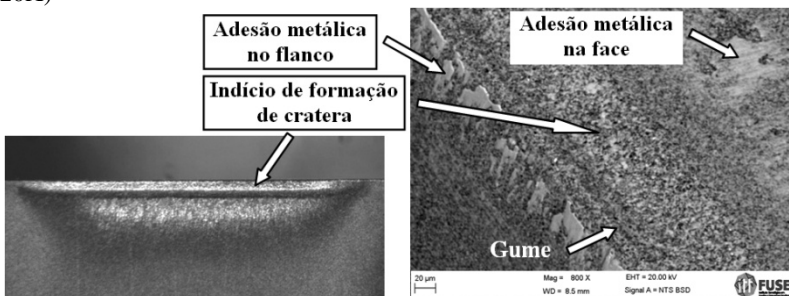
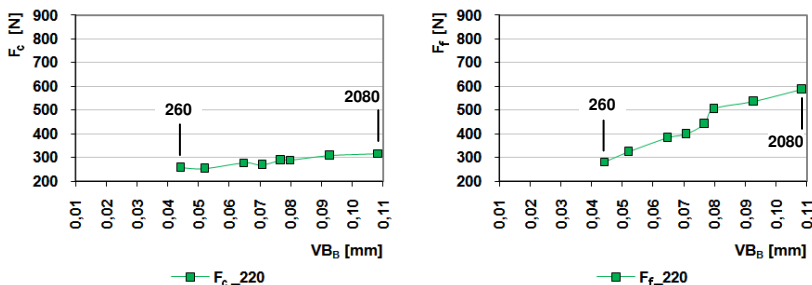


Figura 67 - Face do inserto CBN10E - corte 2600 - v_c 180 m/min (Ampliação 20X)



Da mesma forma que para as velocidades de corte anteriores, na v_c 220 m/min (Figura 68), verifica-se pequena elevação dos valores para F_c (~257 N no corte 260 e ~318 N no corte 2080) e valores com significativa elevação para F_f (~282 N no corte 260 e ~586 N no corte 2080).

Figura 68 - Valores capturados da F_c e F_f a cada 260 cortes - CBN10E - v_c 220 m/min



Na Figura 69 é apresentada a progressão do desgaste de flanco ocorrido para a v_c de 220 m/min para o corte 260 e o corte 2080 e na Figura 70 início de formação de desgaste de cratera na face do inserto e presença de adesão metálica, confirmadas em análises com MEV em maiores ampliações e EDS.

Figura 69 - Flanco do inserto CBN10E (a) corte 260 e (b) corte 2080 - v_c 220 m/min (Ampliação 20X).

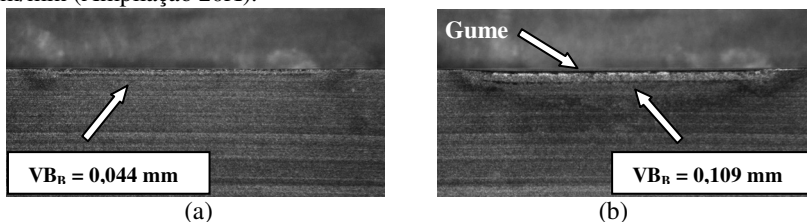
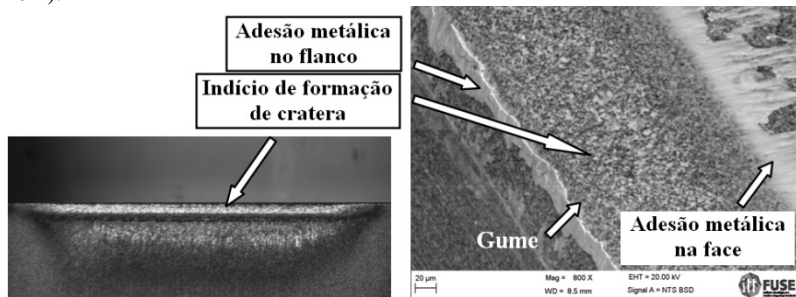


Figura 70 - Face do inserto CBN10E - corte 2080 - v_c 220 m/min (Ampliação 20X).



Em relação ao comportamento das componentes F_c e F_f com o número de cortes para ferramenta de baixo teor de CBN com gume chanfrado e arredondado, observou-se que o aumento da velocidade de corte proporcionou decréscimo em seus valores, o mesmo acontecendo, de modo geral, para a ferramenta de baixo teor de CBN com gume apenas arredondado. Verificou-se também que os aumentos dos valores da F_f do corte 260 com os valores finais obtidos no desgaste de flanco VB_B de 0,10 mm, para ambos os teores de CBN, foram devidos ao aumento da área de contato entre o flanco da ferramenta e a peça usinada.

4.2 ENSAIOS COM INSERTOS DE ALTO TEOR DE CBN COM GUME CHANFRADO E ARREDONDADO (S) E GUME APENAS ARREDONDADO (E)

Para as oito categorias de ensaios com insertos de alto teor de CBN os anéis foram torneados com 28470 cortes, sendo 11180 realizados nos quatro ensaios para a microgeometria de gume chanfrado e arredondado (S) e 17290 nos quatro ensaios para a microgeometria de gume apenas arredondada (E). Para cada microgeometria foram adotadas as velocidades de corte de 100, 140, 180 e 220 m/min (Tabela 6).

Tabela 6 - Número de cortes realizados com insertos CBN200.

Microgeometria do gume	v_c [m/min]	Quantidade [cortes]
S	100	4680
	140	2730
	180	1950
	220	1820
E	100	6630
	140	4680
	180	3380
	220	2600

4.2.1 Ensaios com insertos de alto teor de CBN com gume chanfrado e arredondado (CBN200S)

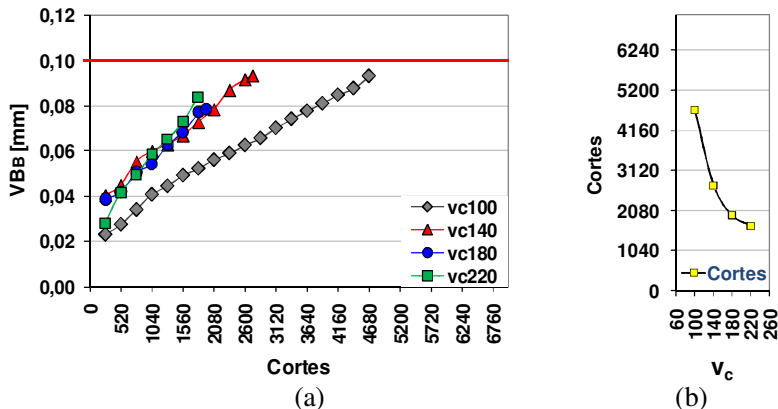
Neste item são apresentados os resultados da influência da microgeometria de gume chanfrado e arredondado e da velocidade de corte sobre o desgaste e sobre a força de corte (F_c) e a força de avanço (F_f), utilizando insertos da classe CBN200 (alto teor de CBN).

Verifica-se que para os insertos de alto teor de CBN com gume chanfrado e arredondado (CBN200S) para todos os ensaios, as avarias (lascamentos) no gume antecederam o limite de desgaste de flanco estipulado de 0,10mm, Figura 71a, fazendo com que os ensaios fossem finalizados precocemente. Os lascamentos verificados nos insertos com gume chanfrado e arredondado S, em insertos de alto teor de CBN tem origem nos esforços demasiados para a característica do material. Segundo Ferraresi (1977) e Trent e Wright (2000), as alterações da geometria do gume durante a usinagem propiciam um aumento dos

esforços e conseqüentemente a intensidade e dimensão dos lascamentos. O comportamento de vida, em termos de número de percursos de avanço, mostra que para a velocidade de corte de 100 m/min alcançou-se o maior número de cortes e às velocidades de corte maiores, gradativamente mostraram uma diminuição do número de cortes.

Na Figura 71b se verifica uma diminuição significativa do número de cortes para toda a faixa de velocidade de corte empregada nos testes (entre 100 e 220 m/min), sendo a diminuição do número de cortes maior para a faixa de 100 a 140 m/min.

Figura 71 - (a) Comportamento de desgaste VB_B x Cortes e (b) comportamento da v_c x nº de cortes para insertos com baixo teor de CBN, gume apenas arredondados - CBN200S.



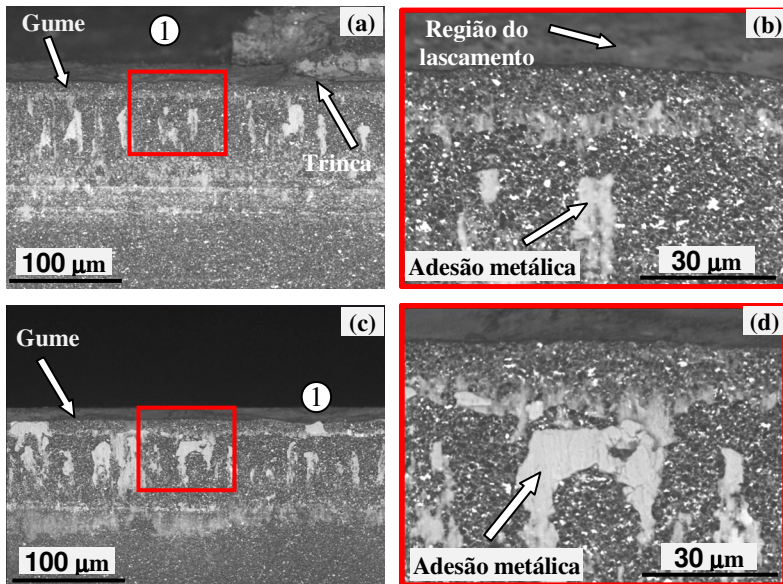
A Figura 72 (a, c, e, g) e em aumento Figura 72 (b, d, f, h) mostra as avarias nas faces dos insertos de PCBN de alto teor de CBN com gume chanfrado e arredondado. Foram observadas avarias (lascamentos) na superfície de saída (face) das ferramentas em todas as ferramentas utilizadas, antes que o VB_B estipulado de 0,10 mm fosse alcançado, fazendo com que os ensaios foram interrompidos. Segundo Karpat e Özel (2007), essas avarias foram originadas pelo elevado estado de tensão concentrado na região do gume na ferramenta com ângulo efetivo de saída de -26° (20° do chanfro da ferramenta + 6° do suporte), que se torna mais intenso com a progressão do desgaste.

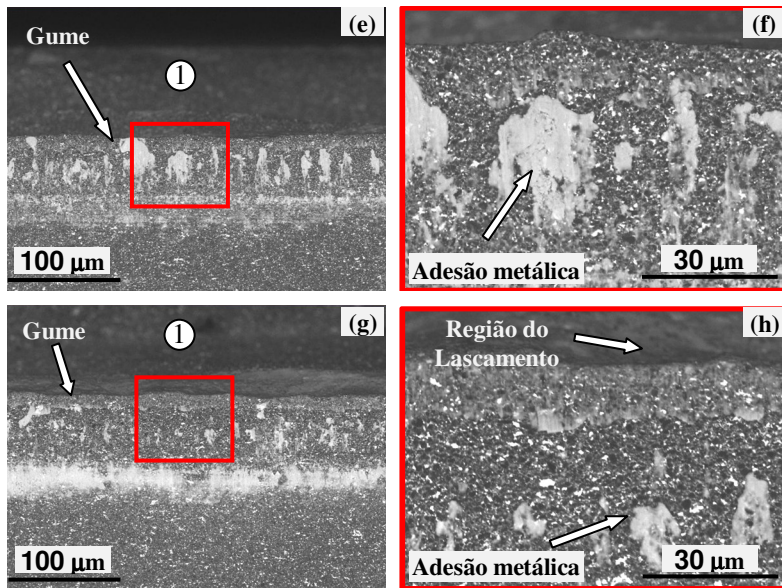
As causas destas avarias foram relacionadas à microgeometria de gume chanfrado a qual proporciona maiores forças (SHINTANI *et al.* 1989, BOSSOM, 1990; TIELE e MELKOTE, 2000; ÖZEL, 2003; KURT e SEKER, 2005; KOUNTANYA *et al.*, 2005; KURT e SEKER,

2005; SECO TOOLS, 2005; LAHIFF *et al.*, 2007). Esta maior força juntamente com o direcionamento do fluxo do cavaco e a formação de pequena cratera sobre o inserto pode ter originado o lascamento de parte do gume. Este tipo de microgeometria de gume chanfrada com arredondamento não proporcionou resultados conforme encontrado na literatura, microgeometria esta que, segundo Shintani *et al.* (1989), Seco Tools (2005) e Lahiff *et al.* (2007), Zhou (2003), Kurt e Seker (2005) e Karpát e Özel (2007) proporciona maior resistência e a afirmação de Klocke e Kratz (2005), que a finalidade do chanfro é a de proteger o gume de lascamentos.

Resultados encontrados por KÖNIG e NEISES (1993) ao usar aço AISI 52100, temperado e revenido, mostram que a diminuição do teor de CBN é uma das razões para o aumento da resistência ao desgaste. Esses resultados obtidos não confirmam os resultados encontrados para o torneamento da liga em estudo, em que ferramentas de alto teor de CBN apresentaram melhores resultados, independente da microgeometria do gume.

Figura 72 - Desgaste de flanco (a, c, e, g) e ampliação do desgaste (b, d, f, h) - CBN200S.



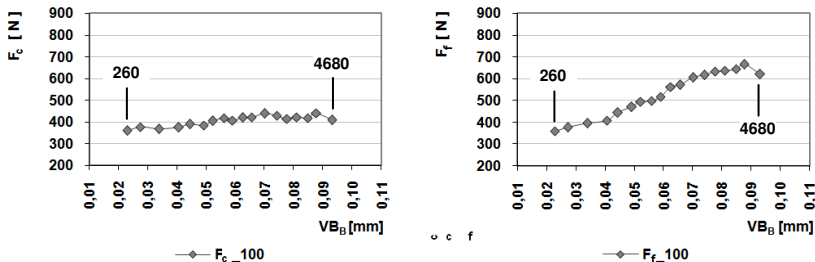


(a), (b) = v_c 100, (c) e (d) = v_c 140; (e), (f) = v_c 180 e (g), (h) = v_c 220 m/min.

Na Figura 73, Figura 76, Figura 79 e Figura 82 são apresentados os resultados dos valores da F_c e F_f a cada 260 cortes, durante a usinagem com os inserts de alto teor de CBN (CBN200), com geometria de gume chanfrado e arredondado (S), para as velocidades de corte entre 100 e 220 m/min.

Para a velocidade de corte de 100 m/min, a Figura 73, mostra que para a F_c não houve aumento significativo para seus valores (~361 N no corte 260 e ~409 N no corte 4680). Já para a F_f observa-se o aumento nos valores (~360 N no corte 260 e ~620 N no corte 4680). Verifica-se também decréscimo na última medição da F_c e F_f (faixa dos cortes 4420 e 4680), proporcionada pela alteração da geometria do gume (lascamento), onde a F_c diminuiu de 442 N para 409 N e a F_f diminuiu de 665 N para os 620 N. Essa diminuição, da F_c e F_f , indica uma situação crítica onde o sistema busca uma situação mais favorável durante a usinagem.

Figura 73 - Valores capturados da F_c e F_f a cada 260 cortes - CBN200S - v_c 100 m/min



A Figura 74 mostra a progressão do desgaste de flanco ocorrido para a v_c de 100 m/min para o corte 260 (Figura 74a) e o corte 4680 (Figura 74b) e na Figura 75 presença de adesão metálica. Essas adesões foram mais evidentes e identificadas nas análises com maiores ampliações e EDS.

Figura 74 - Flanco do inserto CBN200S após (a) 260 cortes e (b) 4680 cortes - v_c 100 m/min (Ampliação 20X).

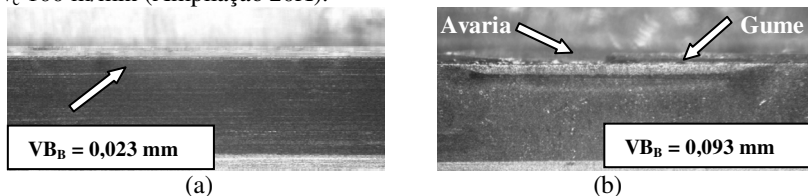
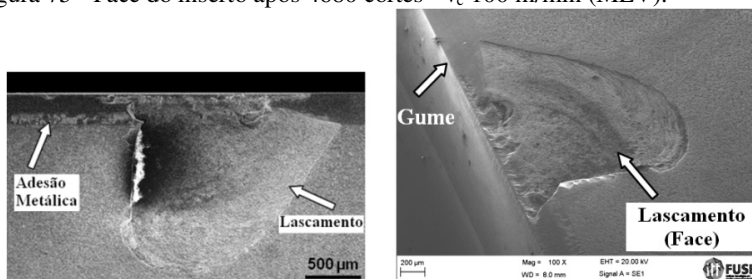


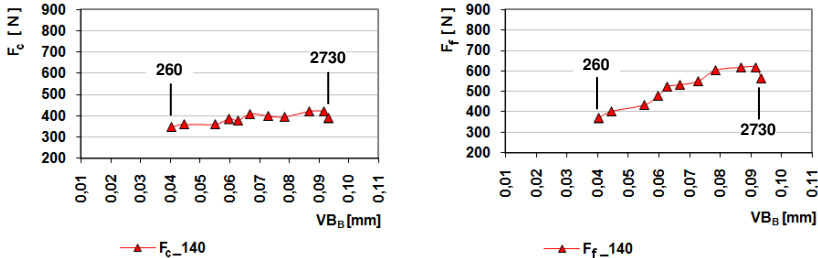
Figura 75 - Face do inserto após 4680 cortes - v_c 100 m/min (MEV).



Em relação a v_c 140, da mesma forma que para a v_c 100 m/min (Figura 76), não houve elevação significativa nas F_c (~345 N no corte 260 e ~390 N no corte 2730). Para a F_f se verificou aumento significativo (~371 N no corte 260 e ~563 N no corte 2730). Verifica-se também decréscimo na última medição da F_c e F_f (faixa dos cortes 2470

e 2730), proporcionada pela alteração da geometria do gume (lascamento), onde a F_c diminuiu de 420 N para 390 N e a F_f diminuiu de 616 N para os 563 N.

Figura 76 - Valores capturados da F_c e F_f a cada 260 cortes - CBN200S - v_c 140 m/min.



Na Figura 77 é apresentada a progressão do desgaste de flanco ocorrido para a v_c de 140 m/min para o corte 260 (Figura 77a) e o corte 2730 (Figura 77b). Na Figura 78 pode-se verificar avarias (microlascamentos e lascamento) na face do inserto, verificados na última medição (corte 2730), fazendo com que os ensaios fossem interrompidos antes que o V_{B_B} estipulado fosse alcançado.

Figura 77 - Flanco do inserto CBN200S (a) corte 260 e (b) corte 2730 - v_c 140 m/min (Ampliação 20X).

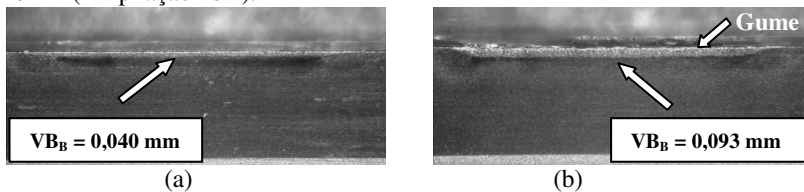
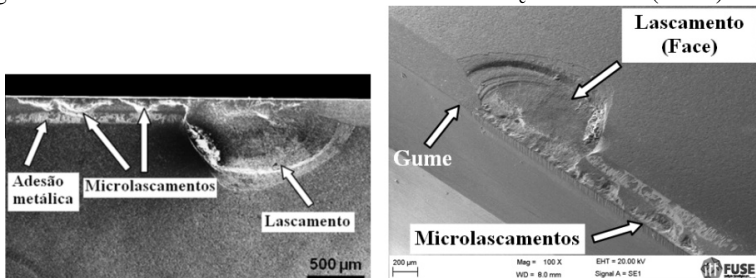
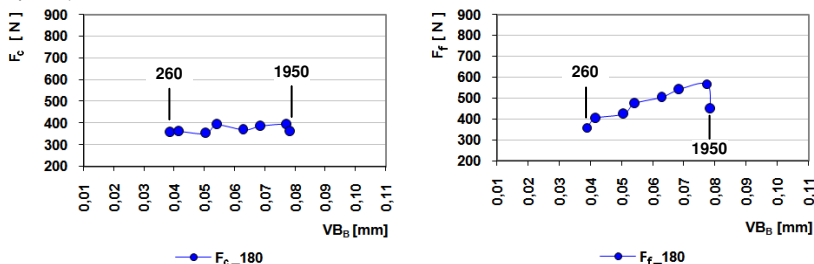


Figura 78 - Face do inserto CBN200S - corte 2730 - v_c 140 m/min (MEV).



Para a v_c 180 m/min (Figura 79), os valores de F_c apresentam pouca variação (~ 356 N no corte 260 e ~ 362 N no corte 1950). Para F_f os valores também apresentaram elevação significativa (~ 359 N no corte 260 e ~ 451 N no corte 1950). Verifica-se também decréscimo na última medição da F_c e F_f (faixa dos cortes 1690 e 1950), proporcionada pela alteração da geometria do gume (lascamento), onde a F_c diminuiu de 393 N para 362 N e a F_f diminuiu de 569 N para os 451 N.

Figura 79 - Valores capturados da F_c e F_f a cada 260 cortes - CBN200S - v_c 180 m/min.



Na Figura 80 é apresentada a progressão do desgaste de flanco ocorrido para a v_c de 180 m/min para o corte 260 e o corte 1950. Na Figura 81 verificou-se avaria (lascamento) na face do inserto, verificado na última medição (corte 1950), fazendo com que o ensaio fosse interrompido antes que o VB_B estipulado fosse alcançado.

Figura 80 - Flanco do inserto CBN200S (a) corte 260 e (b) corte 1950 - v_c 180 m/min (Ampliação 20X).

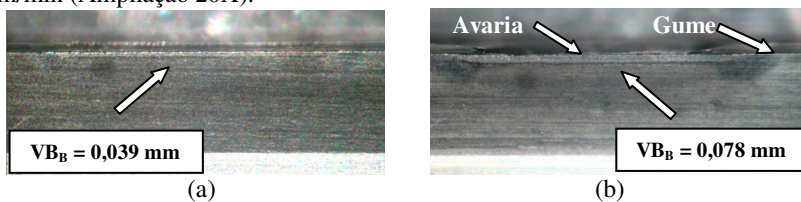
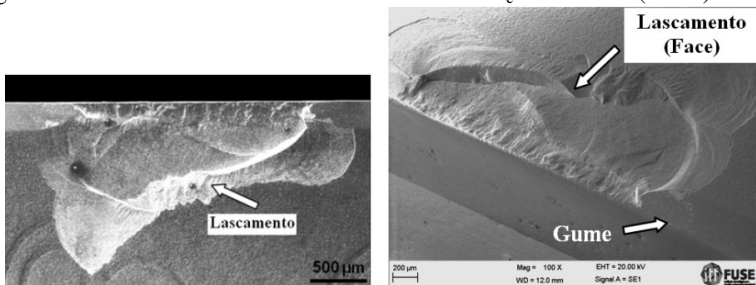
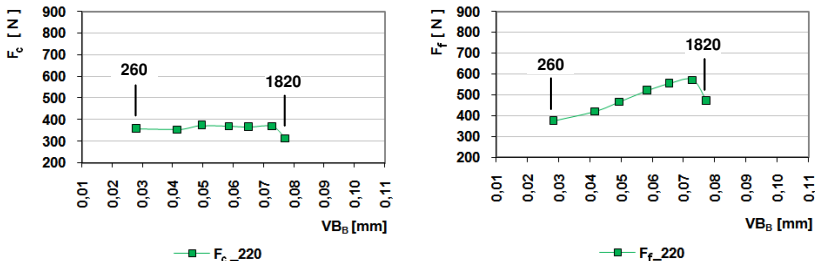


Figura 81 - Face do inserto CBN10S - corte 1950 - v_c 180 m/min (MEV).



Da mesma forma que para as velocidades de corte anteriores, na v_c 220 m/min (Figura 82), verifica-se estabilização dos valores para F_c (~357 N no corte 260 e ~314 N no corte 1820) e valores com significativa elevação para F_f (~374 N no corte 260 e ~471 N no corte 1820). Verifica-se também decréscimo na última medição da F_c e F_f (faixa dos cortes 1560 e 1820), proporcionada pela alteração da geometria do gume (lascamento), onde a F_c diminuiu de 371 N para 3315N e a F_f diminuiu de 573 N para os 471 N.

Figura 82 - Valores capturados da F_c e F_f a cada 260 cortes - CBN200S - v_c 220 m/min.



Na Figura 83 pode ser verificada a progressão do desgaste de flanco ocorrido para a v_c de 220 m/min para o corte 260 e o corte 1820. Já na Figura 84 verifica-se avaria (lascamento) na face do inserto, verificado na última medição (corte 1820), fazendo com que os ensaios fossem interrompidos antes que o VB_B estipulado fosse alcançado.

Figura 83 - Flanco do inserto CBN200S (a) corte 260 e (b) corte 1820 - v_c 220 m/min (Ampliação 20X).

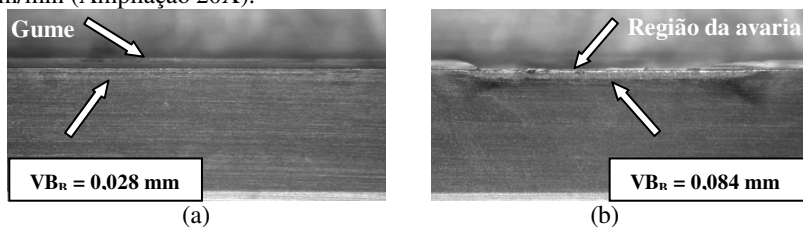
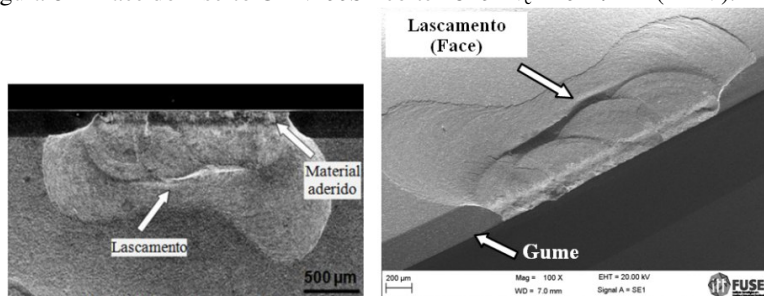


Figura 84 - Face do inserto CBN200S - corte 1820 - v_c 220 m/min (MEV).

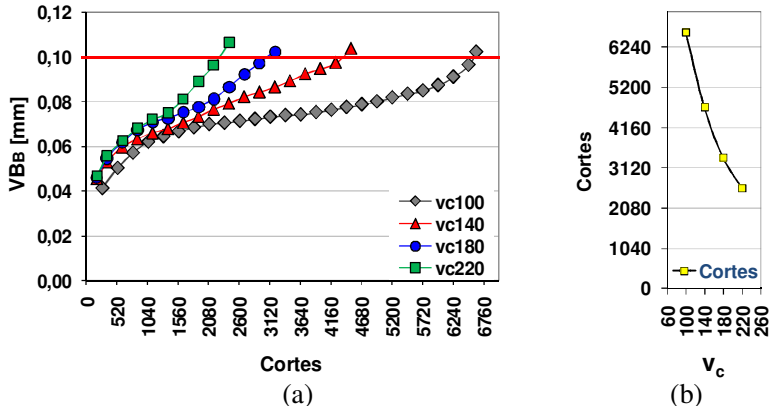


Verificou-se que para todas as velocidades de corte empregadas houve diminuição dos valores tanto para a F_c como para a F_f nas últimas medições. Esses menores valores estão vinculados à alteração da geometria do gume causado pelas avarias (lascamento do gume). Esses lascamentos, na face da ferramenta, proporcionaram situações mais favoráveis ao fluxo do cavaco ao eliminar o chanfro da região do corte, fazendo desta forma que os valores das forças de corte (F_c) e as forças de avanço (F_f) diminuíssem.

4.2.2 Ensaios com insertos de alto teor de CBN com gume apenas arredondado (CBN200E)

A Figura 85a e Figura 85b mostram respectivamente o comportamento do desgaste para insertos de alto teor de CBN de gume apenas arredondado (geometria E) e o número de cortes para a velocidade de corte entre 100 e 220 m/min.

Figura 85 - (a) Comportamento de desgaste VB_B x Cortes e (b) comportamento da v_c x nº de cortes para insertos com baixo teor de CBN, gume apenas arredondados CBN200E.



Todos os insertos com microgeometria de gume apenas arredondado (CBN200E) alcançaram a marca de desgaste de flanco estipulado. O maior número de percursos de avanço foi encontrado para a velocidade de corte de 100 m/min, diminuindo com o aumento da velocidade de corte. Observa-se que até o corte 1560, para todas as velocidades de corte, o valor do desgaste de flanco permanece na mesma ordem de grandeza, sendo que após as velocidades de corte maiores ocorre um aumento do desgaste.

Verificou-se uma diminuição do número de cortes, com aumento da v_c , para toda a faixa de velocidade de corte empregada nos testes (entre 100 e 220 m/min), sendo a diminuição do número de cortes mais significativa para a faixa de 100 a 140 m/min (Figura 85b). Esse comportamento apresentado para gume apenas arredondado (geometria E) em insertos de alto teor de CBN apresentou semelhança ao comportamento apresentado para a geometria de gume S, também de alto teor de CBN.

A Figura 86 (a, c, e, g) e em aumento (b, d, f, h) mostram as marcas de desgaste de flanco, onde se observam aderências

Da mesma forma que foi observada nos gumes dos insertos de baixo teor de CBN, essas aderências concentradas próximo ao gume não apresentam uma distribuição uniforme sobre toda a largura do desgaste de flanco. Essa não uniformidade pode ser devido a um mecanismo de remoção destas aderências na reentrada da ferramenta no corte. A ferramenta, ao reiniciar o corte, passa outra vez por uma fração de

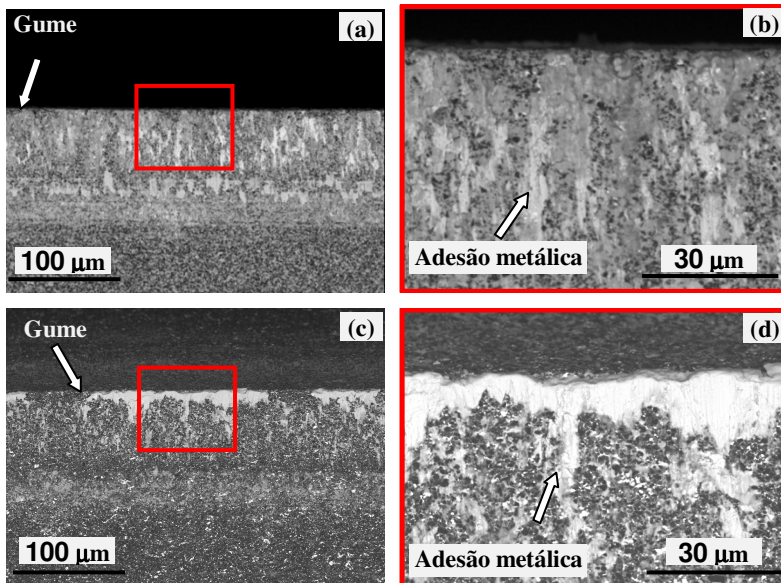
rotação do anel, sem ter a espessura mínima de usinagem, fazendo com que as aderências que estão frias e mais duras sofram uma abrasão mais significativa que apenas a abrasão causada na usinagem com espessura de 0,05 mm. Essa mesma situação acontece ao término do corte, pelo afastamento da ferramenta da peça. Assim, o início e o final da usinagem podem determinar este tipo de adesão no flanco da ferramenta.

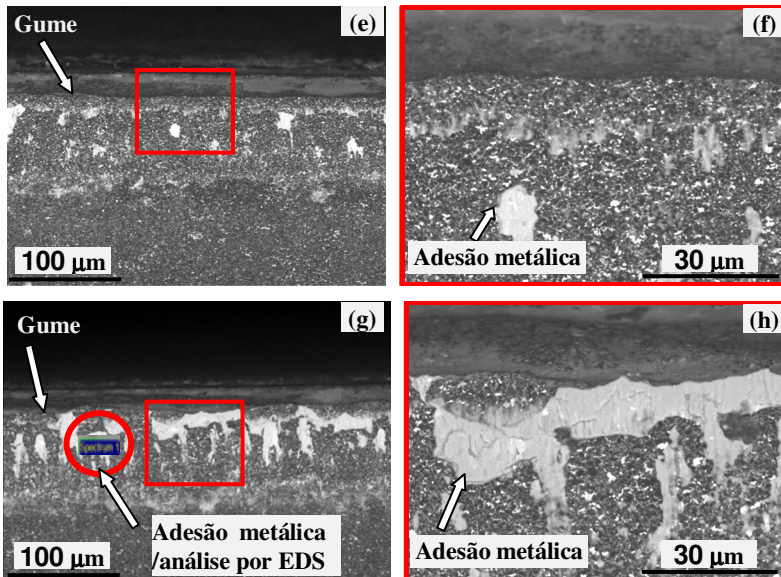
Imagens captadas através de microscopia ótica e MEV revelaram a presença de pequenas avarias (microlascamentos) na face do inserto.

Da mesma forma que para as ferramentas citadas anteriormente, foi verificada a presença de material aderido na face do inserto, imediatamente após a região de corte.

Os melhores resultados nos ensaios foram encontrados para esta microgeometria de gume apenas arredondada (E) com alto teor de CBN.

Figura 86 – Desgaste de flanco (a, c, e, g) e ampliação do desgaste (b, d, f, h) - CBN200E.

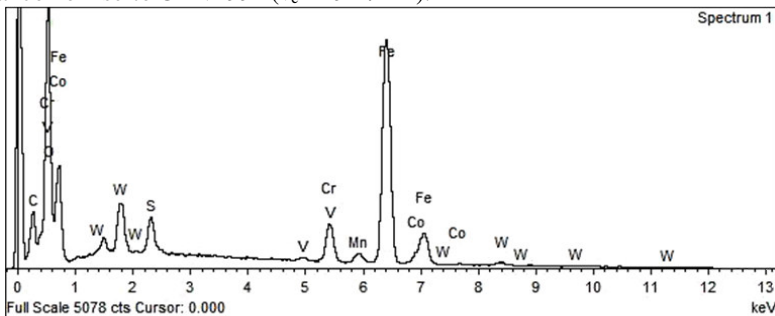




(a), (b) = v_c 100, (c) e (d) = v_c 140; (e), (f) = v_c 180 e (g), (h) = v_c 220 m/min

A Figura 87 mostra um exemplo do resultado obtido referente à análise da adesão metálica realizada sobre uma aderência no flanco no inserto CBN200E para a velocidade de corte de 220 m/min, a qual mostra os elementos que compõem a liga dos anéis, citados anteriormente na Tabela 4 e também Co, que faz parte da composição do ligante da ferramenta.

Figura 87 - Exemplo de análise por EDS realizada sobre uma aderência no flanco no inserto CBN200E (v_c 220 m/min).

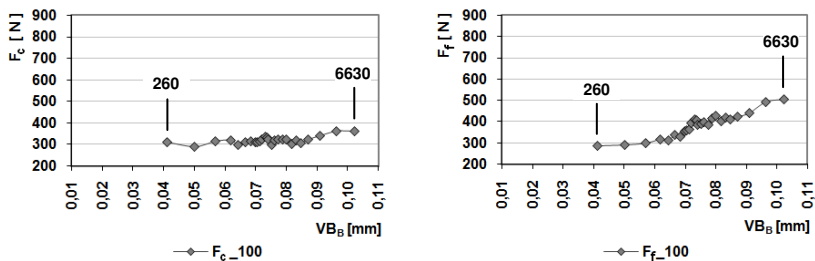


Os valores da F_c e F_f obtidas a cada 260 cortes durante a

usinagem com os insertos de alto teor de CBN (CBN200) com geometria de gume apenas arredondado (E), para as velocidades de corte entre 100 e 220 m/min são mostrados na Figura 88, Figura 91, Figura 94 e Figura 97.

Para a velocidade de corte de 100 m/min, Figura 88, as F_c apresentaram estabilização em seus valores (~ 309 N no corte 260 e ~ 304 N no corte 6630). Já para a F_f observa-se elevação nos valores (~ 285 N no corte 260 e ~ 503 N no corte 6630).

Figura 88 - Valores capturados da F_c e F_f a cada 260 cortes - CBN200E - v_c 100 m/min.



A Figura 89 mostra a progressão do desgaste de flanco ocorrido para a v_c de 180 m/min para o corte 260 e o corte 2600 e na Figura 90 início de formação de desgaste de cratera na face do inserto e presença de adesão metálica, além de microlascamentos.

Figura 89 - Flanco do inserto CBN200E (a) corte 260 e (b) corte 6630 - v_c 100 m/min (Ampliação 20X)

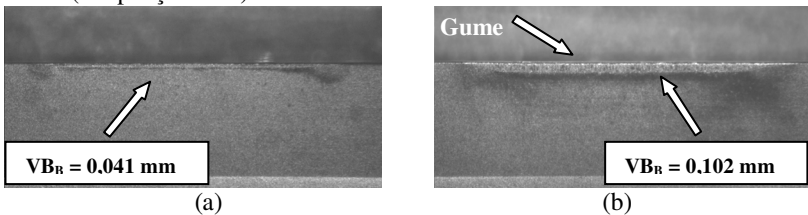
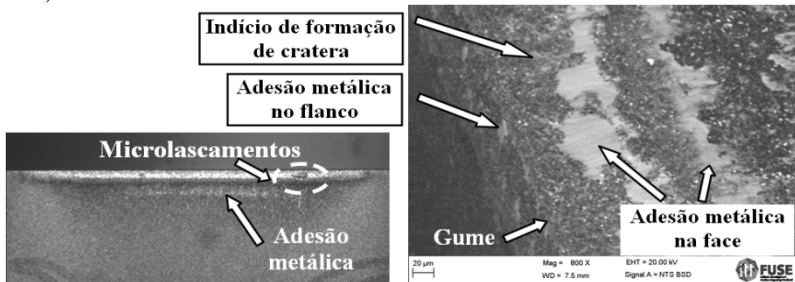
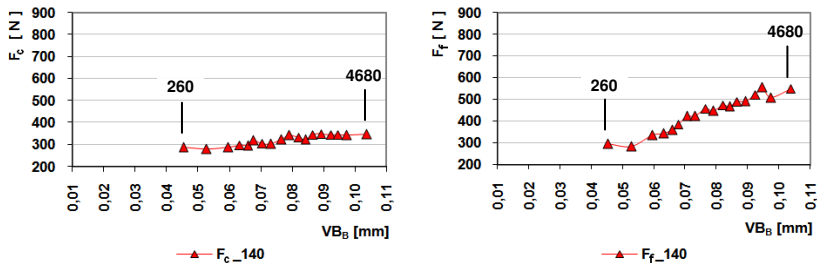


Figura 90 - Face do inserto CBN200E - corte 6630 - v_c 100 m/min (Ampliação 20X)



Os valores para a v_c 140 m/min, (Figura 91), apresentaram pequena elevação para F_c (~288 N no corte 260 e ~348 N no corte 4680). Para a F_f se verificou aumento significativo (~297 N no corte 260 e ~551 N no corte 4680).

Figura 91 - Valores capturados da F_c e F_f a cada 260 cortes – CBN200E - v_c 140 m/min



A Figura 92 mostra a progressão do desgaste de flanco ocorrido para a v_c de 180 m/min para o corte 260 (Figura 92a) e o corte 2600 (Figura 92b) e na Figura 93, a face da ferramenta com início de formação de desgaste de cratera na face do inserto, presença de adesão metálica e microlascamentos.

Figura 92 - Flanco do inserto CBN200E (a) corte 260 e (b) corte 2600 - v_c 140 m/min (Ampliação 20X).

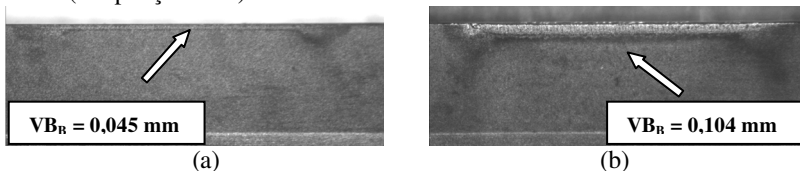
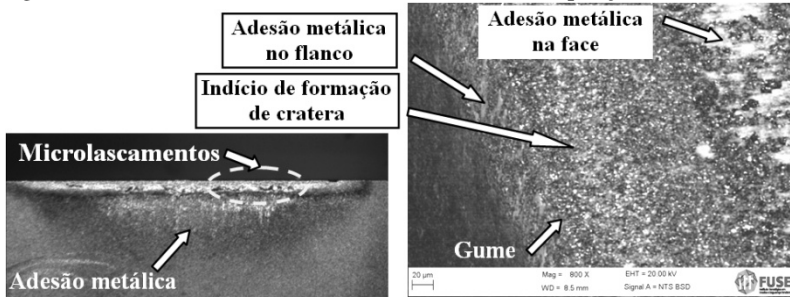
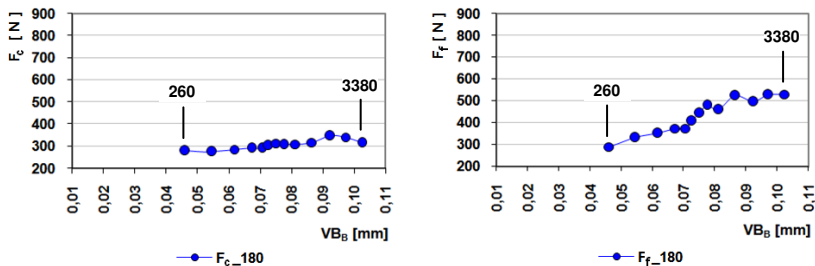


Figura 93 - Face do inserto CBN200E - corte 4680 (Ampliação 20X).



Para a v_c 180 m/min (Figura 94), nota-se pouca variação nos valores da F_c (~281 N no corte 260 e ~316 N no corte 3380). Para F_f os valores também apresentaram elevação significativa (~290 N no corte 260 e ~530 N no corte 3380).

Figura 94 - Valores capturados da F_c e F_f a cada 260 cortes - CBN200E - v_c 180 m/min



Na Figura 95 pode-se verificar a progressão do desgaste de flanco ocorrido para a v_c de 180 m/min para o corte 260 (Figura 95a) e o corte 2600 (Figura 95b). Na Figura 96, face da ferramenta, observa-se também indício de formação de desgaste de cratera na face do inserto, presença de adesão metálica e microlascamentos.

Figura 95 - Flanco do inserto CBN200E (a) corte 260 e (b) corte 3380 - v_c 180 m/min (Ampliação 20X).

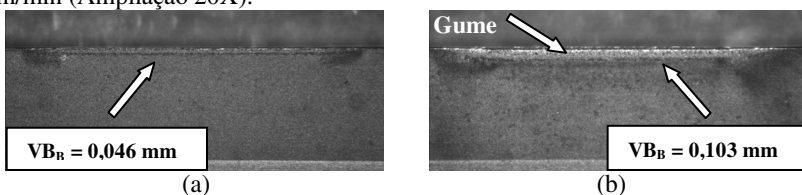
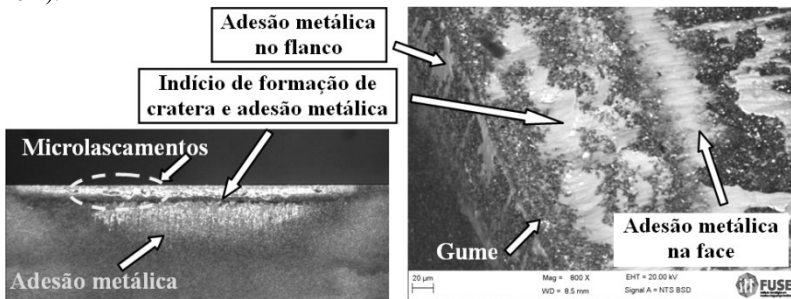
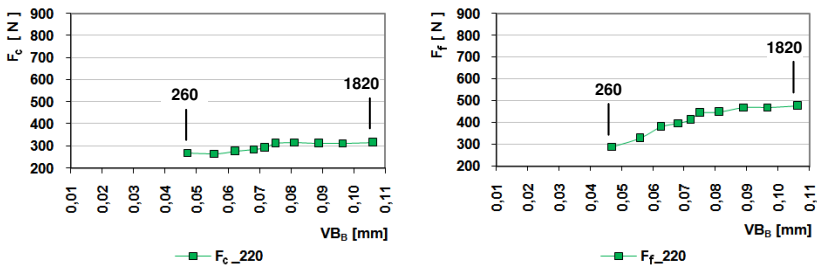


Figura 96 - Face do inserto CBN200E - corte 3380 - v_c 180 m/min (Ampliação 20X).



Da mesma forma que para as velocidades de corte anteriores, na v_c 220 m/min (Figura 97), verifica-se pequena elevação dos valores para F_c (~270 N no corte 260 e ~315 N no corte 2600) e valores em elevação para F_f (~290 N no corte 260 e ~475 N no corte 2600).

Figura 97 - Valores capturados da F_c e F_f a cada 260 cortes – CBN200E - v_c 220 m/min.



A Figura 98 mostra a progressão do desgaste de flanco ocorrido para a v_c de 180 m/min para o corte 260 (Figura 98a) e o corte 2600 (Figura 98b). Da mesma forma, na Figura 99 verifica-se indício de formação de desgaste de cratera na face do inserto, presença de adesão metálica e microlascamentos.

Figura 98 - Flanco do inserto CBN200E (a) corte 260 e (b) corte 2600 - v_c 220 m/min (Ampliação 20X).

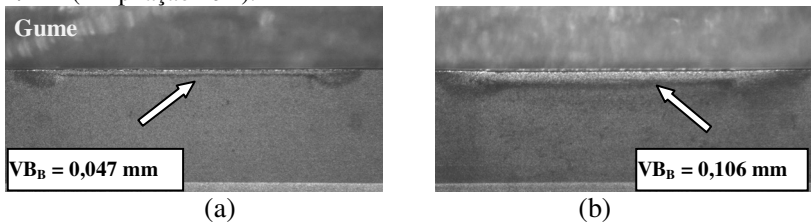
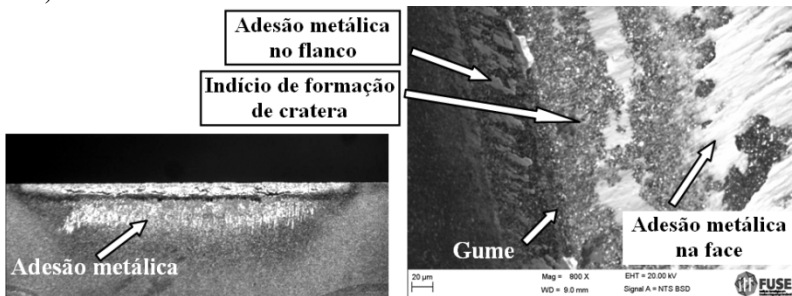


Figura 99 - Face do inserto CBN200E - corte 2600 - v_c 220 m/min (Ampliação 20X).



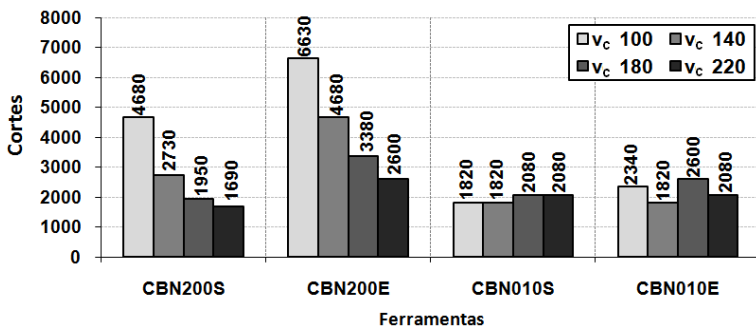
4.3 INFLUÊNCIA DA VARIAÇÃO DA VELOCIDADE DE CORTE SOBRE O NÚMERO CORTES E SOBRE AS FORÇAS F_c E F_f

No torneamento da liga de aço rápido obtida por metalurgia do pó temperado e revenido, a velocidade de corte apresentou grande influência no comportamento dos inserts de alto teor de CBN (CBN200) e baixo teor de CBN (CBN10), para ambas as geometrias de gume. Os resultados são mostrados resumidamente na Figura 100. No gráfico de barras verifica-se que o maior número de cortes em todos os ensaios foi obtido para os inserts de microgeometria de gume apenas arredondado de alto teor de CBN (6630 cortes) para a velocidade de corte de 100 m/min.

Para os inserts de baixo teor de CBN, os resultados apresentaram pequenas diferenças, com melhor desempenho para velocidade de corte de 180 m/min (2600 cortes). Verifica-se também que para velocidades de corte de 100 e 140 m/min, ferramentas de alto teor apresentaram um maior número de cortes que as ferramentas de baixo teor de CBN.

Os resultados mostrados na Figura 100 apresentam melhores comportamentos para baixas velocidades de corte em insertos de alto teor de CBN com geometria de gume chanfrado e arredondado (S) e apenas arredondado (E). Para insertos de baixo teor de CBN (CBN10) com gume chanfrado e arredondado (S), melhores resultados foram encontrados para v_c 180 e 220 m/min e para insertos de baixo teor de CBN (CBN10) com gume apenas arredondado (E), melhores resultados foram identificados para v_c 180 m/min.

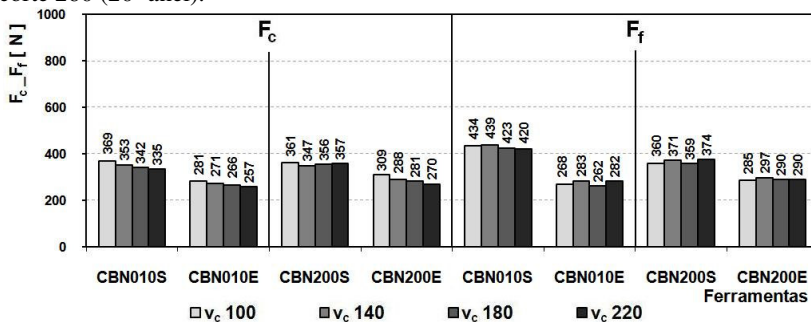
Figura 100 – Número de cortes para insertos de PCBN até atingir a marca de desgaste VB_B de 0,1mm ou ocorrência de lascamentos para a faixa de velocidade de corte entre 100 e 220 m/min.



A Figura 101 mostra os valores obtidos durante o torneamento do 20° anel: corte 260. Observa-se que a F_f é pouco influenciada pela variação da velocidade de corte. Os valores são menores para insertos com microgeometria de gume apenas arredondado (microgeometria E), tanto para as insertos de alto e como os de baixo teor de CBN.

A força de corte apresenta uma tendência clara de diminuição para um aumento da velocidade de corte, exceto para o inserto de alto teor de PCBN com gume chanfrado e arredondado (CBN200S) (Figura 101). Também se verifica pequena diferença entre a F_c e F_f para a primeira medição.

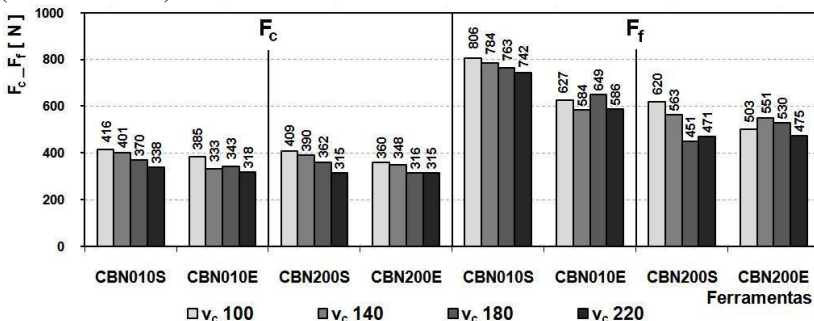
Figura 101 - Força de corte F_c e força de avanço F_f no torneamento ortogonal no corte 260 (20° anel).



Na Figura 102 são mostrados os valores da F_c e F_f , obtidos durante o torneamento do último corpo de provas (última peça da última etapa antes de atingir o critério de fim de vida). Observa-se que as forças de avanço F_f apresentam valores maiores que força de corte F_c . A força de corte apresenta uma clara tendência de diminuição com o aumento da velocidade de corte e valores apenas pouco maiores que os valores da força de corte verificada no início dos ensaios. Quanto ao comportamento da força de avanço F_f , de forma geral, observa-se também que com o aumento da velocidade de corte, há um decréscimo nesta componente. As diferenças neste comportamento podem ser creditadas a um desgaste não uniforme e a avarias que ocorreram em alguns dos inserts. Os valores da força de avanço no final de cada ensaio mostram ser consideravelmente maiores (aproximadamente o dobro) em relação aos valores verificados no início de cada ensaio. Este aumento significativo é decorrente do desgaste de flanco acentuado, dificultando a penetração do gume no material da peça. Em relação aos melhores resultados para as ferramentas de alto teor de CBN (CBN200), são decorrentes da maior dureza e da melhor condutividade térmica da ferramenta.

A Figura 102 mostra também que os maiores valores para F_c e F_f vinculam-se aos inserts com microgeometria de gume chanfrado e arredondado (S), confirmando o encontrado na revisão bibliográfica.

Figura 102 - Força de corte F_c e força de avanço F_f no torneamento ortogonal (últimas leituras).



A velocidade de corte é o parâmetro que mais influencia a vida do inserto possuindo grande correlação com a geração de calor na zona de corte. Em geral pode-se observar que, com o aumento da velocidade de corte, ocorre a redução da força de usinagem. Isto acontece pelo fato de que com o aumento da velocidade de corte menos calor é dissipado para a peça e para a ferramenta, acarretando um aumento da temperatura na raiz do cavaco. Esse aumento da temperatura na raiz do cavaco é responsável pela diminuição da força de corte (KOCH, 1996). Esses resultados estão em consonância com os encontrados por Chou *et al.* (2002) no torneamento do aço AISI 52100 endurecido e por Klimenko *et al.* (1996), no torneamento de materiais endurecidos, ambos com insertos de PCBN. Os resultados relacionados à diminuição dos valores da componente F_c também mostraram semelhanças com os encontrados por Huang (2003), ao torner aço AISI H13 endurecido também com insertos de PCBN, com diferentes velocidades de corte. Também para este mesmo material, aço AISI H13 endurecido, Özel (2003) encontrou a mesma semelhança, onde a F_c e F_f diminuíram com o aumento da velocidade de corte, a qual seu aumento proporciona elevação da temperatura facilitando assim o corte do material. Assim, verificou-se nos ensaios realizados, a diminuição das componentes da força de usinagem F_c e F_f , as quais se comportaram de acordo com o atribuído na literatura, ou seja, o aumento da velocidade de corte proporciona diminuição das componentes F_c e F_f .

Valores mais elevados, tanto para a componente F_c como para a F_f , proporcionados pela microgeometria do gume chanfrado com arredondamento, também são confirmados por Hodgson e Trendler (1981) ao usinarem aços AISI D2 (59 HRC), D6 (62 HRC) e M42 (59 HRC), Shintani *et al.* (1989) torneando aço AISI 4130 (55-61HRC),

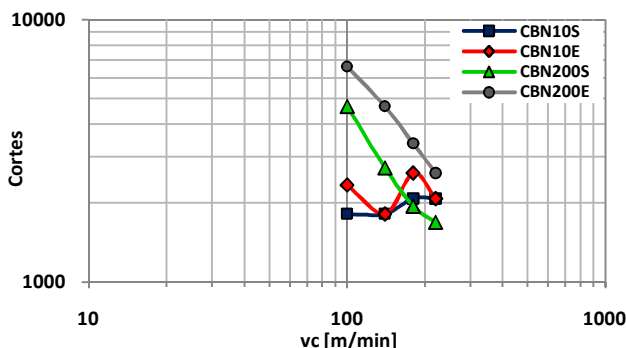
Bossom (1990) durante o torneamento de aço D3 endurecido, Thiele e Melkote (2000) na usinagem de acabamento do AISI 52100 (entre 41 e 57 HRC), Zhou *et al.* (2003) torneando aço AISI 52100 (60-62 HRC), Kountanya *et al.* (2005) ao torneiar AISI 52100 (60 HRC). Kurt e Seker (2005) com dureza de 60 HRC e Hua *et al.* (2005) torneando aço AISI 52100 (62 HRC). Esses maiores valores são proporcionados pela maior concentração de tensões na intersecção do chanfro e da face.

Influência da microgeometria de gume chanfrado com arredondamento (S) e apenas arredondado (E) em insertos de alto teor e baixo teor de CBN sobre a vida das ferramentas

O gráfico da Figura 103 mostra o número de peças fabricadas como função da velocidade de corte para os insertos com microgeometria de gume chanfrado e arredondado (S) e apenas arredondado (E) com alto e baixo teor de CBN.

Os insertos CBN200 (E - apenas arredondado e S - chanfrado com arredondamento), de alto teor de CBN, apresentam um comportamento das curvas com forma aproximadamente linear. Já os insertos CBN10E (geometria de gume apenas arredondado), de baixo teor de CBN, apresentam uma vida superior para a velocidade de corte de 100 m/min em relação aos insertos CBN10S (a geometria de gume chanfrado e arredondado) com decréscimo dos resultados para a v_c 140 m/min seguido de aumento para v_c 180 (melhor resultado) e novamente decréscimo para a v_c 220 m/min. Esse resultado (v_c 180 m/min) para insertos com microgeometria de gume apenas arredondado (CBN10E) são melhores que os encontrados para v_c 100 e 220 m/min utilizadas para insertos chanfrados e arredondados (CBN10S).

Figura 103 - Numero de cortes x velocidade de corte.



Porém, esses resultados são inferiores aos obtidos para as insertos de alto teor de CBN com gume apenas arredondado (CBN200E), as quais apresentaram melhores resultados para todos os ensaios realizados com relação às velocidades de corte adotadas.

Os melhores resultados apresentado pelas ferramentas de alto teor de CBN (CBN200) em relação às ferramentas de baixo teor de CBN (CBN10), deu-se devido a sua maior dureza, proporcionada pela maior quantidade de grãos de CBN e pela melhor condutividade térmica (SECO TOOLS, 2006), a qual proporciona melhor dissipação do calor da região de corte da ferramenta.

Quanto aos mecanismos de desgaste predominantes durante os ensaios, foi identificado principalmente o desgaste de flanco por adesão (*adritition*, onde ocorre a adesão com posterior arrancamento e arrastamento do material aderido juntamente com micro partes da ferramenta). Este tipo de desgaste também foi encontrado por Katuku et al. (2010). Evidências de processo abrasivo também foram observadas nas ferramentas.

Em relação a desgaste ocorrido na superfície de saída da ferramenta, foram identificados indícios de formação de cratera para as ferramentas de baixo e alto teor de CBN.

Os lascamentos ocorridos nas ferramentas de alto teor de CBN, com gume chanfrado e arredondado tiveram origem dos elevados esforços ocorridos chanfro do gume. Essa geometria, chanfrada, propicia maiores esforços e, conseqüentemente, a intensidade e dimensões dos lascamentos. Os lascamentos também ocorreram devido à maior dureza da ferramenta de alto teor de CBN, dureza esta proporcionada pelo maior número de grãos de CBN.

Para F_c e F_f , os valores encontrados para as ferramentas com gume apenas arredondado foram menores que para os valores das ferramentas com gume chanfrado e arredondado, resultados estes semelhantes aos encontrados por Thiele e Melkote (2000) no torneamento de aço AISI 52100 com dureza entre 45 e 60 HRC, Özel (2003) no torneamento de aço AISI H13 (55 HRC), Kurt e Seker (2005) ao toronar aço AISI 52100 (60 HRC) e Karpat e Özel (2007) ao toronar aço AISI H13 (55 HRC).

5 CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA FUTUROS TRABALHOS

A usinagem da liga de aço rápido obtida por metalurgia do pó temperada e revenida com insertos de PCBN com alto (CBN200) e baixo teor (CBN10) de CBN, com gume chanfrado com arredondamento (S) e apenas arredondado (E), com base nos resultados experimentais e análises, permite concluir que para as velocidades de corte ensaiadas:

- (i) O inserto que produziu o maior número de cortes foi o PCBN de alto teor de CBN com gume apenas arredondado (E), para a v_c variando de 100 a 220 m/min. Este melhor resultado está relacionado à maior dureza do inserto proporcionada pelo maior teor de CBN e pela maior dissipação do calor devido a sua elevada condutividade térmica em relação às ferramentas de baixo teor de CBN. Este resultado, para v_c de 100 m/min, ficou em torno de 42% melhor ao ser comparado com o inserto de microgeometria de gume S, mesmo teor, apresentando também menores forças de corte e de avanço;
- (ii) Foram observadas adesões de material dos anéis nos flancos das ferramentas para ambas as geometrias de gume e ambas as classes de PCBN em toda a faixa de velocidade de corte utilizada, como Cr, V, C W e Fe, em maiores e menores quantidades confirmadas pelos ensaios de EDS;
- (iii) Foi verificado indício de formação de cratera para os insertos com microgeometria de gume E e S de alto teor de CBN;
- (iv) Os insertos com microgeometria de gume chanfrado com arredondamento (microgeometria S), de alto teor de CBN, apresentaram lascamentos na face para todas as velocidades de corte ensaiadas, proporcionados pelos elevados esforços relacionados a essa geometria e também pela maior dureza da ferramenta;
- (v) Os insertos de baixo teor de CBN com microgeometria de gume apenas arredondado (E) apresentaram maior número de cortes para v_c de 180 m/min;
- (vi) Os insertos de baixo teor de CBN com microgeometria de gume chanfrado com arredondamento (S) apresentaram maior número de cortes para a faixa de velocidade de corte entre 180 e 220 m/min;
- (vii) Maiores valores de F_c e F_f foram encontrados para ferramentas com gume chanfrado com arredondamento, confirmando o descrito na

literatura.

- (viii) Não houve aumento significativo no decorrer dos ensaios para a F_c , da primeira a última medição. Já para as F_f , houve aumento significativo no decorrer das medições, devido ao aumento da região de contato entre o flanco da ferramenta e a peça, durante a usinagem.
- (ix) Para ferramentas de alto teor de CBN com geometria de gume chanfrado com arredondamento, após avaria, houve decréscimo na última medição dos valores, devido à alteração da geometria do gume proporcionada pelo lascamento.
- (x) O mecanismo de desgaste predominante nas ferramentas foi de adesão com arrancamento e arrastamento do material aderido juntamente com partículas da ferramenta (*attrition*).

Esta pesquisa gerou resultados relacionados ao desgaste, mecanismos de desgaste em insertos de PCBN e valores das componentes F_f e F_c no torneamento da liga de aço rápido temperada e revenida obtida por metalurgia do pó. A metodologia utilizada nos ensaios consistiu em analisar a influência da microgeometria de gume variando o teor de CBN e a velocidade de corte durante o torneamento longitudinal ortogonal. Esta metodologia se mostrou extremamente válida na identificação de novos aspectos quanto ao desgaste de insertos de PCBN.

Os resultados encontrados são válidos se empregados em orientação para a escolha da microgeometria de gume, do teor de CBN e velocidades de corte para, com isso, melhorar o desempenho dos insertos de PCBN no processo de torneamento de aço rápido obtido por metalurgia do pó, temperado e revenido.

Assim, com base nos resultados encontrados recomenda-se para o torneamento da liga em estudo, temperada e revenida, utilizada nesta pesquisa, insertos de alto teor de CBN (CBN200) com microgeometria de gume somente arredondado (E), devido aos melhores resultados obtidos.

5.1 PROPOSTA PARA TRABALHOS FUTUROS

Na verificação da influência da microgeometria do gume, do teor de CBN e da variação da velocidade de corte no desgaste e nos mecanismos de desgaste dos insertos de PCBN no torneamento do aço rápido obtido por metalurgia do pó, temperado e revenido, em torneamento longitudinal ortogonal, ao analisar os dados coletados,

novos questionamentos foram surgindo. Assim, sugere-se que para análise de desgaste de insertos de PCBN realizar novos ensaios com intuito de complementar os resultados obtidos nesta pesquisa. Sendo assim propõe-se os seguintes tópicos:

- Torneamento do aço rápido, obtidos por metalurgia do pó temperado e revenido, com insertos de PCBN revestidos (TiN);
- Mudar a estratégia de torneamento utilizando a fixação dos anéis em um eixo tipo mandril, torneando seu diâmetro externo longitudinalmente;
- Utilizar insertos de PCBN com largura de chanfro de 0,20 mm;
- Utilizar insertos de PCBN com ângulos de chanfro de 15° e 30°;
- Utilizar insertos de PCBN com diferentes raios de arredondamento de gume (valores menores e maiores que 0,015 mm para gumes apenas arredondado e valores menores e maiores que 0,025 mm para gumes chanfrados e arredondado);
- Empregar avanços de 0,08 e 0,10 mm;
- Empregar insertos de PCBN de outros fabricantes;
- Utilizar insertos sem ligantes (BCBN);
- Utilizar insertos com tamanhos diferentes de grão de CBN (valores médios de grãos menores e maiores que 2 μ m);
- Torneamento com maiores velocidades de corte (valores superiores a 220 m/min);
- Utilizar *software* de simulação, através de elementos finitos, para compreender as causas das avarias ocorridas nos insertos de alto teor de CBN com microgeometria de gume S;
- Utilizar essa mesma metodologia com outros tipos de ligas de aço rápido obtidos por metalurgia do pó;
- Analisar a adesão metálica no flanco da ferramenta com uso de dispositivo *Quick-stop*.

Para isso, as parcerias entre universidades e empresas são essenciais, pois os materiais necessários às pesquisas são de custo elevado e a doação destes, por parte de empresas, é uma forma de concretizar avanços científicos. Com as parcerias é possível aperfeiçoar conhecimentos e compartilhá-los com as empresas que, imediatamente, usufruem das informações diminuindo a distância que há entre a teoria e a prática, consequentemente, empregando-as como alternativas em soluções de problemas enfrentados no cotidiano.

REFERÊNCIAS

AMERICAN NATIONAL STANDARD. **Tool life testing with single-point turning tools**. ASME, 51p, 1985.

ARSECULARATNE, J.A.; ZHANG, L.C.; MONTROSS, C.; MATHEW, P. **On machining of AISI-D2 steel with PCBN tools**. Journal of Materials Processing Technology, 2006b.

ARSECULARATNE, J. A.; ZHANG, L. C.; MONTROSS, C. **Wear and tool life of tungsten carbide. PCBN and PCD cutting tools**. Machining Tools Manufacturing, nr. 46. pp. 482-491, 2006a.

ASM METALS HANDBOOK. **Properties and Selection Irons, Steels, and High-Performance Alloys**. 10 ed., ASM, 1991. Vol. 1, p. 1203-1224, 1991.

BARAN, M. C.; PRUCHER, T. **Application of Sinter-Hardenable Materials for Advanced Automotive Applications such as Gears, Cams, and Sprockets**. Disponível em: <http://www.hoegtest.com/TechPapersv2/80.pdf>. Acesso em: 20.02.2013.

BARRY, J.; BYRNE, G. **Cutting tool wear in the machining of hardened steels Part II: cubic boron nitride cutting tool wear**. Wear, 247:152-60, 2001.

BARTARYA, B.; CHOUDHURY, S. K. **State of the art in hard turning**. International Journal of Machine Tools & Manufacture, Vol. 53, pp. 1-14, 2012.

BENGA, G. C, ABRÃO, A. M. **Turning of hardnees 100Cr6 bearing steel with ceramic and PCBN tools**. Journal Material Processing Technology. nr. 143/144. pp. 237-241, 2003.

BOSSOM, P. K. **Finish machining of hard ferrous workpieces**. Industrial Diamond Review, Vol. 5, pp. 228-232, 1990.

BYRNE, G, DORNFELD, D., DENKENA, B. **Advancing cutting technology**. Annals of the CIRP, Vol. 52, pp. 483-507, 2003.

CHIAVERINI, V. **Metalurgia do pó**. 4ed, São Paulo: Associação

Brasileira de Metalurgia e Materiais, 336p, 2001.

CHILDS, T. **Metal Machining: theory and applications**. 1ed. London: John Wiley Professional, 406p, 2000.

CHOU, Y. K.; EVANS, C. J.; BARASH, M. M. **Experimental investigation on CBN turning of hardened AISI 52100 steel**. Journal Materials Processes Technology, Vol. 124, pp. 274-283, 2002.

CHRYSSOLOURIS, G.; TÖNSHOFF, H. K. **Effects of machine-tool-workpiece stiffness on the wear behaviour of superhard cutting materials**. Annals of the CIRP, Vol. 31, pp. 65-69, 1982.

DAVIES, M. A.; CHOU, Y.; EVANS, C. J. **On chip morphology, tool wear and cutting mechanics in finish hard turning**. Annals of the CIRP, Vol. 45, pp. 77-82, 1996.

DINIZ, A. E.; GOMES, D. M., BRAGHINI Jr, A. **Turning of hardened steel with interrupted and semi-interrupted cutting**. Journal of Materials Processing Technology, Vol. 159, pp. 240-248, 2005.

DINIZ, A. E.; MARCONDES, F. C.; COPPINI, N. L. **Tecnologia da usinagem dos materiais**. 4ed. São Paulo: Artliber Editora, 249p, 2003.

DOGRA, M.; SHARMA, V. S.; SACHDEVA, A.; SURI N. M.; DUREJA, J. S. **Tool Wear, Chip Formation and Workpiece Surface Issues in CBN Hard Turning: A Review**. International Journal of Precision Engineering and Manufacturing. Vol. 11, nr. 2, pp. 341-358, 2010.

EDA, H.; KISHI K.; HASHIMOTO, H. **Wear resistance and cutting ability of a newly developed cutting tool**. In: Hashimoto H, editor. Proceedings of an international conference on cutting tool materials. Kentucky, USA: American Society for Metals, Ft. Mitchell, pp. 265-280, 1980.

ENOMOTO, S.; KATO, M.; MIYAZAWA, S.; ONO, T. **Characteristics of tool life of CBN cutting tool in turning chromium–molybdenum steels of various hardness**. Bulletin of Japan Society of Precision Engineering. Vol. 21 nr. 3, pp. 209-212, 1987.

FARHAT, Z. N. **Wear mechaniam of CBN cutting tool during high-speed machining of mold steel.** Materials Science Engineering, A361:100-110, 2003.

FERRARESI, D. **Fundamentos da usinagem dos metais.** São Paulo: Editora Edgard Blücher Ltda, Vol. 1, 751p, 1977.

FIGUEIRA, D. T. A. Filho. **Dureza de corpos sinterizados.** Disponível em <http://www.bsmetalurgica.com.br/ws/files/dureza-de-corpos-sinterizados.pdf>. Acesso em: 04.01.2013.

GERMAN, R. M. **Powder metallurgy science.** Princeton, NJ: MPIF, 2ed, 1984.

GHASEMPOOR A.; JESWIET, J.; MOORE, T.N. **Real time implementation of on-line tool condition monitoring in turning.** International Journal of Machine Tools & Manufacture, nr. 39, pp. 1883-1902, 1999.

HARDINGEUS. **Hard turning and the machine tool.** Disponível em <http://hardingeus.com/usr/pdf/hardturn/ASME.pdf>. Acessado em 24.06.2009.

HODGSON, T.; TRENDLER, P. H. H. **Turning Hardened Tool Steels with Cubic Boron Nitride Inserts.** Annals of the CIRP, Vol. 30, pp. 63-66, 1981.

HABERBERGER, T.; HANEJKO F.; BARAN, M. **Advanced Processing of Sinter-Hardening Materials.** Disponível em: <http://www.hoegtest.com/TechPapersv2/90.PDF>. Acesso em: 18.02.2013.

HOOPER, R.M.; SHAKIB, J.I.; PARRY, A.; BROOKES, C.A. **Mechanical properties, microstructure and wear of DBC50.** Industrial Diamond Review, Vol. 4, pp. 170-173, 1989.

HOOPER, R. M.; SHAKIB I.; BROOKES, C. A. **Microstructure and Wear of TiC-Cubic BN Tools.** Materials Science and Engineering, Vol. A105/106, pp. 429-433, 1988.

HUA, J.; SHIVPURI, H.; CHENG, X.; BEDEHAR, V.;

MATSUMOTO, Y.; Hashimoto, Y.; Watkins, T. R. **The effect of feed rate, workpiece hardness and cutting edge on the residual stress.** Journal Material Science Engineering, Vol. A394, pp. 238-248, 2005.

HUANG, Y.; LIANG, S. Y. **Cutting forces modeling considering the effect of tool thermal property - application to CBN hard turning.** International Journal of Machine Tools & Manufacture Vol. 43, pp. 307-315, 2003.

HUANG, Y.; LIANG, S. Y. **Effect of cutting conditions on tool performance in CBN hard turning.** Journal of Manufacturing Processes, Vol. 7, nr. 1, 2005.

HUDDLE, D. **A new direction for turning: plunge turning can be a cost-effective grinding alternative.** Manufacturing Engineering. Vol. 128, nr. 4, 2002.

HUDDLE, D. **New hard turning tools and techniques offer a cost-effective alternative to grinding.** Tooling and Production Magazine. Vol. 80, pp. 90-103, 2001.

IERVOLINO, F. **Metalurgia do Pó - Aço sinterizado: Posso tratar termicamente?** Disponível em <http://www.revistaih.com.br/coluna/metalurgia-do-po-aco-sinterizado-posso-tratar-termicamente/>. Acesso em 05.02.2013.

IGHARO, M.; WOOD, J. V. **Effects of consolidation parameter on properties of sintered high speed steels.** Powder Metallurgy, Vol. 23, nr. 1, pp. 70-76, 1990.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **ISO 3685: tool life testing with single-point turning tools.** 2ed. Genève, 48p, 1993.

JANG, G.B.; HUR, M.D.; KANG, S.S. **A study on the development of a substitution process by powder metallurgy in automobile parts.** Journal Material Processing Technology. Vol. 100, pp. 110-115, 2000.

JESUS, E. S. J. **Processamento, usinagem e desgaste de ligas sinterizadas para aplicações automotivas.** São Paulo/SP, Tese (Doutorado). Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares. 162p,

2006.

KARPAT, Y.; ÖZEL, T. **3-D FEA of hard turning: investigation of PCBN cutting tool micro-geometry effects**. Transactions of NAMRI/SME, Vol. 35, 8p. 2007.

KATUKU, K.; KOURSARIS, A.; SIGALAS, I. **Wear mechanisms of PCBN cutting tools when dry turning ASTM Grade 2 austempered ductile iron under finishing conditions**. Wear, Vol. 268, pp. 294-301, 2010.

KLIMENKO, S.A.; MUKOVOZ, Y. A.; LYASHKO, V.A.; VASHCHENKO, A.N.; OGORODNIK, V.V. **On the wear mechanism of cubic boron nitride base cutting tools**. Wear, Vol. 157, pp. 1-7, 1992.

KLIMENKO, S. A.; MUKOVOZ, Y. A.; POLONSKY, L. G. **Cutting Tools of Superhard Materials**. Key Engineering Materials, Vol. 114, pp. 1-66, 1996.

KLOCKE, F.; KRATZ, H. **Advanced tool edge geometry for high precision hard turning**. Annals of the CIRP, Vol. 54, nr. 1, pp. 47-50, 2005.

KOCH, K. F. **Technologie des Hochpräzisions-Hartdrehens**. Dr.-Ing. Dissertation, RWTH - Aachen, 170p., 1996.

KÖNIG, W.; NEISES, A. **Wear mechanisms of ultrahard, non-metallic cutting materials**. Wear, Vol. 162-164, pp. 12-21, 1993.

KÖNIG W.; KLINGER M.; LINK R. **Machining Hard Materials with Geometrically Defined Cutting Edges-Field of Applications and Limitations**. Annals of the CIRP, Vol. 39, pp. 61-64, 1990.

KÖNIG, W.; KOMANDURI, R.; TÖNSHOFF, H.K.; ACKERSCHOTT, G. **Machining of hard materials**. Annals of the CIRP, Vol. 32, nr. 2, pp. 417-427, 1984.

KÖNIG, W. **Tecnologia da fabricação: torneiar, fresar e furar**. Traduzida e adaptada por Prof. Dr. Ing. Walter Lindolfo Weingaertner e Prof. Dr. Eng. Rolf Bertrand Schroeter, Universidade Federal de Santa

Catarina. Florianópolis, SC, Vol 1, 421p. 1981.

KÖNIG, W.; LANGHAMMER, K.; SCHEMMEL, H. U. **Correlations between cutting force components and tool wear**. Annals of the CIRP, Vol. 21, nr.1, pp. 19-20, 1972.

KOUNTANYA, R.; VARGHESE, B.; AL-ZKERI, I.; D'ANNA, L.; ALTAN, T. **Study of PCBN tool edge preparation in orthogonal hard turning**. In: Proceedings of the first international diamond at work conference, 2005.

KURT, A.; SEKER, U. **The effect of chamfer angle of polycrystalline cubic boron nitride cutting tool on the cutting forces and the tool stresses in finish hard turning of AISI 52100 steel**. Materials and Design. Vol. 26, pp. 351-356, 2005.

KUSHNIR, E., PATEL, M.R., SHEEHAN, T.M. **Material consideration in optimization of machine tool structure**. Proceedings of 2001 ASME International Mechanical Engineering Congress and Exposition, November 11-16, New York, 2001.

LAHIFF, C.; GORDON, S.; PHELAN, P. **PCBN tool wear modes and mechanisms in finish hard turning**. Robotics and Computer-Integrated Manufacturing, Vol. 23, pp. 638-644, 2007.

LINDSLEY, B.; MURPHY, T. **Effect of post sintering thermal treatments on dimensional precision and mechanical properties in sinter-hardening pm steels**. Disponível em: <http://www.hoegtest.com/TechPapersv2/194.pdf>. Acesso em 20.02.2013.

LUO, S. Y.; LIAO, Y.S.; TSAI, Y.Y. **Wear characteristics in turning high hardness alloy steel by ceramic and CBN tools**. Journal of Materials Processing Technology, nr. 88, p. 114-121, 1999.

MACHADO, A.R.; Da SILVA, M.B. **Usinagem dos Metais - Apostila Didática**. Uberlândia: Edufu (Editora UFU), 257p., 2004.

MAHFOUDI, F.; LIST, G.; MOLINARI, A.; MOUFKI, A.; BOULANOUARLL. **High speed turning for hard material with PCBN**. International Journal Machining and Machinability of Materials. Vol. 3, nr. 1-2, pp. 62-79, 2008.

MORO, N.; AURAS, A. P. **Processo de fabricação: metalurgia do pó e o futuro da indústria**. Florianópolis. Disponível em: <<http://www.norbertocefetsc.pro.br>>. Acesso em: 08 jan. 2013.

MARUCCI, M. L.; FILLARI, G.; KING, P.; NARASIMHAN K. S. **A review of current sinter-hardening technology**. PM2004 World Congress, Vienna, Austria, 2004.

MITSUBISHI MATERIALS. **Catálogo geral: ferramentas de torneamento, ferramentas rotativas e soluções de fixação**, 2008.

NARUTAKI, N.; YAMANE, Y. **Tool wear and cutting temperature of CBN tools in machining of hardened steels**. Annals of the CIRP, Vol. 28, pp. 23-28, 1979.

OHTANI, T.; YOKOGAWA, H. **The effects of workpiece hardness on tool wear characteristics**. Bulletin of Japan Society of Precision Engineering. Vol. 22, nr. 3, pp. 229-231, 1988.

ÖZEL, T. **Modeling of hard part machining: effect of insert edge preparation in CBN cutting tools**. Journal Materials Processes Technology, Vol. 141, pp. 284-293, 2003.

Özel T. **Computational modelling of 3D turning: Influence of edge micro-geometry on forces, stresses, friction and tool wear in PcBN tooling**. Journal of Materials Processing Technology, nr. 209, pp. 5167-5177, 2009.

PAWADE, R. S.; JOSHI, S. S.; BRAHMANKAR, B. K. **Effect of machining parameters and cutting edge geometry on surface integrity of high speed turned inconel 718**. Journal Machining Tools Manufacturing. nr. 48, pp. 15-28, 2008.

POULACHON, G.; BANDYOPADHYAY, B. P.; JAWAHIR, I. S.; PHEULPIN, S.; SEGUIN, E. **Wear behaviour of CBN tools while turning various hardened steels**. Wear, Vol. 256, pp. 302-310, 2004.

POULACHON, G.; BANDYOPADHYAY, B. P.; JAWAHIR, I. S.; PHEULPIN, S.; SEGUIN, S. **The influence of the microstructure of hardened tool steel workpiece on the wear of PCBN cutting tools**. International Journal of Machining Tools and Manufacturing, Vol 43,

pp. 139-144, 2003.

POULACHON, G.; MOISAN, A.; JAWAHIR, I. S. **Tool wear mechanisms in hard turning with PCBN tools**. Wear, nr. 250, pp. 576-586, 2001.

RECH, J. **Cutting edge preparation and surface issues**. HSS Forum's International Conference, Aachen, 2005.

ROCHA, C. A.; SALES, W. F.; BARCELLOS, C. S.; ABRÃO, A. M. **Evaluation of the wear mechanisms and surface parameters when machining internal combustion engine valve seats using PCBN tools**. Journal of Materials Processing Technology, Vol. 145, pp. 397-406, 2004.

RUTZ, H. G.; GRAHAM, A. G.; DAVALA, A. B. **Sinter-hardening P/M steels**. Presented at PMTEC'97 - International Conference on Powder Metallurgy & Particulate Materials, 1997.

SAHIN, Y. **Comparison of tool life between ceramic and cubic boron nitride (CBN) cutting tools when machining hardened steels**. Journal of Material Processing Technology, nr. 209, pp. 3478-3489, 2009.

SALES, W. F., COSTA, L. A., SANTOS, S. C., DINIZ, A. E., BONNEY, J. e EZUGWU, E. O. **Performance of coated, cemented carbide, mixed-ceramic and PCBN-H tools when turning W320 steel**. International Journal of Advance Manufacturing Technology, Vol. 41, pp. 660-669, 2009.

SALGADO, L.; AMBROZIO Filho, F.; LEAL Neto, R.M.; COLOSIO, M.A.; HERRMANN Filho, C.R.; ROSSI, J.L. **P/M high-speed steels for valve seat inset application**. SAE TRANSACTIONS: Journal of materials and manufacturing, Vol. 110, pp. 261-264, 2001.

SCHNEIDER, G. Jr. **Machinability of metals**. In: Schneider G. Jr; Cutting tool applications. New Jersey, Prentice Hall, pp. 4-10, 2002.

SECO TOOLS. **Secomax PCBN: Technical Guide 2006**. Grafiska Byran Örebro/PA Group Karistad - Fagersta, Sweden, 2005.

SHINTANI, K.; UEKI, M.; FUJIMURA, Y. **Optimum tool geometry of CBN tool for continuous turning of carburized steel**. International Journal Machining Tools Manufacturing, Vol. 29, pp. 403-13, 1989.

SILVA, L. R.; COELHO, R. T.; CATAI, R. E. **Desgaste de ferramentas no torneamento com alta velocidade de corte da superliga "waspaloy"**. *Rem: Rev. Esc. Minas* [online], Vol.57, nr.2, pp. 109-114, 2004.

SILVAA, R. H, L. **Monitoramento do desgaste de ferramentas no Fresamento de topo através dos sinais de potência e Emissão acústica e redes neurais**. Uberlândia - MG, Dissertação (Mestrado), Pós-graduação em Engenharia Mecânica, 114p, 2010.

STEMMER, C. E. **Ferramentas de corte I**. 4ed., Florianópolis: Editora da UFSC, 249p., 1995.

SUMIYA, H.; UESAKA, S.; SATOH, S. **Mechanical properties of high purity polycrystalline CBN synthesized by direct conversion sintering method**. Journal Material Science, nr. 35, pp. 1181-1186, 2000.

THIELE, J.D.; MELKOTE, S.N. **Effect of cutting edge geometry and workpiece hardness on surface generation in the finish hard turning of AISI 52100 steel**. ASME. Journal Manufacturing Science. Vol. 122, pp. 467-479, 2000.

THÜMMLER, F.; OBERACKER, R. **An introduction to powder metallurgy**. The University Press, Cambridge, 1993.

TÖNSHOFF, H.K., ARENDT, C., BEN, A. R. **Cutting of hardened steel**. Annals of the CIRP, Vol. 49, pp. 547-566, 2000.

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

VIeregge, G. **Zerspanung der Eisenwerkstoffe**. Stahleisen-Bücher, Vol. 16, Stahleisen GmbH, Düsseldorf, 346p., 1959.

ZAPATA, C.W. **Ciclo de palestras sobre metalurgia do pó**. FEJ / UDESC, Joinville, dez, 1987.

ZAREENA, A. R.; RAHMANM, M.; WONG, Y.S. **Binderless CBN tools, a breakthrough for machining titanium alloys.** Journal of Manufacturing Science and Engineering, Vol. 127, pp. 277-279, 2005.

ZHOU, J. M.; WALTER, H., ANDERSSON, M.; STAHL, J. E. **Effect of chamfer angle on wear of PCBN cutting tool.** International Journal of Machining Tools and Manufacturing, Vol. 43, pp. 301-305, 2003.

ZIMMERMANN, M; LAHRES, M; VIENS, D.V.; LAUBE, B.L. **Investigations of the wear of cubic boron nitride cutting tools using Auger electron spectroscopy and X-ray analysis by EPMA.** Wear, Vol. 209, pp. 241-246, 1997.

WENTORF, R, H. JR. **Synthesis of the Cubic Form of Boron Nitride.** The Journal of Chemical Physics, Vol. 34. Nr. 3, 1961.

WYEN C. F. **Rounded cutting edges and their influence in machining titanium.** Dr-Ing. Dissertation, RWTH-Aachen, 2011.

APÊNDICE 1 - GRÁFICOS DAS COMPONENTES F_c e F_f INSERTOS CBN10S

Figura 104 - Caracterização da F_c e F_f - v_c 100 m/min- CBN10S

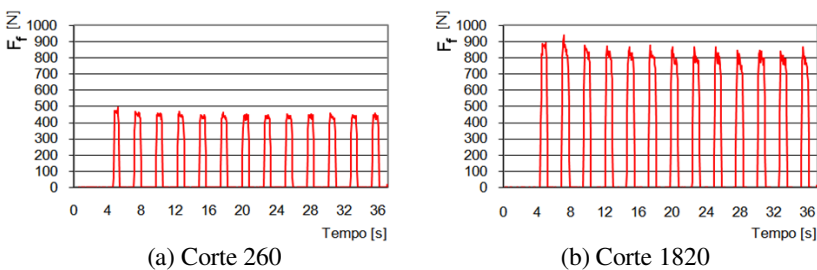
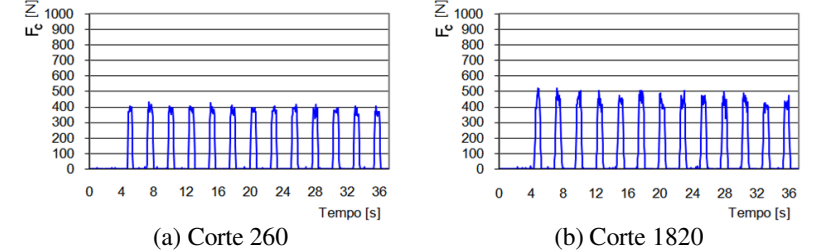


Figura 105 - Caracterização da F_c e F_f - v_c 140 m/min - CBN10S

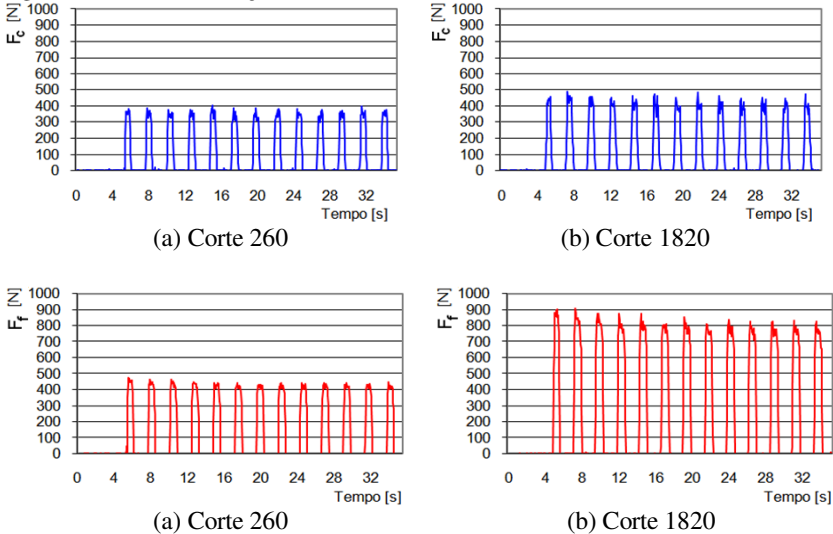
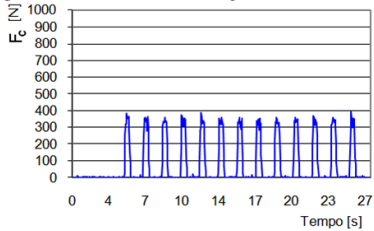
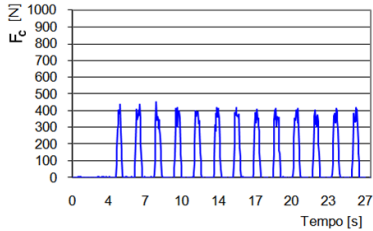


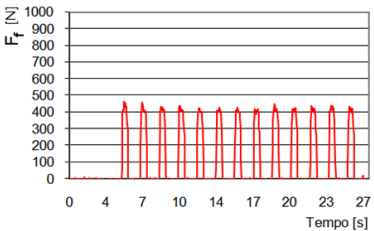
Figura 106 - Caracterização da F_c e F_f - v_c 180 m/min - CBN10S



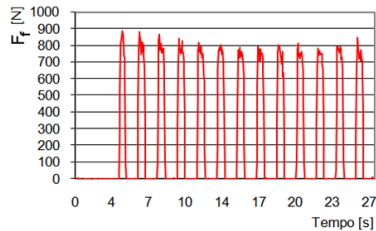
(a) Corte 260



(b) Corte 2080

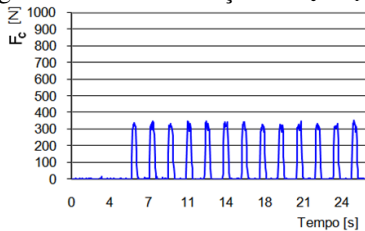


(a) Corte 260

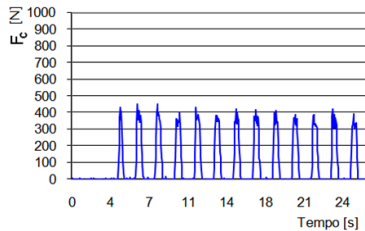


(b) Corte 2080

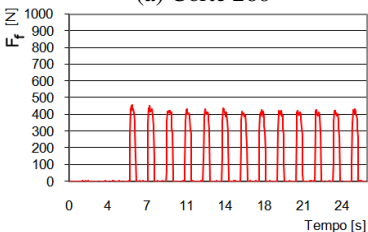
Figura 107 - Caracterização da F_c e F_f - v_c 220 m/min - CBN10S



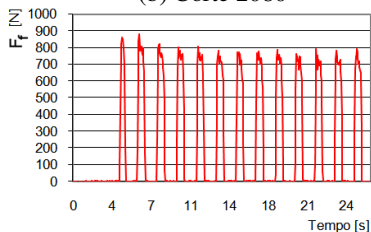
(a) Corte 260



(b) Corte 2080



(a) Corte 260



(b) Corte 2080

APÊNDICE 2 - GRÁFICOS DAS COMPONENTES F_c E F_f INSERTOS CBN10E

Figura 108 - Caracterização da F_c e F_f - v_c 100 m/min - CBN10E

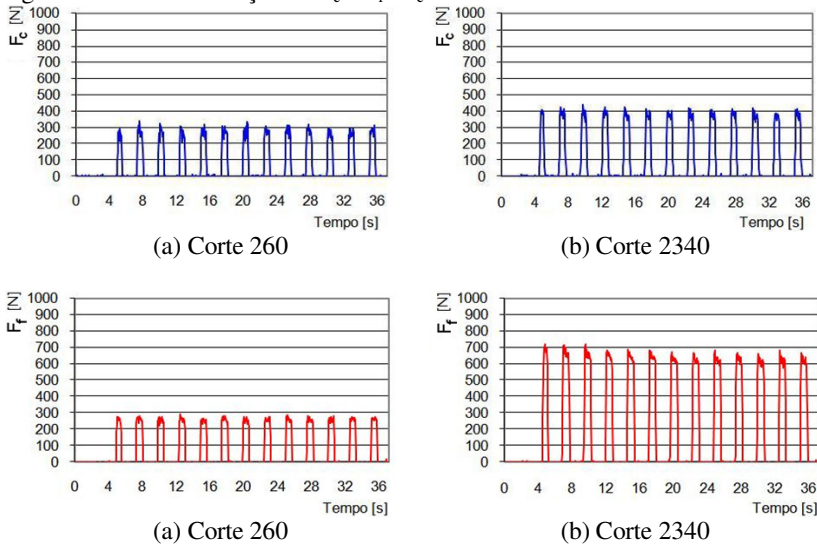


Figura 109 - Caracterização da F_c e F_f - v_c 140 m/min - CBN10E

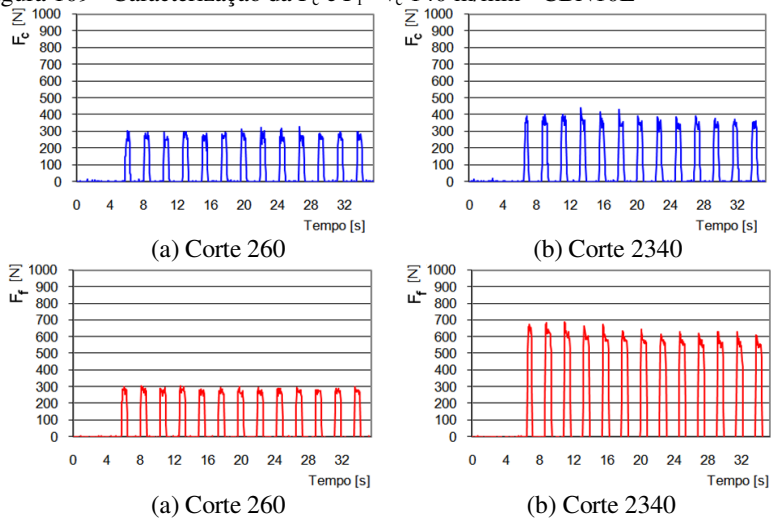


Figura 110 - Caracterização da F_c e F_f - v_c 180 m/min - CBN10E

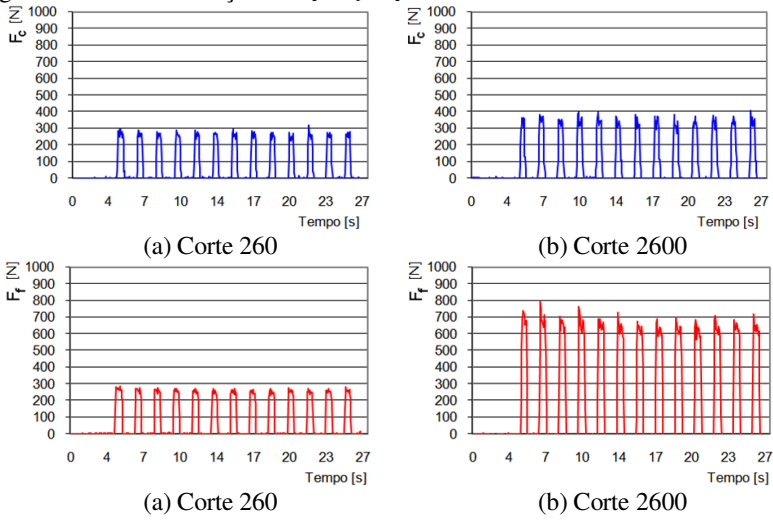
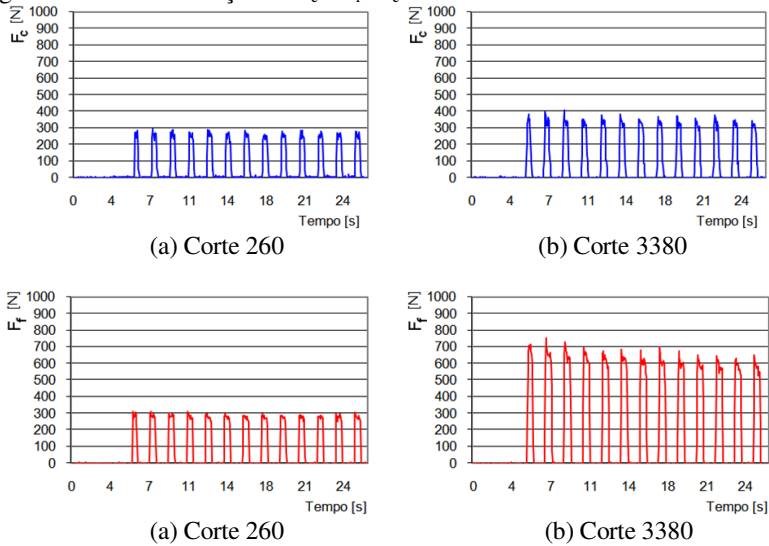


Figura 111 - Caracterização da F_c e F_f - v_c 220 m/min - CBN10E



APÊNDICE 3 - GRÁFICOS DAS COMPONENTES F_c E F_f INSERTOS CB200S

Figura 112 - Caracterização da F_c e F_f - v_c 100 m/min- CBN200S

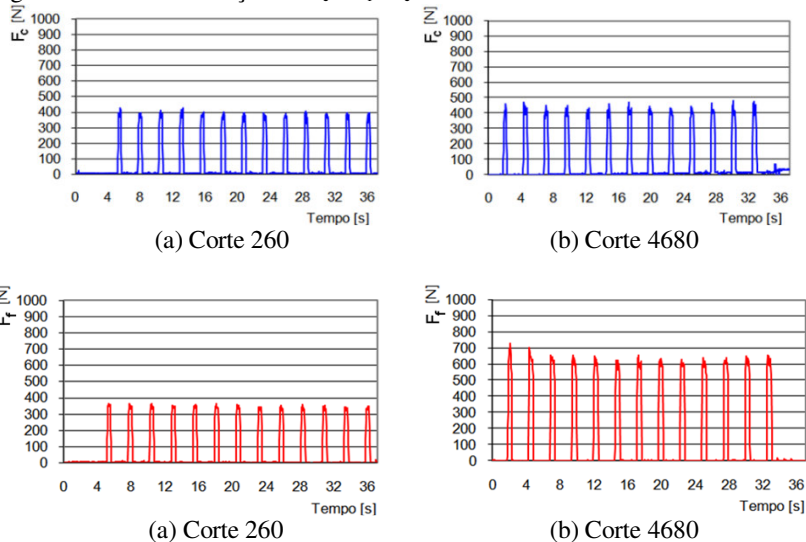


Figura 113 - Caracterização da F_c e F_f - v_c 140 m/min - CBN200S

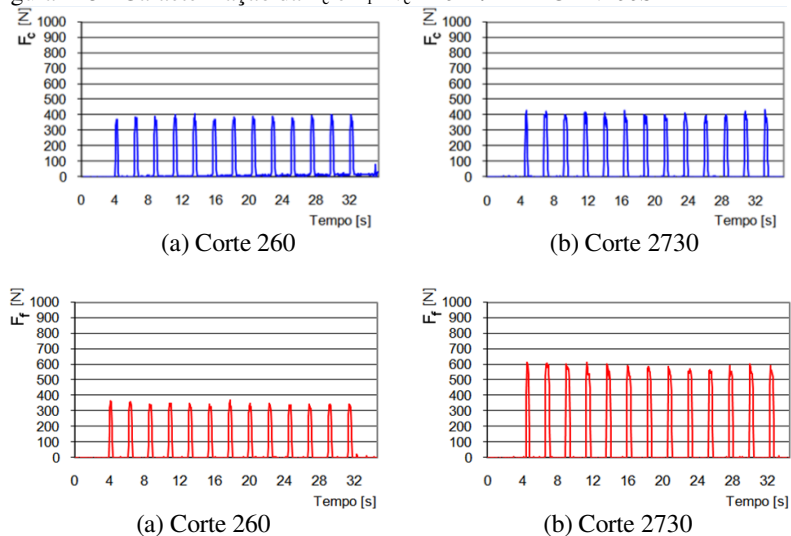
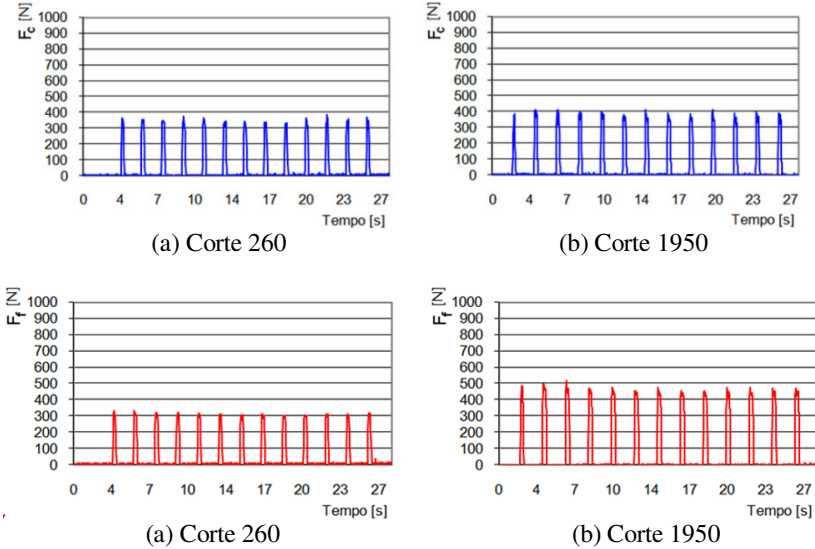
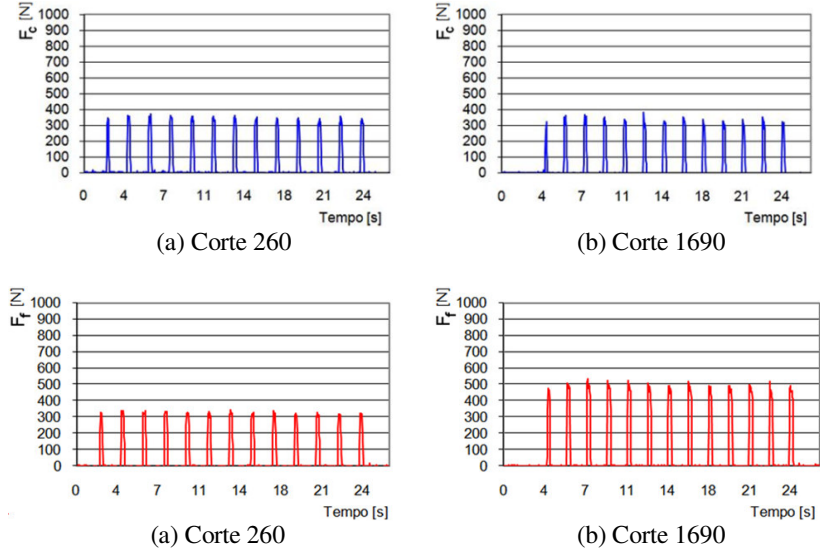


Figura 114 - Caracterização da F_c e F_f - v_c 180 m/min- CBN200SFigura 115 - Caracterização da F_c e F_f - v_c 220 m/min - CBN200S

APÊNDICE 4 - GRÁFICOS DAS COMPONENTES F_c E F_f INSERTOS CB200E

Figura 116 - Caracterização da F_c e F_f - v_c 100 m/min - CBN200E

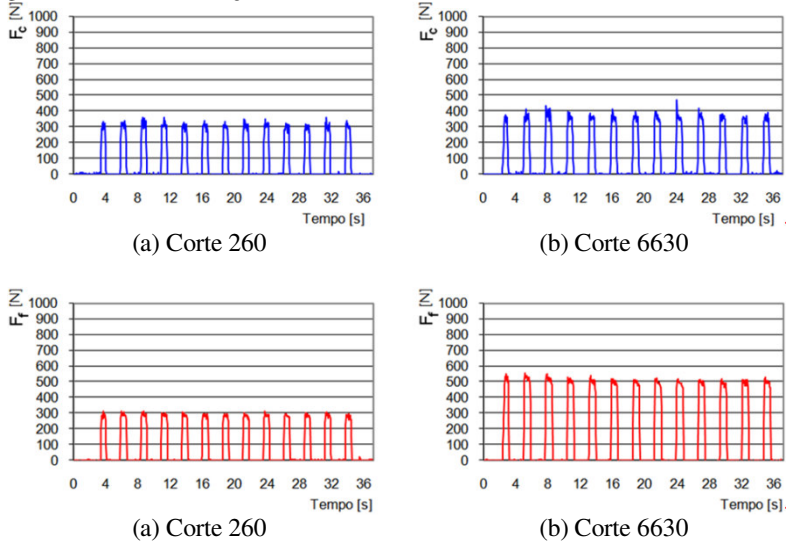


Figura 117 - Caracterização da F_c e F_f - v_c 140 m/min - CBN200E

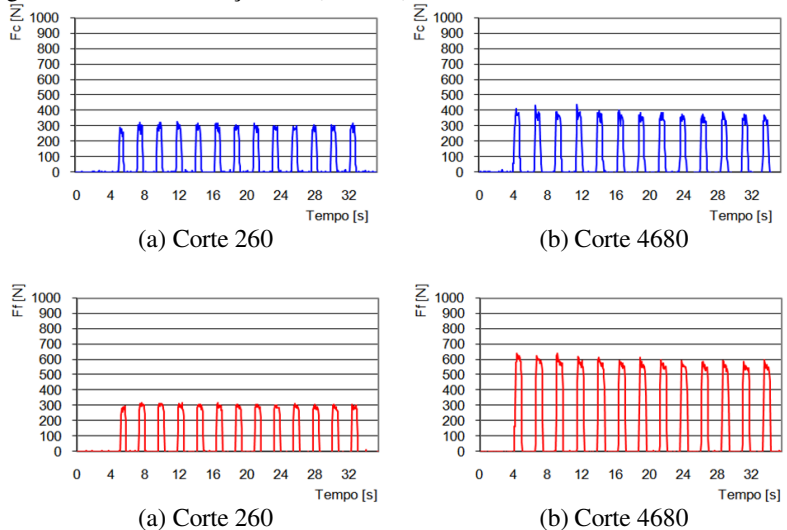
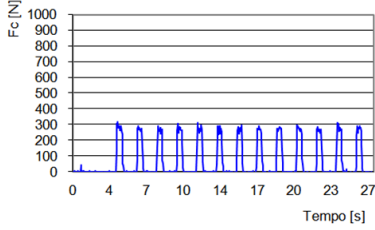
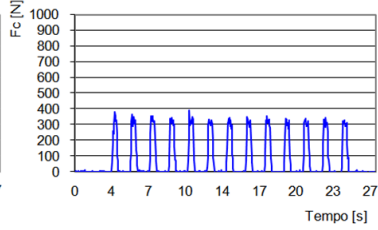
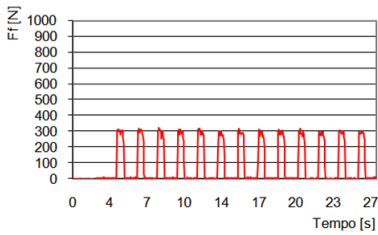


Figura 118 - Caracterização da F_c e F_f - v_c 180 m/min - CBN200E

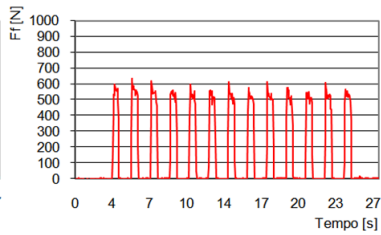
(a) Corte 260



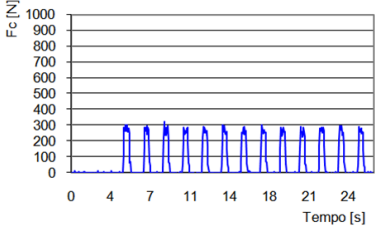
(b) Corte 3380



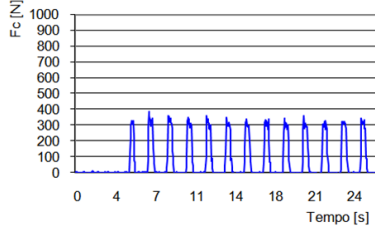
(a) Corte 260



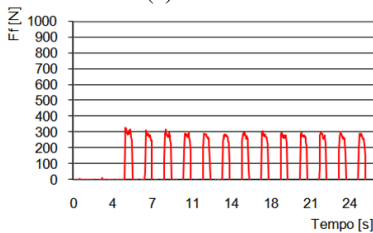
(b) Corte 3380

Figura 119 - Caracterização da F_c e F_f - v_c 220 m/min - CBN200E

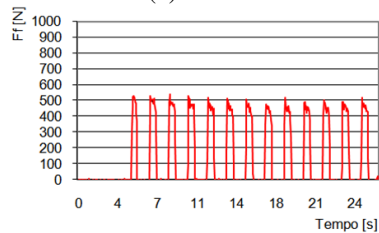
(a) Corte 260



(b) Corte 2600



(a) Corte 260



(b) Corte 2600