

Josué Mota Luiz

**ESTUDO DA VIABILIDADE DE UTILIZAÇÃO DE BROCAS DE
CANAL RETO COM PONTA DE PCBN PARA FURAÇÃO DE
FERRO FUNDIDO CINZENTO FC-250**

Dissertação submetida ao
Programa de Pós-graduação em
Engenharia Mecânica da
Universidade Federal de Santa
Catarina para a obtenção do Grau
de Mestre em Engenharia
Mecânica.

Orientador: Prof. Dr. Lourival
Boehs.

Coorientador: Prof. Dr. Fabiano
Mocellin

Florianópolis
2016

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

Luiz, Josué

Estudo da viabilidade de utilização de brocas de canal reto com ponta de PCBN para furação de ferro fundido cinzento FC-250 / Josué Luiz ; orientador, Lourival Boehs ; coorientador, Fabiano Mocellin. - Florianópolis, SC, 2016.

191 p.

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

Inclui referências

1. Engenharia Mecânica. 2. Processos de fabricação . 3. Furação em ferro fundido cinzento. 4. Brocas com ponta de PCBN . I. Boehs, Lourival . II. Mocellin, Fabiano . III. Universidade Federal de Santa Catarina. Programa de Pós Graduação em Engenharia Mecânica. IV. Título.

Josué Mota Luiz

**ESTUDO DA VIABILIDADE DE UTILIZAÇÃO DE BROCAS DE
CANAL RETO COM PONTA DE PCBN PARA FURAÇÃO DE
FERRO FUNDIDO CINZENTO FC-250**

Esta Dissertação foi julgada adequada para obtenção do Título de “Mestre em Engenharia Mecânica”, e aprovada em sua forma final pelo Programa Pós-graduação em Engenharia Mecânica.

Florianópolis, 8 de setembro de 2016.

Prof. Armando Albertazzi Gonçalves Jr., Dr. Eng.
Coordenador do Curso

Prof. Lorival Boehs, Dr. Eng.
Orientador

Prof. Fabiano Mocellin, Dr. Eng.
Coorientador

Banca Examinadora:

Prof. Rolf Bertrand Schroeter Dr. Eng.
Universidade Federal de Santa Catarina

Prof. Wilson Luiz Guesser Dr. Eng.
Universidade do Estado de Santa Catarina

Prof. Milton Pereira Dr. Eng.
Universidade Federal de Santa Catarina

Prof. Fábio Antônio Xavier Dr. Eng.
Universidade Federal de Santa Catarina

Este trabalho é dedicado à minha
família e a Deus, companhias que
nunca faltam.

AGRADECIMENTOS

A Deus, pela oportunidade da existência, pelas capacidades e consolo com que Ele nos presenteia diariamente.

À família, que me ofereceu os valores básicos para a grande trajetória da vida e refúgio sempre presente.

A empresa parceira no trabalho que, pela cultura de investimento em pesquisa e inovação, cedeu os materiais e equipamentos.

Ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, pela qualidade de ensino e desenvolvimento científico, que são traduzidos em sua elevada conceituação internacional.

Ao Sr. M. Eng. Cássio Luiz Francisco de Andrade, profissional de excelência, exemplo de trajetória e primeiro incentivador deste mestrado.

Aos diversos colegas de trabalho, Jaimison da Cunha, Giancarlos Willemann, Diogo Wiese, Moacir Jose Bento, Leandro Batista, Richardd Dutra e tantos outros, pela inestimável colaboração técnica e de incentivo.

Aos orientadores, Prof. Dr. Fabiano Mocellin e Prof. Dr. Lourival Boehs pelo tempo, interesse e conhecimentos, sem os quais a realização do trabalho seria impossível.

A cada um segundo suas obras.
Romanos 2:6

RESUMO

A indústria busca constantemente ganhos em produtividade e redução de custo. Na indústria de usinagem, a produtividade e custo estão ligados a diversos fatores, como mão de obra, equipamentos e ferramentas de corte. No que tange a ferramentas de corte, são mais interessantes as que permitam maiores velocidades de corte, maiores vidas, ou que substituam duas ou mais ferramentas. Nesse contexto, ferramentas com materiais de elevada dureza e resistência ao desgaste vêm ganhando espaço em diversas operações de usinagem, atendendo às vantagens listadas. Um exemplo de aplicação de materiais de elevada dureza é a utilização de PCBN (nitreto de boro cúbico policristalino) em fresamento e torneamento. Todavia, a aplicação de PCBN em furação ainda é pouco explorada. Visando avaliar a viabilidade técnica e econômica da utilização de ferramentas de PCBN para furação, foram realizados testes práticos com brocas de ponta desse material. O material usinado foi o ferro fundido cinzento devido a sua ampla utilização. Utilizaram-se dois conceitos de inserto de PCBN, o *full face* e integral, que foram brasados na ponta de uma broca de metal-duro com canal reto, fazendo com que os gumes sejam de PCBN. Para comparação, foi realizado teste similar com broca de metal-duro, por ser o material mais empregado para furação de ferro fundido cinzento em produção seriada. Os resultados para ambos os testes são apresentados em termos de vida de ferramenta e qualidade do furo. As comparações entre os diferentes materiais de broca utilizados nesse trabalho indicam que as brocas de inserto de PCBN integral ainda apresentam restrições técnicas e econômicas. Indicam também que as brocas com inserto de PCBN *full face*, em condições específicas de corte, são viáveis tecnicamente, pois geram furos com elevada qualidade e apresentam vidas de ferramenta intermediárias. A aplicação dos inserts *full face* se mostra viável economicamente, caso seja possível, de acordo com a exigência de qualidade do furo, substituir a operação de furação com broca de metal-duro e operações seguintes de acabamento.

Palavras-chave: PCBN. Furação. Ferro Fundido Cinzento.

ABSTRACT

The industry constantly seeks gains in productivity and cost reduction. In the machining industry, productivity and cost are related to several factors, such as labor, equipment and cutting tools. Regarding to cutting tools, the most interesting ones are those which allow higher cutting speeds, larger tool life, or to replace two or more tools. In this context, tools with high hardness and wear resistance have been gaining ground in several machining operations, taking into account the advantages listed. An example of application of high hardness is the use of PCBN (polycrystalline cubic boron nitride) in milling and turning. However, the application of PCBN in drilling still is poorly explored. Aiming to evaluate the technical and economic viability of using PCBN tools for drilling, practical tests were carried out with drills tipped with this material. The machined material was gray cast iron because of its wide use. In the tests was used two concepts insert PCBN, the full face and solid, which were brazed on the top of a carbide straight flute drill, becoming the cutting edge formed of PCBN. For comparison, we performed a similar test with carbide drill, due to be the most used material for drilling gray cast iron in mass production. The results for both tests are presented in terms of tool life and hole quality. The comparisons between different materials drill used in this work indicate that solid PCBN insert drills still have technical and economic constraints. Also indicates that PCBN full face insert drills, in specific cutting conditions are technically feasible, because they generate holes with high quality and intermediate tool lives. The application of full face inserts has proved economically viable if, according to the demand for hole quality, replace the drilling operation with carbide drill and subsequent finishing operations.

Keywords: PCBN. Gray cast iron. Drilling.

LISTA DE FIGURAS

Figura 3. 1 - Elementos constitutivos das brocas helicoidais.	32
Figura 3. 2- Ângulos das brocas helicoidais.....	33
Figura 3. 3 - Elementos de brocas de canal reto.....	34
Figura 3. 4 - Broca de canal reto com insertos de PCBN brasados na ponta.....	35
Figura 3. 5– Mecanismos de desgaste em função da temperatura.....	37
Figura 3. 6 – Desgastes em brocas helicoidais.....	39
Figura 3. 7 – Medição de desgaste em brocas.....	40
Figura 3. 8 – Propriedades mecânicas de diferentes materiais de ferramenta de corte.....	42
Figura 3. 9 – Comparativo de classes de PCBN para diferentes fabricantes.....	44
Figura 3. 10 – Exemplos de insertos intercambiáveis de PCBN disponíveis comercialmente.....	45
Figura 3. 11– Exemplos de recomendação de parâmetros de corte para PCBN.....	49
Figura 3. 12 - Broca com inserto de PCBN full face brasado na ponta, conceito utilizado por Brandt (2014). O detalhe apresenta o gume transversal, com a parte de PCBN (escura) e metal-duro (clara)	60
Figura 3. 13 - Microestrutura Típica de Ferro Fundido Cinzento. Grafita em forma de veios dispersas em matriz perlítica.....	62
Figura 3. 14 - Bloco de motor: exemplo de aplicação de ferro fundido cinzento.....	63
Figura 3. 15 - Inclusões de sulfeto de manganês na estrutura do ferro fundido cinzento FC-250 com 0,18% de enxofre.....	66
Figura 3. 16 - Camada de sulfeto de manganês formada sobre ferramenta de PCBN. Velocidade de corte: 800 m/min. Inserto com 50% de grãos de CBN.....	67
Figura 4. 1 – Centro de usinagem Mazak, modelo 530C (esquerda) e mesa com placa magnética Shunk (direita).....	69
Figura 4. 2 - a) Microscópio óptico e b) sistema de aquisição de imagens metalográficas. Aumento máximo do conjunto: 1000x.....	71
Figura 4. 3 - Broca de canal reto e inserto de PCBN integral.....	73
Figura 4. 4 - Detalhes do corpo de prova usinado nos testes de furação.....	76
Figura 4. 5 - Faceamento da superfície bruta de fundição.....	81
Figura 4. 6 - Broca montada no cone hidráulico.....	81
Figura 4. 7 - Equipamento de <i>preset</i> (esquerda) e conferência de batimento na máquina, com cone montado no eixo-árvore (direita)....	82

Figura 4. 8 - Afiação do gume transversal: vista de topo (esquerda) e vista lateral (direita)	84
Figura 4. 9 - Exemplo de Experimento Fatorial Fracionado com 4 fatores.....	85
Figura 4. 10 - Broca com diâmetro menor em metal-duro e diâmetro maior em PCBN – “broca dupla”.....	88
Figura 5. 1- Micrografia de diferentes pontos amostra para classificação da grafita. Ampliação: 100x.....	91
Figura 5. 2 - Inclusões de sulfeto de manganês e grafitas. Ampliação: 500x	92
Figura 5. 3 - Inclusões de sulfeto de manganês. Ampliação: 1000x.....	92
Figura 5. 4 - Matriz da amostra: 100% perlítica. Ampliação: 500x.....	93
Figura 5. 5 - Evolução do desgaste de flanco. Teste A.	94
Figura 5. 6 – Desgaste e perda de material no gume transversal	96
Figura 5. 7 – Lascamento da região do gume transversal (esquerda) e alojamento sem o inserto devido à quebra (direita), com 12,6 m de furação.	96
Figura 5. 8 - Evolução do desgaste de flanco. Teste B.	97
Figura 5. 9 – a) e b) Interface entre os dois insertos brasados na região da ponta da ferramenta com formação de entalhe. c) gume principal com pouco desgaste de flanco.....	99
Figura 5. 10 – a) Propagação da trinca originária da quebra do inserto para o corpo da broca, que ocasionou quebra da broca com 29,6m de furação e b) alojamento do inserto após a quebra da broca.	100
Figura 5. 11 - Formação de entalhe na junção entre os insertos (a) e lascamento no gume principal (b).	101
Figura 5. 12 - Quebra com 2,9 m de furação.	102
Figura 5. 13 - Quebra com 0,805 m de furação.	103
Figura 5. 14 - Desgaste de flanco. Teste E.....	104
Figura 5. 15 - Desgaste no gume transversal de PCBN	105
Figura 5. 16 - Desgaste em forma de entalhe na junção entre os dois insertos.....	106
Figura 5. 17 - Quebra com 18,67 m de comprimento furação. Teste E. a) ponto onde a broca partiu na haste. b) característica da quebra do corpo da broca.....	106
Figura 5. 18 – Partes da broca quebrada na Prova 2 após 11 mm de furação.	108
Figura 5. 19 – Análise do fundo do furo gerado. Em azul: início do corte, diâmetro próximo ao diâmetro externo. Em vermelho: início do corte, próximo ao centro.	108

Figura 5. 20 - Seccionamento do furo para análise. No detalhe: região plana no fundo do furo.	109
Figura 5. 21 - Trinca no corpo da broca, que inicia na região do alojamento do inserto.	110
Figura 5. 22 - Broca quebrada com 28 mm de furação, ainda presa no cone.	110
Figura 5. 23 - Preparação da amostra para análise. Em sentido horário: marcação do corpo de prova, corte e corpo de prova preparado para análise.....	111
Figura 5. 24 - Corte da amostra para análise de quebra da broca.....	111
Figura 5. 25 – Fundo do furo: superfície característica de usinagem com vibração.	112
Figura 5. 26 – Análise da broca retirada do furo após quebra.....	113
Figura 5. 27 - Evolução do desgaste de flanco. Prova 1.....	114
Figura 5. 28 - Primeira medição da broca da Prova 1. a) e b) desgaste do gume principal, com desgaste maior em direção ao centro. c) gume transversal, com acentuado desgaste. d) parte mais externa do gume principal sem desgaste mensurável.	116
Figura 5. 29 - Gume transversal com elevado desgaste. Broca de PCBN utilizado na Prova 1. Última medição antes da quebra. 4,9 m de furação.	117
Figura 5. 30 - Broca de PCBN integral quebrada. Prova 1	118
Figura 5. 31 – Lascamento da ponta da broca. Prova 4.....	118
Figura 5. 32 - Trinca a partir da ponta quebrada e se propaga para o restante inserto de PCBN.	119
Figura 5. 33 – Evolução do desgaste de flanco. Teste com metal-duro.	120
Figura 5. 34 - Desgaste de guia. Teste com metal-duro. 58,8 m de furação.....	121
Figura 5. 35 - Desgaste da broca - 36 furos. a) e b) gume transversal, c) e d) gumes principais de PCBN. $v_c = 250$ m/min, $f = 0,1$ mm.	122
Figura 5. 36 - Desgaste da broca - 36 furos. a) gume principal de metal-duro. b) gume principal de PCBN. c) gume transversal. $v_c = 250$ m/min, $f = 0,1$ mm.	123
Figura 5. 37 - Gume transversal de metal-duro – Perda de características geométricas.	124
Figura 5. 38 - Desgaste do inserto de PCBN – aparecimento de microtrincas.....	124
Figura 5. 39 - Broca de inserto de PCBN integral quebrada - teste sem refrigeração.	125

Figura 5. 40 – Dispersão dos valores de diâmetro dos furos usinados	
Figura 5. 41 - Dispersão dos valores de erro de posição dos furos usinados	127
Figura 5. 42 - Dispersão dos valores de perpendicularidade dos furos usinados	
Figura 5. 43 - Dispersão dos valores de cilindricidade dos furos usinados.....	127
Figura 5. 44 - Valores médios de rugosidade R_a	132
Figura 5. 45 - Valores médios de rugosidade R_z	132

LISTA DE TABELAS

Tabela 3. 1 – Resumo da pesquisa de aplicação de PCBN para diferentes materiais – parte 1	52
Tabela 3. 2 – Resumo da pesquisa de aplicação de PCBN para diferentes materiais – parte 2	53
Tabela 3. 3 – Resumo da pesquisa de aplicação de PCBN para diferentes materiais – parte 3	54
Tabela 3. 4 – Resumo da pesquisa de aplicação de PCBN para diferentes materiais – parte 4	55
Tabela 3. 5 – Resumo da pesquisa de aplicação de PCBN para diferentes materiais – parte 5	56
Tabela 4. 1 - Classes de PCBN dos insertos <i>full face</i>	74
Tabela 4. 2 - Classes de PCBN dos insertos integrais.....	75
Tabela 4. 3- Dados de corte dos testes de usinagem com insertos de PCBN <i>full face</i>	83
Tabela 4. 4 - Ângulos da broca de insertos de PCBN <i>full face</i> nova.....	83
Tabela 4. 5 - Variáveis utilizadas no pré-teste	85
Tabela 4. 6 – Ângulos de afiação das brocas novas	86
Tabela 4. 7 - <i>DOE</i> - Planejamento de experimentos	86
Tabela 5. 1 - Propriedades mecânicas do material dos corpos de prova	89
Tabela 5. 2 – Dureza dos corpos de prova selecionados durante os testes para controle de qualidade.....	90
Tabela 5. 3 - Composição química da amostra, em percentual de massa. Desvio padrão calculado baseado em 3 amostras.....	90
Tabela 5. 4 – Acompanhamento da broca. Teste A.....	95
Tabela 5. 5- Acompanhamento da broca. Teste B.....	98
Tabela 5. 6 - Acompanhamento da broca. Teste C.....	100
Tabela 5. 7 - Acompanhamento da broca. Teste D	102
Tabela 5. 8 – Acompanhamento da broca. Teste E.	104
Tabela 5. 9 – Acompanhamento da broca. Prova 1	115
Tabela 5. 10 - Variação percentual do campo de tolerância dos testes em relação ao teste com metal-duro, baseado na amplitude.	129
Tabela 5. 11 - Variação percentual do campo de tolerância estimados dos testes em relação ao teste com metal-duro, baseado no estudo estatístico.....	130
Tabela 5. 12 - Levantamento de custos por operação, baseados em vida de 100 metros.	134

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
AIISI	<i>American Iron and Steel Institute</i>
CBN	<i>Cubic boron nitride</i> (nitreto de boro cúbico)
DIN	<i>Deutsches Institut für Normung</i>
DOE	<i>Design of Experiments</i> (planejamento de experimento)
FC	Ferro Fundido Cinzento (ABNT)
ISO	<i>International Standardization Organization</i>
LIE	Limite inferior de especificação
LSE	Limite superior de especificação
MD	Metal-duro
MEV	Microscópio Eletrônico de Varredura
MnS	Sulfeto de manganês
PCBN	<i>polycrystalline cubic boron nitride</i> (nitreto de boro cúbico policristalino)

LISTA DE SÍMBOLOS

Letras Maiúsculas

C _p	[-]	Índice de capacidade do processo – controle estatístico de processo
HB	[MPa]	Dureza Brinell
HRC	[HRC]	Dureza Rockwell
KM	[mm]	Afastamento médio da cratera
KT	[mm]	Profundidade da cratera
l _m	[mm]	Comprimento de medição (rugosidade)
l _t	[mm]	Percurso total de apalpamento (rugosidade)
R _a	[μm]	Rugosidade de média aritmética
R _z	[μm]	Rugosidade de profundidade média
SV _α	[mm]	Deslocamento do gume em relação ao flanco
SV _γ	[mm]	Deslocamento do gume em relação à face
T	[-]	Campo de tolerância
V _B	[mm]	Desgaste de flanco
WC	[-]	Carboneto de tungstênio

Letras minúsculas

a _p	[mm]	Profundidade de corte
f	[mm]	Avanço por volta
r _B	[mm]	Raio de gume da ferramenta
v _c	[m/min]	Velocidade de corte

Letras gregas

γ	[graus]	Ângulo de saída
λ _c	[mm]	<i>Cutoff</i>
λ _{RT}	[W/mK]	Condutividade térmica
σ	[-]	Desvio padrão

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	27
2 OBJETIVOS, JUSTIFICATIVAS E CONTRIBUIÇÕES	29
2.1 OBJETIVOS	29
2.1.1 Objetivo Geral	29
2.1.2 Objetivos Específicos.....	29
2.2 JUSTIFICATIVAS E CONTRIBUIÇÕES	29
3 REFENCIAL DE PESQUISA.....	31
3.1 PROCESSO DE FURAÇÃO	31
3.1.1 Brocas	31
3.1.1.1 Elementos constitutivos.....	32
3.1.1.2 Geometria das brocas	32
3.1.1.3 Materiais utilizados na fabricação de brocas.....	33
3.1.1.4 Broca de Canal Reto.....	34
3.2 VIDA E DESGASTE DAS FERRAMENTAS DE CORTE.....	36
3.2.1 Mecanismos de desgaste e avarias em ferramentas.....	36
3.2.2 Danos, medição de desgaste e vida das brocas.....	38
3.3 NITRETO DE BORO CÚBICO POLICRISTALINO (PCBN).....	40
3.3.1 Processo de fabricação	41
3.3.2 Características do CBN.....	41
3.3.3 Classificação e propriedades do PCBN	42
3.3.4 Aplicação do PCBN como ferramenta de corte.....	44
3.3.4.1 Aplicação industrial das ferramentas de PCBN	44
3.3.4.2 Escolha dos parâmetros de corte para usinagem com PCBN....	48
3.3.5 Resultados de pesquisa sobre usinagem com ferramentas de PCBN.....	49
3.3.6 Considerações sobre a aplicação de PBCN em furação	58
3.4 FERROS FUNDIDOS.....	61
3.4.1 Ferros Fundidos Cinzentos.....	61
3.4.2 Usinabilidade dos Ferros Fundidos Cinzentos.....	63
4 EQUIPAMENTOS, MATERIAIS E MÉTODOS.....	69
4.1 EQUIPAMENTOS.....	69
4.2 MATERIAIS	71
4.2.1 Corpos de Prova	71
4.2.2 Meio Lubrificante.....	72
4.2.3 Brocas de PCBN utilizadas na pesquisa	73
4.3 MÉTODOS UTILIZADOS.....	75
4.3.1 Estratégias de aquisição de dados.....	77
4.3.1.1 Avaliação de danos às brocas.....	77
4.3.1.2 Avaliação geométrica dos furos	77

4.3.1.3	Caracterização dos corpos de prova.....	79
4.3.2	Experimentos de usinagem.....	80
4.3.2.1	Testes de furação com PCBN <i>full face</i>	82
4.3.2.2	Testes de furação com PCBN integral	84
4.3.2.3	Teste de furação com broca de metal-duro	86
4.3.2.4	Testes complementares de furação.....	87
5	RESULTADOS E DISCUSSÕES	89
5.1	CARACTERIZAÇÃO DOS CORPOS DE PROVA	89
5.2	TESTES DE FURAÇÃO COM PCBN <i>FULL FACE</i>	93
5.3	TESTES DE FURAÇÃO COM PCBN INTEGRAL.....	107
5.3.1	Pré-testes: primeiro grupo	107
5.3.2	Pré-testes: segundo grupo	113
5.4	TESTE DE FURAÇÃO COM BROCA DE METAL-DURO	120
5.5	TESTES COMPLEMENTARES DE FURAÇÃO	121
5.6	AVALIAÇÃO DA QUALIDADE DOS FUROS GERADOS	125
5.6.1	Medição dos diâmetros, erros de posição, perpendicularidade, cilindricidade dos furos	126
5.6.2	Rugosidade.....	131
5.7	ANÁLISE ECONÔMICA	133
6	CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	137
6.1	CONCLUSÕES	137
6.2	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	137
	REFERÊNCIAS.....	143
	APÊNDICE A – Composição química do material dos corpos de prova	149
	APÊNDICE B – Acompanhamento da broca nova.....	151
	APÊNDICE C - Composição química PCBN por MEV	155
	APÊNDICE D – Rugosidades medidas nos furos.....	157
	APÊNDICE E – Controle da qualidade do fluido de corte	159
	APÊNDICE F – Medições de diâmetro, posição, perpendicularidade e cilindricidade	161
	ANEXO A – Propriedades mecânicas de diferentes materiais de ferramentas de corte	163
	ANEXO B – Análise do centro de usinagem.....	165
	ANEXO C– Afição da broca de PCBN full face.....	167

1 INTRODUÇÃO

Na indústria de transformação, grande parte das peças que necessitam de formas geométricas mais complexas e/ou maior precisão dimensional encontram na usinagem um meio economicamente viável de fabricação. Algumas vantagens, tais como facilidade de aplicação em grande escala e relativa flexibilidade, tornam a usinagem um dos processos de fabricação de maior difusão e importância.

Dentre os processos de usinagem, a furação, processo a ser estudado neste trabalho, possui grande relevância. Segundo Andrade (2005), a ela corresponde a 28% do tempo efetivo de corte em usinagem de um bloco de motor. A furação, portanto, possui impacto significativo na composição dos custos de usinagem, figurando como elemento fundamental para a competitividade na usinagem de produtos para a indústria (BARBOSA; MIRANDA, 2005).

O ferro fundido cinzento, devido às suas propriedades, é um material amplamente empregado na produção de peças automotivas: blocos e cabeçotes de motores de combustão interna, discos de freio, virabrequins, entre outros. Esse tipo de material também é utilizado em larga escala pela indústria de máquinas e equipamentos, ferroviária, naval e outras. As peças obtidas na fundição com esse material geralmente não possuem a precisão dimensional necessária para sua aplicação. Por isso, raramente prescindem do processo de usinagem para atingir sua geometria final, razão essa pela qual o estudo da usinagem desse material é tão importante. Será esse o material utilizado no presente trabalho.

A usinagem utiliza diferentes materiais para fabricação de ferramentas de corte. Esses materiais foram aprimorados ao longo do tempo, ganhando em dureza e tenacidade, duas propriedades fundamentais para as ferramentas de corte. Houve também desenvolvimento de novos materiais com propriedades superiores que gradativamente substituem os demais, como o PCBN (*polycrystalline cubic boron nitride*). Em relação à dureza, o PCBN é muito próximo do diamante, e as estabilidades térmica e química são superiores do primeiro em relação ao segundo. Por causa dessas vantagens, esse material vem sendo amplamente usado na fabricação de ferramentas de corte (ROSINSKI; MICHALSKI, 2012). O PCBN é bastante estudado e utilizado como ferramenta de corte em torneamento, fresamento e

mandrilamento, sendo pouco conhecida a aplicação desse material em furação.

Procurando contribuir para o avanço dos estudos de novas ferramentas de corte para furação, o presente trabalho visa avaliar a viabilidade da utilização de brocas de ponta de PCBN na furação de ferro fundido cinzento. A furação foi realizada em corpo de prova de ferro fundido cinzento FC-250, material bastante empregado em blocos e cabeçotes de motores. Para os testes principais, foram utilizadas brocas de canal reto com insertos de PCBN brasados na ponta, fazendo com que os gumes sejam desse material. Testes similares foram realizados com brocas de metal-duro, material de ferramenta mais utilizado na furação ferro fundido cinzento em produção seriada e os seus resultados serviram como referência para avaliar a furação com os conceitos de brocas propostos. Essa avaliação se dará em termos de vida de ferramenta e qualidade do furo. Brandt (2014) também estudou conceitos de broca com PCBN brasado e os resultados de sua pesquisa serviram de base para o delineamento dos testes no presente trabalho.

2 OBJETIVOS, JUSTIFICATIVAS E CONTRIBUIÇÕES

2.1 OBJETIVOS

2.1.1 Objetivo Geral

Este trabalho tem por objetivo estudar a viabilidade técnica e econômica da aplicação de brocas de canal reto com ponta de PCBN (nitreto de boro cúbico policristalino) na furação de ferro fundido cinzento FC-250.

2.1.2 Objetivos Específicos

- Pesquisar e definir a geometrias das brocas e classes de PCBN que permitam a furação em ferro fundido cinzento;
- Avaliar a repetibilidade dos resultados obtidos por Brandt (2014) com brocas com pontas de insertos de PCBN *full face* brasados;
- Determinar o desempenho das brocas com inserto PCBN *full face* em parâmetros de corte diferentes dos testados por Brandt (2014);
- Analisar desempenho de brocas com insertos de PCBN integral e brocas com duplo corte;
- Investigar a qualidade dos furos gerados, baseada na avaliação geométrica;
- Determinar parâmetros de corte adequados às brocas com ponta de PCBN brasados;
- Concluir sobre a viabilidade técnica e econômica da substituição de brocas de metal-duro por brocas com pontas de PCBN brasados.

2.2 JUSTIFICATIVAS E CONTRIBUIÇÕES

Nas últimas décadas, a produção em larga escala tem sofrido adequações para atender ao mercado consumidor cada vez mais exigente. Uma das características mais notáveis da nova forma de consumir diz respeito à preferência por produtos customizados, o que

torna os lotes de produção menores e aumenta a necessidade de flexibilidade dos meios de produção.

Em estudo realizado por Contreras, Carrillo e Alonso (2012) sobre a cadeia de fornecimento da indústria automobilística mexicana, os mesmos constataram que seu sucesso nos últimos anos se deve a três fatores: baixo custo, qualidade e flexibilidade.

A indústria de usinagem também teve que se adequar às novas necessidades de flexibilidade que o mercado exige, necessidades essas que fazem com que os processos de usinagem ganhem em complexidade. Assim, outras atividades dentro desse tipo de indústria ganham maior peso. Uma das atividades de grande importância e que se torna mais complexa nesse novo cenário nas empresas de usinagem é o de gerenciamento do inventário de ferramentas de corte. Devido aos altos valores das ferramentas, essa atividade apresenta grande influência sobre o custo da peça e na disponibilidade do capital de giro para empresa (PLUTE *apud* TURINO, 2002).

Sendo assim, no delineamento de custos relativos a ferramentas nos processos de usinagem, não somente o custo de aquisição da ferramenta é importante, mas todo gerenciamento de inventário. É evidente, portanto, que quanto menos ferramentas em processo e maior a vida das ferramentas, mais elas se tornam interessantes, por reduzirem atividades secundárias que não agregam valor ao produto final. Os resultados de Brandt (2014) indicam que as brocas de PCBN têm potencial para atingir vidas maiores que as ferramentas de furação atuais, de metal-duro. Os mesmos resultados sugerem que essas brocas podem eliminar ferramentas de acabamento, como alargadores, devido à melhor qualidade do furo, diminuindo assim a quantidade de ferramentas em processo.

Dessa forma, as ferramentas de PCBN podem representar diminuição de custos relativos a atividades secundárias que não agregam valor, como preparação e gerenciamento de ferramentas. O presente trabalho também visa colaborar com a lacuna de desenvolvimento de novas tecnologias de furação, pois como afirmam Barbosa e Miranda (2005), a furação é o menos estudado dos três processos de usinagem mais usuais: torneamento, fresamento e furação.

Pretende-se, portanto, que a presente pesquisa permita obter resultados que conduzam os pesquisadores envolvidos a concluir sobre possíveis ganhos reais para a indústria, além de oferecer subsídios para eventuais futuros trabalhos de pesquisa sobre utilização do PCBN para furação de ferro fundido cinzento.

3 REFERENCIAL DE PESQUISA

O tema do presente trabalho demanda conhecimento em quatro grandes áreas principais: processos de furação, desgaste e vida de ferramenta, PCBN como material de ferramenta de corte e ferros fundidos cinzentos.

Dentro de cada área serão abordados pontos específicos que são de interesse direto deste trabalho. O propósito não é esgotar cada um desses assuntos, mas sim dar embasamento teórico, recorrendo à literatura e trabalhos científicos disponíveis.

Foi dada ênfase no estudo da aplicação e resultados de pesquisas obtidos na usinagem com ferramentas de PCBN.

3.1 PROCESSO DE FURAÇÃO

A furação é um dos processos de usinagem de maior relevância. Segundo Stoeterau (2007), as brocas helicoidais respondem de 20 a 25% do total de aplicações dos processos de usinagem.

Schroeter e Weingaertner (2002) listam algumas características particulares do processo de furação:

- a. A velocidade de corte é nula no centro da broca, chegando ao seu valor máximo em sua periferia;
- b. Apresenta dificuldades no transporte dos cavacos para fora dos canais da broca;
- c. Distribuição inadequada de calor na região do corte;
- d. Quando não apresenta chanfro, a quina da broca está sujeita a desgaste excessivo;
- e. As guias da ferramenta atrim com a parede do furo durante o processo.

Furação com brocas helicoidais normalmente é o método mais eficiente e econômico de se conseguir um furo em material sólido (AMERICAN SOCIETY FOR METALS, 1995). Todavia, é interessante notar que a furação é um processo de desgaste. Quando são exigidas características geométricas ou funcionais específicas, operações subsequentes são utilizadas para dar ao furo as características desejadas (STEMMER, 1995).

3.1.1 Brocas

Existe uma grande diversidade de tipos de brocas disponíveis: brocas chatas, brocas helicoidais, brocas de canais retos, broca canhão

(para furos profundos), brocas ocas para trepanção, etc. (STEMMER,1995). As brocas ainda diferenciam-se entre si pelos aspectos geométricos específicos e materiais.

3.1.1.1 Elementos constitutivos

A norma DIN 1412 nomeia os elementos constitutivos das brocas. Na figura 3.1 estão identificados os elementos principais:

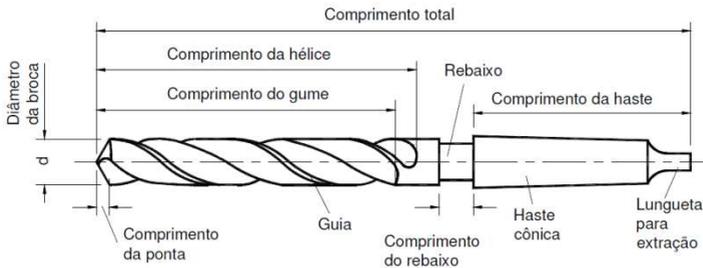


Figura 3.1 - Elementos constitutivos das brocas helicoidais.

Fonte: (SCHROETER; WEINGAERTNER, 2002)

3.1.1.2 Geometria das brocas

A geometria das brocas tem grande ligação com o desempenho do processo de furação. Sua variação tem impacto em produtividade, vida útil de ferramenta e qualidade do furo gerado. Em vista disso, será um dos fatores cuja influência será avaliada durante esta pesquisa.

Os ângulos da broca estão indicados na figura 3.2.

A geometria das brocas apresenta grande complexidade. A alteração de um ângulo pode implicar na alteração de outros. Uma mudança no ângulo de incidência ou no ângulo de ponta, por exemplo, altera o ângulo do gume transversal. Já o ângulo de hélice influencia na formação do ângulo de saída γ . O ângulo de hélice e o ângulo de saída são iguais no diâmetro mais externo da broca, porém o ângulo de saída vai se torna negativo nas proximidades do centro da broca (SCHROETER; WEINGAERTNER, 2002).

Com o objetivo de investigar a influência da geometria no desempenho das brocas de PCBN, nos testes com inserto de PCBN sólido, foram testadas duas geometrias distintas.

α = ângulo de incidência
 β = ângulo de cunha
 γ = ângulo de saída
 ε = ângulo de quina
 σ = ângulo de ponta
 ψ = ângulo do gume transversal
 r_ε = raio de quina

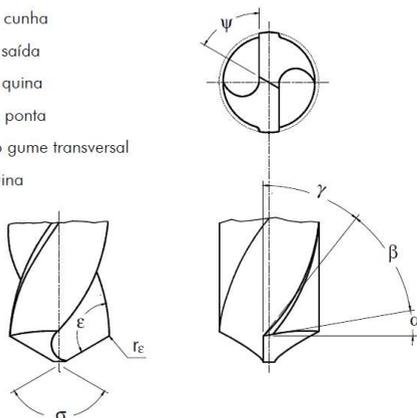


Figura 3. 2- Ângulos das brocas helicoidais.
 Fonte: (SCHROETER; WEINGAERTNER, 2002).

A seguir serão discutidos os materiais mais empregados na fabricação de brocas.

3.1.1.3 Materiais utilizados na fabricação de brocas

O material mais utilizado na fabricação de brocas ainda é o aço-rápido. São fatores que colaboram para sua larga aplicação: fácil fabricação, custo relativamente baixo, tenacidade, resistência ao desgaste e às variações cíclicas de temperatura. Brocas maciças de metal-duro e brocas com pastilhas soldadas ainda não conseguiram eliminar as aplicações de brocas de aço-rápido. Mesmo assim, na fabricação moderna, o uso de brocas maciças de metal-duro é cada vez mais frequente em relação ao aço-rápido (SCHROETER; WEINGAERTNER, 2002).

As vantagens do metal-duro são sua homogeneidade, decorrente do processo de fabricação por metalurgia do pó, a elevada dureza, resistência à compressão e resistência ao desgaste a sob altas temperaturas. O metal-duro apresenta dureza a 1000° C equivalente à do aço-rápido à temperatura ambiente. No processo de furação, o metal-duro, comparado ao aço-rápido, possibilita ganhos substanciais: velocidades de corte até três vezes maior, avanço por volta 30% superior e fabricação de furos com maior precisão geométrica. Porém, devido a

menor tenacidade em relação ao aço-rápido, o emprego de brocas maciças de metal-duro só faz sentido e é econômico em máquinas ferramentas que preencham condições mínimas de precisão, potência de acionamento, refrigeração e rigidez (SCHROETER; WEINGAERTNER, 2002).

Expressivo aumento da dureza e resistência ao desgaste do metal-duro em relação ao aço-rápido é o principal motivador da substituição do segundo pelo primeiro. Mesmo implicando em aumento de custo de ferramenta, em muitas situações o ganho em taxas de remoção de material e maior vida da ferramenta torna favorável o uso de metal-duro. Pelo mesmo motivo, pretende-se desenvolver uma opção de broca com ponta PCBN. Espera-se que sua maior dureza e resistência ao desgaste assegure valores de vida de ferramenta e velocidades superiores ao metal-duro, representando ganhos reais de produtividade e qualidade.

Na próxima seção será discutido um dos tipos de brocas existentes, a de canal reto, por ser esse o tipo de broca empregado nesta pesquisa.

3.1.1.4 Broca de Canal Reto

As brocas de canal reto podem ser consideradas um tipo especial de broca helicoidal com ângulo de hélice igual a zero. Todos os ângulos e partes constitutivas seguem a mesma nomenclatura das brocas helicoidais. A figura 3.3 apresenta um exemplo de broca de canal reto.

Segundo Stoeterau (2007), esse tipo de broca é mais resistente à torção e indicada para furação em ligas de alumínio-silício e ferros fundidos cinzentos.



Figura 3.3 - Elementos de brocas de canal reto.

Fonte: Autor

As brocas de canal reto são indicadas para usinagem de materiais que geram cavacos curtos. Essas brocas alcançam maior produtividade, decorrentes de maiores velocidades de corte suportadas por essas ferramentas. Ainda devido à sua geometria de canal, existe facilidade de fabricação de guias laterais. As guias laterais ajudam a evitar desvios durante usinagem (KENNEDY, 2006).

Devido às características enumeradas, esse tipo de broca vem ganhando espaço na furação de ferro fundido. É o conceito de broca escolhida para o presente trabalho.

As brocas utilizadas nesta pesquisa são similares às brocas de canal reto comercial disponível, como a apresentada na figura 3.3. Porém, tem como principal diferença o inserto de PCBN brasado na ponta da ferramenta, conforme figura 3.4.



Figura 3.4 - Broca de canal reto com insertos de PCBN brasados na ponta.

Fonte: Autor.

A figura 3.4 apresenta mesmo conceito desenvolvido por Brandt (2014). A geometria, parâmetros de corte e constituição da ferramenta apresentadas no trabalho do referido autor serão ponto de partida para novos experimentos, que serão realizados no presente trabalho.

Na presente seção foram apresentadas generalidades do processo de furação. Na seção 3.3, juntamente com a pesquisa sobre PCBN, serão discutidos os conceitos de broca com ponta de PCBN utilizadas neste trabalho.

A seguir será apresentado estudo sobre a vida e desgaste das ferramentas de corte, com seção exclusiva para brocas.

3.2 VIDA E DESGASTE DAS FERRAMENTAS DE CORTE

Por maior que seja a dureza e a resistência ao desgaste das ferramentas de corte, e por menor que seja a resistência mecânica da peça de trabalho, sempre ocorrerá um processo de degradação da ferramenta, que mais cedo ou mais tarde exigirá a sua substituição. O momento no qual a ferramenta perde suas características e se faz necessária a substituição é chamado de fim de vida. A vida de uma ferramenta é, portanto, o transcorrer entre a ferramenta nova e sua substituição, podendo ser medida de diferentes formas: peças produzidas, metros lineares de avanço e tempo de corte (MACHADO *et al.*, 2009).

3.2.1 Mecanismos de desgaste e avarias em ferramentas

O desgaste pode ser definido como “mudança da forma original da ferramenta durante o corte, resultante da perda gradual de material” (Norma ISO 3685, 1993). É causado pela interação da peça e ferramenta (e consequente solicitações térmicas e mecânicas) com o meio (ar, meio lubrificante), provocando perda gradual de material da ferramenta de corte. Os principais mecanismos de desgaste são: abrasão, adesão, oxidação, difusão e formação de gume postiço.

A figura 3.5 mostra a tendência de aparecimento de cada desgaste em função da temperatura de corte. Observa-se que o tipo de intensidade de cada desgaste tem forte dependência da temperatura de corte.

Alguns mecanismos de desgaste prevalecem sobre outros, devido a fatores como as condições de corte, geometria da ferramenta, material da ferramenta e peça e o uso de meio lubrificante, que interferem diretamente na temperatura e na pressão na região de corte.

Dentre os principais mecanismos de desgaste encontrados na usinagem de ferro fundido cinzento, encontra-se a abrasão, a adesão e a difusão, fato este também comum em outros materiais metálicos (SRIVASTAVA; FINN, 2003).

A abrasão ocorre quando o material é removido ou deslocado da superfície da ferramenta por partículas duras que podem estar soltas entre duas superfícies com movimento relativo, ou que pertencem a uma delas. É incentivado pela presença de partículas duras no material da peça e pela temperatura de corte, que reduz a dureza da ferramenta. Assim, quando maior a dureza a quente da ferramenta, maior sua resistência ao desgaste abrasivo (DINIZ; MARCONDES; COPPINI, 1999; MACHADO; SILVA, 2004).

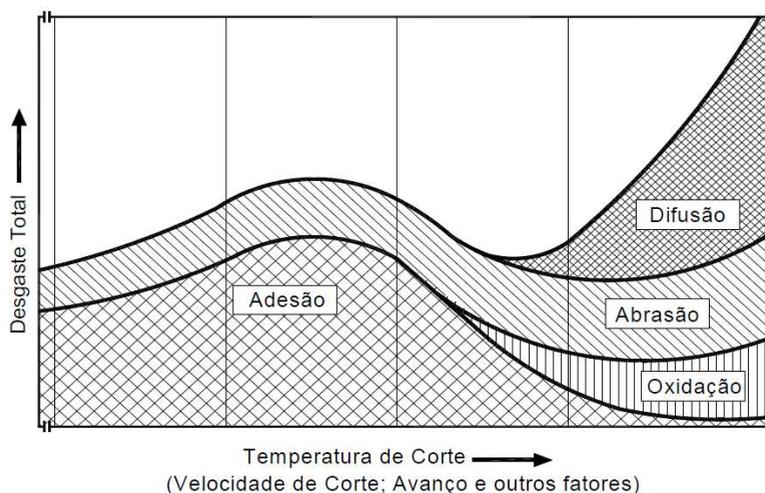


Figura 3. 5– Mecanismos de desgaste em função da temperatura.

A adesão ocorre geralmente sob moderadas cargas de contato, baixas temperaturas e baixas velocidades de corte. Ocorre devido à ruptura do microcaldeamento na face da ferramenta. Esses caldeamentos, por sua vez, são oriundos da interação das superfícies inferiores do cavaco e face da ferramenta que, por estarem relativamente livres de óxidos, aderem-se um ao outro. A face inferior do cavaco encontra-se num estado de aquecimento e deformação elevados, o que favorece seu caldeamento na face da ferramenta. A resistência da adesão tende a aumentar quanto maior for a deformação do material da peça. Muitas vezes a ocorrência da adesão pode dar origem à formação de gume postiço, que torna o processo mais suscetível à quebra da ferramenta, além de diminuição da qualidade da superfície gerada (MACHADO *et al.*, 2009; SCHROETER; WEINGAERTNER, 2002; DINIZ; MARCONDES; COPPINI, 1999).

A difusão ocorre devido à passagem de átomos entre os materiais da ferramenta e da peça. É um fenômeno ativado termicamente pelo calor gerado na região de corte. Sua presença e intensidade dependem da temperatura, da duração do contato e da afinidade físico-química entre os metais envolvidos na zona de fluxo (MACHADO *et al.*, 2009; DINIZ; MARCONDES; COPPINI, 1999).

Além de desgaste, a ferramenta pode apresentar danos diversos, como avarias e deformações plásticas.

A avaria consiste na quebra, lascamento ou trinca do gume. O lascamento ocorre quando pedaços maiores são retirados de uma só vez. A trinca, por sua vez, promove a abertura de uma fenda no corpo da ferramenta de corte. No caso da trinca não existe a perda imediata de material, mas sua presença pode comprometer a continuidade do processo de corte pela sua transformação em sulco, no caso de trincas de origem térmica, ou pela promoção de um lascamento. Já a quebra pode ser ocasionada pelo crescimento de todos os desgastes e avarias da ferramenta (MACHADO *et al.*, 2009; DINIZ; MARCONDES; COPPINI, 1999).

A deformação plástica é a mudança da geometria da ferramenta de corte pelo deslocamento de massa. Ocorre quando o material da ferramenta perde dureza devido às altas temperaturas e escoamento decorrente das tensões atuantes nas superfícies das ferramentas de corte. Sua magnitude depende das características mecânicas à alta temperatura. A cunha da ferramenta sofre maior deformação quanto menor for a diferença entre a temperatura da cunha durante a usinagem e a temperatura de têmpera ou fusão do material da ferramenta (SCHROETER; WEINGAERTNER, 2002; MACHADO *et al.*, 2009).

Na próxima seção será tratado da vida e desgaste exclusivamente para as brocas, ferramenta estudada na presente pesquisa.

3.2.2 Danos, medição de desgaste e vida das brocas

A geometria das brocas possui relativa complexidade, como visto na seção 3.3.1.

O desgaste pode se apresentar, além de na face e no flanco, no gume transversal, na quina e nas guias laterais, conforme figura 3.6.

Nas brocas, o gume secundário de corte recebe o nome de guia, nome que está relacionado com a função que essa parte da ferramenta assume durante o corte. Naturalmente, durante a usinagem, a guia está submetida ao desgaste. Seu desgaste pode aumentar o calor gerado devido a um maior atrito entre peça e ferramenta. Isso leva a dilatação térmica e a um crescimento radial da broca gerando o efeito de “*stick slip*”, ou seja, a guia adere e escorrega na parede do furo constantemente. Este fenômeno causa vibrações e trepidações no processo de corte, podendo levar à quebra catastrófica da ferramenta (SCHROETER; WEINGAERTNER, 2002; MACHADO *et al.*, 2009).

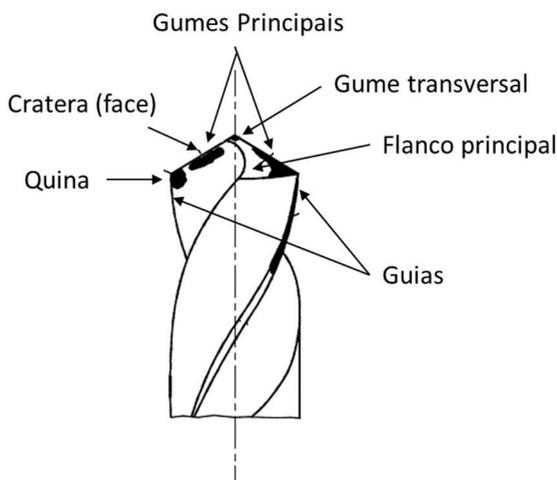


Figura 3. 6 – Desgastes em brocas helicoidais

Fonte: (SCHROETER; WEINGAERTNER, 2002; MACHADO *et al.*, 2009).

O gume principal das brocas cobre uma região que apresenta variação de distância em relação ao centro de rotação da broca. Em decorrência disso, a velocidade de corte também varia ao longo do gume principal, sendo máxima na quina. Isso faz com que a região da quina esteja mais suscetível ao desgaste, geralmente apresentando nesse ponto valor máximo. Recomenda-se a medição do desgaste de quina para a determinação do desempenho de brocas devido à facilidade na sua medição. Todavia, é importante notar que o desgaste pode variar significativamente entre as duas quinas da broca (SCHROETER; WEINGAERTNER, 2002; MACHADO *et al.*, 2009).

A região do gume transversal é crítica para a broca. Por estar situada próxima ao centro da broca, sua velocidade de corte é muito baixa. Além disso, o gume transversal possui ângulo de saída bastante negativo. Esses fatores dificultam remoção de cavaco. Também é comum a formação de gume postiço nessa região. Cerca de 30 a 65% da força de avanço das brocas está associado a ele. Portanto, é fundamental o acompanhamento do desgaste do gume transversal, pois valores elevados nessa região podem levar ao aumento de erros geométricos do furo e aumento nas forças de avanço, que podem culminar em quebra da ferramenta. (STEMMER, 1995; SCHROETER; WEINGAERTNER, 2002; MACHADO *et al.*, 2009).

Na figura 3.7 são apresentadas as grandezas de desgaste medidas nas brocas helicoidais.

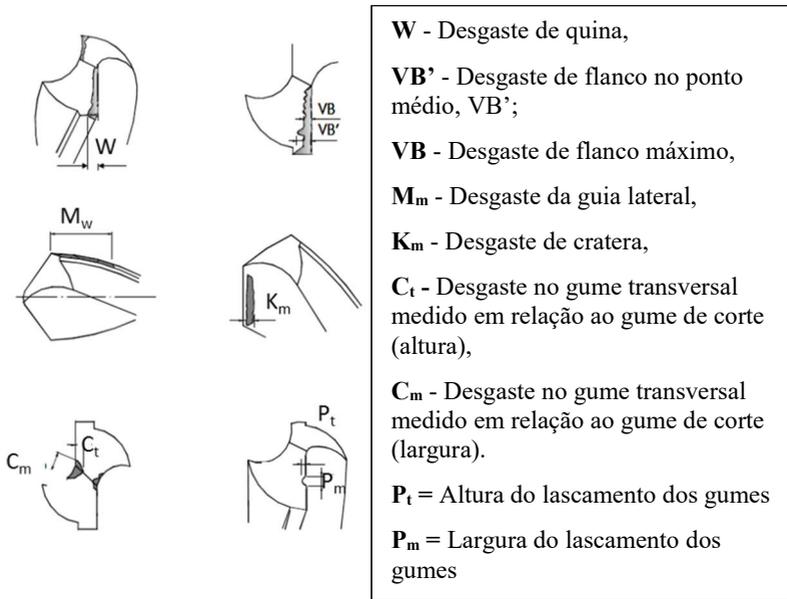


Figura 3. 7 – Medição de desgaste em brocas.

Fonte: adaptado de (SCHROETER; WEINGAERTNER, 2002).

Na seção 3.3 será estudado o nitreto de boro cúbico policristalino, material empregado nos inserts brasados na ponta das brocas.

3.3 NITRETO DE BORO CÚBICO POLICRISTALINO (PCBN)

Depois do diamante, o CBN é o material mais duro que se conhece. Trata-se de um material sintético, obtido pela reação de halogenetos de boro com amoníaco (STEMMER,1995).

Para aplicação em usinagem com ferramenta de geometria definida, grãos de CBN são agrupados por sinterização, dando origem ao PCBN.

A seguir será discutido, além do processo de fabricação, as características e vantagens desse material, que explicam porque ele vem ganhando espaço no mercado de ferramentas de usinagem.

3.3.1 Processo de fabricação

O nitreto de boro cúbico (CBN) não é encontrado na natureza. Trata-se, portanto de um material totalmente sintético. Sua obtenção ocorreu pela primeira vez no ano de 1957 (SCHROETER; WEINGAERTNER, 2002).

O CBN é fabricado na forma de pequenos grãos. Para utilização em ferramentas de geometria definida, é necessário que esses grãos passem por um processo de sinterização com ligante, resultando em blocos policristalinos, ou PCBN. A primeira patente de PCBN ocorreu nos EUA, ano de 1963 (MONTEIRO *et al.*, 2013).

O nitreto de boro cúbico policristalino (PCBN), portanto, consiste em grãos de CBN unidos com ligante cerâmica, metálicos ou à base de wurtzita, sob condições de pressões e temperaturas extremamente elevadas. A função do ligante é apenas juntar os cristais de CBN de altíssima dureza (STAHL, 2012).

Stahl (2012) descreve as etapas de fabricação do PCBN da seguinte forma: na primeira, os grãos de CBN são sintetizados a partir do pó de nitreto de boro na fase hexagonal (hBN), sendo submetido a temperaturas entre 1300 a 1500°C e pressões entre 4 a 6 GPa, dando origem a grãos finos de CBN. Na segunda etapa, os grãos de CBN são misturados em proporções exatas de catalizador ou ligantes, e submetidos a condições de temperatura e pressão levemente acima daquelas utilizadas na sintetização dos grãos de CBN, dando origem ao PCBN.

3.3.2 Características do CBN

Stahl (2012) lista as seguintes características do PCBN: elevada dureza, elevada resistência mecânica e tenacidade. Possui também moderada a alta condutividade térmica.

Outra característica importante do CBN é sua elevada estabilidade química, o que torna a tendência à difusão desse material bastante baixo. A estabilidade química também fica clara quando observada do ponto de vista de resistência à oxidação. O CBN é estável ao ar por longos períodos a temperaturas próxima dos 1000° C, não sofrendo oxidação (ORTNER *et. al.*, 2014; DINIZ; MARCONDES; COPPINI, 1999).

Em se tratando de dureza, o CBN é, após o diamante, o segundo material mais duro que se conhece. Porém, também em relação ao

diamante, possui maior estabilidade química (SCHROETER; WEINGAERTNER, 2002; DINIZ; MARCONDES; COPPINI, 1999).

Na figura 3.8 se observa a proximidade das durezas do diamante e CBN que, por sua vez, é similar à dureza das cerâmicas. É interessante notar, todavia, que a condutividade térmica do CBN é bastante elevada em relação às cerâmicas, o que constitui uma grande vantagem.

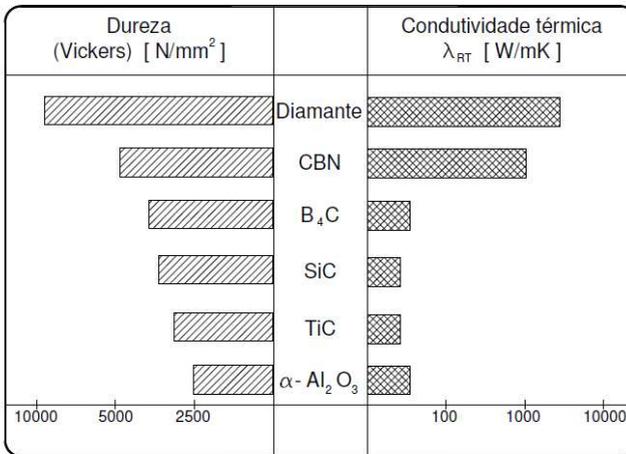


Figura 3. 8 – Propriedades mecânicas de diferentes materiais de ferramenta de corte

Fonte: (SCHROETER; WEINGAERTNER, 2002)

As características descritas nessa seção foram levantadas em relação ao CBN. Em ferramentas de corte de geometria definida esse material é aplicado na forma de PCBN, com presença de ligante. Por consequência, as propriedades ficam suscetíveis à influência do ligante.

3.3.3 Classificação e propriedades do PCBN

Na literatura pesquisada não foi encontrada qualquer norma para classificação do PCBN como material de corte. Cada uma das fontes bibliográficas consultadas adota uma forma de classificação. Também os fornecedores comerciais não apresentam qualquer padronização para essa finalidade, classificando geralmente de acordo com a aplicação de cada uma de suas classes de inserto.

Todavia, todas as classificações consultadas diferenciam os insertos de PCBN por três parâmetros: tamanho dos grãos de CBN, teor

de grãos de CBN e tipo de ligante. A variação desses parâmetros que conferem diferentes propriedades aos insertos.

Abaixo algumas das classificações encontradas na literatura consultada.

Koenig *apud* Schroeter e Weingaertner (2002) apresenta uma classificação baseada no tipo de ligante.

- 1) CBN + fase ligante: são ferramentas convencionais de PCBN. Possuem alto teor de CBN, baixa porcentagem de ligantes, e grãos relativamente grandes.
- 2) CBN + carbonetos (TiC + fase ligante): a fase ligante é formada principalmente carbonetos de titânio ou nitreto de alumínio e titânio. Os tipos PCBN com carbonetos possuem, quando comparados com as ferramentas do grupo I, baixo teor de CBN, maior número de fases ligantes, uma textura de grãos mais finos assim como uma menor condutibilidade térmica. Foram desenvolvidos especialmente para a usinagem de precisão e são apropriados em razão da sua alta estabilidade de quina, assim como de sua resistência ao desgaste na usinagem de acabamento de aços temperados.
- 3) CBN + nitreto de boro hexagonal com estrutura wurtzita (HBN) + fase ligante (+ materiais duros) possuem, além do nitreto de boro cúbico, o nitreto de boro hexagonal com estrutura wurtzita. Essas ferramentas possuem uma composição de cristais finos e com isso uma alta tenacidade e usinabilidade. Um campo de aplicação sugerido é o desbaste e acabamento de materiais de aço e materiais fundidos, assim como aços temperados em cortes contínuos e interrompidos. As ferramentas desse grupo não tiveram um desempenho favorável no mercado.

Já os autores Diniz, Marcondes e Coppini (1999) trazem uma classificação baseada na aplicação: usinagem em desbaste (a_p entre 0,5 e 8 mm) e usinagem em acabamento (a_p menor que 0,5 mm). Os PCBN para desbaste possuem concentração maior de cristais de CBN (90% em volume), o que aumenta a ligação cristal com cristal e faz sua tenacidade aumentar. Maiores quantidades de CBN também aumentam a dureza do inserto. Dadas estas propriedades, esses insertos são muito eficientes quando o mecanismo de desgaste predominante é abrasão, ou onde estão presentes forças de corte muito altas ou corte interrompido.

Bobrovnichii *et al.* (2009) realizaram levantamento das classes disponíveis dos principais fornecedores em nível global, e a respectiva

granulometria, teor de grãos de CBN e tipo de ligante. O resultado da pesquisa está apresentado da figura 3.9. Observa-se que a dureza aumenta juntamente com o teor de grãos de CBN. Os principais tipos de ligante são alumínio e nitreto de titânio.

Empresa e marca comercial	Teor de CBN (v.%)	Granulometria (μm)	Ligante	Dureza (GPa)	Tenacidade à fratura, K_{Ic} ($\text{MPa}\cdot\text{m}^{-1/2}$)	
Element Six	ABM 90	90	Al	HKN 30,8	6,25	
	DBA 80	80	Al+Ti	HKN 29,1	6,17	
	DBC 50	50	TiC	HKN 27,5	4,04	
	DCN 450	45	TiN	HKN 24,2	4,15	
Megadiamond	N 90	90	Metálico	HV 29	-	
	N 50	60	Cermeto	HV 27	-	
	NT 5	50	Cerâmico	HV 26	-	
	BX 930	60	TiC+Al	HV 30-32	-	
Sumitomo	BX 950	85	WC+Co+Al	HV 39-41	-	
	BX 850	70	TiN+WC+Al	HV 33-35	-	
	BX 450	65	TiN+Al	NV 31-33	-	
	BX 310	45	TiN+Al	NV 27-29	-	
	BX 330	55	TiN+Al	NV 28-30	-	
	BX 360	65	TiN+Al	NV 32-34	-	
	BX 380	75	TiN+Al	NV 33-35	-	
	ALCON	Kiborit-1	96-97	3-14	AlN+AlB ₂	HKN 34±0,2
Kiborit-2		80-84	30	AlN+AlB ₂	HKN 25 ± 1	10,5
Kiborit-3		70-75	3	AlN+AlB ₂ +TiC	HKN 27 ± 2	10,5

Figura 3. 9 – Comparativo de classes de PCBN para diferentes fabricantes.
Fonte (BOBROVNITCHII *et al.*, 2009)

3.3.4 Aplicação do PCBN como ferramenta de corte

3.3.4.1 Aplicação industrial das ferramentas de PCBN

O PCBN pode ser utilizado com êxito em diferentes operações de usinagem, sendo ele aplicado com êxito nos processos de fresamento, torneamento e mandrilamento mesmo em condições mais severas, como corte interrompido. Também é uma alternativa viável para substituição do processo de retificação por usinagem com geometria definida em algumas aplicações (DINIZ; MARCONDES; COPPINI, 1999).

O PCBN não é utilizado na forma de ferramentas integrais. Ele geralmente é encontrado de três diferentes formas: insertos brasados em suporte de material resistente, insertos intercambiáveis ou na forma de finas camadas de cobertura para ferramentas de alto desempenho (MONTEIRO *et al.*, 2013; SECO, 2015).

O PCBN em insertos intercambiáveis é a forma de aplicação mais comum para esse material. Os catálogos de fornecedores apresentam três

tipos desses insertos: brasados na quina de inserto de metal-duro (*tipped CBN*), sinterizado em uma das faces de inserto de metal-duro (*full face*) e na forma de insertos compostos integralmente de PCBN - comercialmente apresentado como *solid PCBN*, mas será denominado como PCBN integral nesse trabalho, para evitar ambiguidades (SECO, 2015).

A figura 3.10 apresenta os tipos e formas mais comuns que os insertos de PCBN são disponíveis comercialmente.



Figura 3. 10 – Exemplos de insertos intercambiáveis de PCBN disponíveis comercialmente.

Fonte: adaptado de (SECO, 2015).

Devido às suas propriedades, em especial à estabilidade química, o PCBN pode ser aplicado na usinagem de quase todos os materiais de engenharia. Porém, somente em alguns pode ser aplicado de forma economicamente viável, especialmente devido ao seu alto preço (MACHADO *et al.*, 2009; DINIZ; MARCONDES; COPPINI, 1999).

Em geral, nas aplicações onde o PCBN é utilizado são aquelas nas quais o diamante policristalino não pode ser usado devido à instabilidade química e o metal-duro não possui dureza suficiente para realizar a tarefa (DINIZ; MARCONDES; COPPINI, 1999).

O PCBN vem sendo aplicado com sucesso principalmente usinagem de aço temperado com dureza acima de 45 HRC, aços rápidos, aços ferramenta, ligas com alta porcentagem de carbonetos de tungstênio, usinagem de aços resistentes a altas temperaturas, ligas de níquel e cobalto, que são usinadas com dificuldade com metal-duro. O PCBN pode ser utilizado ainda de forma econômica em materiais de baixa dureza, onde se exige uma boa qualidade na superfície usinada, com desvios dimensionais mínimos na produção de grandes quantidades

de peças padronizadas, como por exemplo, materiais perlíticos fundidos (MACHADO *et al.*, 2009; DINIZ; MARCONDES; COPPINI, 1999).

Já em materiais de baixa dureza que formam cavacos longos o PCBN não se comporta bem, devido à excessiva formação de desgaste de cratera (DINIZ; MARCONDES; COPPINI, 1999).

O PCBN vem ganhando espaço na usinagem como ferramenta de corte de geometria definida devido às suas propriedades. Ao se listar as características das ferramentas de PCBN observa-se que elas correspondem ao que se espera de um bom material de corte:

Elevada dureza: as ferramentas de PCBN possuem baixo desgaste por deformação plástica e abrasão (STAHL, 2012; MACHADO *et al.*, 2009).

Moderado grau de resistência mecânica e tenacidade, tornando-o resistente a fraturas térmicas e mecânicas (STAHL, 2012; MACHADO *et al.*, 2009).

Estabilidade química: o PCBN apresenta elevada resistência à oxidação e à difusão. Portanto, quando aplicado em ferramentas de corte, torna possível a usinagem de aço e outras ligas ferrosas a altas velocidades de corte, sem perder sua integridade química (ORTNER *et al.*, 2014; SCHROETER; WEINGAERTNER, 2002; DINIZ; MARCONDES; COPPINI, 1999; MACHADO *et al.*, 2009).

Moderada a alta condutividade térmica, o que torna suficiente seu grau de dissipação de calor para evitar grandes concentrações no gume cortante (STAHL, 2012; SCHROETER; WEINGAERTNER, 2002).

A substituição de outros materiais de ferramentas de corte por PCBN tem sido efetiva para atingir maiores taxas de remoção de material e prolongar a vida das ferramentas. Também apresentam melhor controle dimensional em produção em série e melhor qualidade de superfície (menor rugosidade). Em vista disso, o PCBN está ganhando espaço na usinagem, especialmente nas operações de fresamento, mandrilamento e fresamento (KATOA; SHINTANIA; SUMIYAB, 2002; SCHROETER; WEINGAERTNER, 2002).

O diamante, por sua vez, possui elevada reatividade com o ferro, o limita sua aplicação em aços e ferros fundidos, devido ao desgaste por difusão em processos com alta geração de calor (DINIZ; MARCONDES; COPPINI, 1999). O PCBN, devido à sua estabilidade

química, é o único dos materiais classificados como de extrema dureza que pode ser utilizado nesses materiais.

Se comparado aos materiais cerâmicos, o CBN apresenta uma série de vantagens. Possui, por exemplo, quase duas vezes a dureza da alumina. A limitação de tenacidade observada em alguns materiais cerâmicos não se observa no CBN. Este possui a mesma tenacidade que as cerâmicas baseadas em nitretos e cerca de duas vezes a da alumina. Também apresenta condutividade térmica superior às cerâmicas, cerca de três vezes maior (DINIZ *et al.*, 1999; SCHROETER; WEINGAERTNER, 2002; MACHADO *et al.*, 2009).

Em relação ao metal-duro, o PCBN apresenta as seguintes vantagens: maiores velocidades de corte e taxas de remoção de material, maiores taxas de avanço, melhor controle dimensional para componentes críticos de alta precisão, ganhos em qualidade da superfície (baixa rugosidade) e maior vida de ferramentas (YALLESE, 2009).

O Apêndice A apresenta uma tabela com as propriedades de diferentes ferramentas de corte. Pode-se observar que ainda que a dureza a quente (1000°C) do PCBN é o dobro da dureza das cerâmicas à base de alumina e quatro vezes do metal-duro.

A utilização de ferramentas de PCBN de geometria definida tem substituído processos de retificação com vantagens, tais como redução de tempo de processo, redução substancial de custo, melhoria da integridade da superfície, redução da utilização dos fluidos de corte, que são danosos para o meio ambiente, além de obtenção de geometrias complexas, não possíveis com retificação (KHAIDER *et al.*, 2014).

A usinagem com PCBN, apesar das vantagens oriundas da alta dureza, apresenta alguns desafios. Sua aplicação necessita de equipamentos rígidos, visto que vibrações e folgas podem ocasionar quebra prematura da ferramenta, devido a sua baixa tenacidade comparada ao metal-duro, por exemplo. Equipamentos de alta rigidez são mais caros.

O custo dos insertos de CBN é mais alto que o do material cerâmico. Sendo assim, para tornar economicamente viável sua aplicação, são necessários parâmetros de corte de elevada produtividade (altas velocidades de corte) e a maioria dos equipamentos de usinagem não atingem essas velocidades (DINIZ; MARCONDES; COPPINI, 1999).

Também devido ao alto custo dos insertos, sua aplicação muitas vezes fica restrita à produção em larga escala. A vida das ferramentas de PCBN tende a ser muito maior que as de metal-duro, por exemplo.

Sendo assim, apenas em grandes lotes de peça consegue-se utilizar toda a vida disponível, diluindo o custo da ferramenta. Quando aplicados em escala outra vantagem do PCBN, oriunda da elevada vida da ferramenta, passa a ser significativa: diminuição do tempo em que a máquina permanece parada para retirada da ferramenta gasta e ajustagem da nova (MACHADO *et al.*, 2009).

Portanto, uma aplicação de PCBN economicamente viável somente é possível em equipamentos extremamente rígidos, e em faixas de velocidades de corte específicas (GUHRING, 2015; DINIZ; MARCONDES; COPPINI, 1999).

3.3.4.2 Escolha dos parâmetros de corte para usinagem com PCBN

A escolha dos parâmetros de corte na utilização de PCBN não é tarefa trivial. Atualmente, a escolha é baseada na experiência do operador ou em catálogo de fornecedor. Porém, os valores de ambas as fontes podem ser considerados como parâmetros de início de operação, mas não como parâmetros otimizados (KHAIDER *et al.*, 2014).

Recorrendo aos catálogos de fornecedor, percebe-se que as velocidades de corte para PCBN são muito maiores que as recomendadas para metal-duro, tanto para torneamento quanto fresamento. O catálogo da empresa Gühring (2015) recomenda, para fresamento de ferros fundidos cinzentos, velocidades de corte entre 750 e 1100 m/min. Já o catálogo da empresa Seco (2015) recomenda para o mesmo processo velocidades de corte entre 700 e 2000 m/min e entre 500 e 1500 m/min para torneamento, também em ferro fundido cinzento (figura 3.11). Somente para comparação, as velocidades recomendadas para metal-duro para mesmo material estão entre 100 a 250 m/min.

As recomendações de aplicação de altas velocidades de corte estão associadas à formação de camadas protetoras de sulfeto de manganês oriundo de inclusões do ferro fundido cinzento. Tanto os estudos de Abele, Sahn e Schulz (2002) quanto de Gastel *et al.* (2000) concluem que velocidades de corte acima de 400 m/min são preferíveis para esse material por favorecerem a formação da referida camada, conduzindo a vidas de ferramenta maiores devido às suas propriedades lubrificantes e proteção do material da ferramenta contra difusão química.

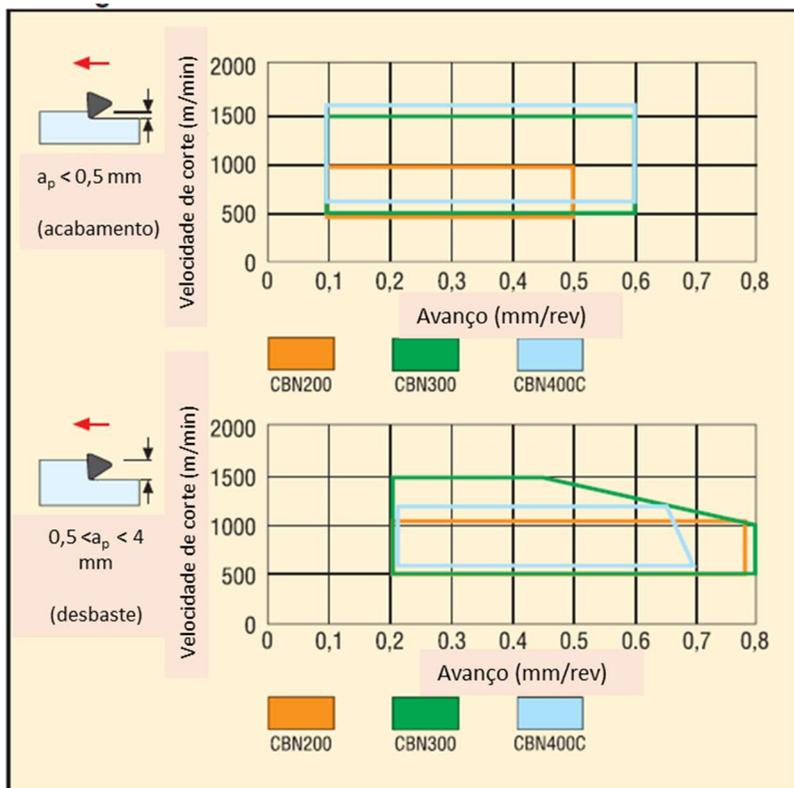


Figura 3. 11– Exemplos de recomendação de parâmetros de corte para PCBN
Fonte: (SECO, 2015)

3.3.5 Resultados de pesquisa sobre usinagem com ferramentas de PCBN

O PCBN como ferramenta de corte pode ser aplicado em vários tipos de materiais de engenharia que passam por processos de usinagem. Todavia, nem sempre seu emprego é viável do ponto de vista econômico, especialmente devido ao alto custo dessas ferramentas, fazendo com que na atualidade estude-se a aplicação somente em alguns materiais e processos em detrimento dos demais campos de aplicação.

Para subsidiar a presente pesquisa procurou-se explorar os trabalhos já realizados sobre aplicação de PCBN em diferentes materiais da peça e processos.

O primeiro assunto estudado foi o desgaste de ferramenta, por ter forte ligação com a escolha dos parâmetros de corte utilizados, além de influenciar na rugosidade e parâmetros geométricos da peça após usinagem. Portanto, tem impacto direto sobre a produtividade e custos da usinagem.

O desgaste de ferramentas é um assunto complexo. Existe uma série de fatores causadores, que tem como consequência diversos tipos de avarias nas ferramentas, de variadas magnitudes. Dessa forma, seu entendimento é fundamental para o aprimoramento dos processos de usinagem. Muitos pesquisadores tentaram entender a forma e origem do desgaste dos diferentes materiais de corte e também do PCBN.

Nas ferramentas de PCBN, o desgaste está relacionado a fatores relacionados a : 1) granulometria dos cristais de CBN, 2) tipo e quantidade de ligante; 3) processo: parâmetros de corte, fluido de corte, 4) material da peça: composição, microestrutura e dureza da peça e 5) geometria de ferramenta (ARSECULARATNEA; ZHANGA; MONTROSSB, 2006).

O estudo de Angseryd, Olsson e Andrén (2011) trata especificamente do impacto de variações do material da peça sobre a degradação de ferramentas de PCBN. Nesse estudo, pesquisou-se a influência da variação da quantidade de enxofre e consequente formação de camada de sulfeto de manganês sobre a ferramenta de PCBN em torneamento de aços endurecidos. Constataram-se os efeitos positivos dessa camada lubrificante, protegendo a ferramenta especialmente do desgaste na face, de forma similar ao que ocorre com ferramentas de metal-duro.

Para entender a influência do ligante, Katoa, Shintania e Sumiyab (2002) investigaram o desempenho de ferramentas de PCBN sem a presença de ligante em fresamento de ferro fundido. Para isso, compararam insertos com 80% de grãos de CBN e ligante à base de cobalto e alumínio, com insertos com 100% de nano-grãos de CBN sinterizados. Como resultado, observaram que a ferramenta de PCBN integral alcançou uma vida seis vezes maior que a ferramenta com 80% de grãos de PCBN. As trincas devido às solicitações térmicas também tiveram sensível redução e a rugosidade da superfície da peça permaneceu em média metade daquela com ligante ao longo de toda a vida da ferramenta. Assim, fica evidente a grande influência do ligante no desempenho das ferramentas de PCBN.

Liew, Ngoi e Lu (2002) estudaram diferentes trabalhos científicos sobre desgaste de ferramenta de PCBN em torneamento de aços inoxidáveis. Concluíram que o principal modo de desgaste na face da

ferramenta é desgaste por cratera, devido à difusão do ligante durante o corte. Já o desgaste de flanco é causado pela interação química entre a ferramenta, peça e o ambiente, que resulta numa diminuição de dureza da ferramenta.

Já König e Neises (1993), em seu trabalho sobre investigação dos mecanismos predominantes no desgaste do PCBN, relatam que a recristalização induzida termicamente na fase ligante é o fator dominante de desgaste.

Diferentes mecanismos de desgaste tais como abrasão, adesão, difusão e químico têm sido utilizados para explicar o desgaste de flanco das ferramentas de PCBN. Isso indica que o desgaste de PCBN ainda não está completamente entendido (ARSECULARATNEA; ZHANGA; MONTROSSB, 2006).

O entendimento do desgaste e desempenho das ferramentas de PCBN é fundamental para a melhoria da produtividade na aplicação delas e por consequência para a competitividade da indústria.

Outros trabalhos focaram em pontos diversos da aplicação do PCBN, não apenas no desgaste. Foi encontrado amplo material de pesquisa. Para facilitar a apresentação e avaliação dos resultados do material consultado, foi organizada uma tabela contendo título, autores, objetivos, material usinado, forma de aplicação do CBN, parâmetros de corte, resultados, conclusões e informações relevantes de cada trabalho (tabelas 3.1 a 3.5). Após as tabelas será apresentada uma síntese com as informações mais relevantes extraídas dessas pesquisas.

Em relação às tabelas apresentadas 3.1 a 3.4, cabe destacar vários aspectos. A rugosidade obtida na usinagem com ferramentas de PCBN atingiu valores bastante baixos, com R_a na ordem de $0,5 \mu\text{m}$ em todas as pesquisas consultadas, considerada rugosidade fina segundo a ABNT NBR 8404.

Uhlmann *et al.* (2004) compararam em seu trabalho o desempenho do PCBN e cerâmica, constatando que o PCBN atingiu valores de rugosidade média R_a que se aproximaram da metade dos valores obtidos com ferramentas de cerâmica, além de menor dispersão desses ao longo das repetições nos testes.

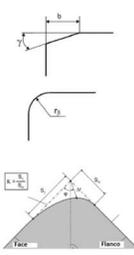
Saoubia *et al.* (2014), que empregaram ferramentas de PCBN para usinagem de aços ferramentas, obtiveram valores de rugosidade média R_a em torno de $0,5 \mu\text{m}$ e rugosidade de pico R_z $3 \mu\text{m}$.

Tabela 3. 1 – Resumo da pesquisa de aplicação de PCBN para diferentes materiais – parte 1

Título do Trabalho / Referência	Objetivos	Material usinado	Forma de aplicação do CBN / Características da ferramenta	Parâmetros de Corte	Resultados / Conclusões / Informações relevantes
Fresamento					
<p><i>Investigation of TiN Coated CBN and CBN Cutting Tool Performance in Hard Milling Application</i></p> <p>TAYLAN, F.; ÇOLAK, O.; KAYACAN, M.C.; 2011</p>	<p>Avaliação de desempenho e estabilidade (do ponto de vista de vibrações) de insertos de PCBN integral e PCBN integral com cobertura em fresamento pesado de aço de elevada dureza</p>	<p>Aço</p> <p>Ferramenta para trabalho a frio</p> <p>90MnCrV8, 61 HRC de dureza</p>	<p>1) Inseto de PCBN sólido</p> <ul style="list-style-type: none"> - 90% de grãos de CBN - Ligante cerâmico - tamanho de grão médio: 22 μm <p>2) Inseto de PCBN sólido com cobertura</p> <ul style="list-style-type: none"> - 90% de grãos de CBN - Ligante cerâmico - tamanho de grão médio: 22 μm - cobertura de Ti(C,N) + (Ti, Al) N + TiN com espessura de 2-4 μm 	<p>$v_c =$ entre 125 e 525 m/min</p> <p>$a_p = 0,6\text{mm}$</p> <p>$f_z = 0,05 - 0,075 - 0,1 - 0,125$ e 0,150 mm/ inserto</p>	<p>1) O tipo predominante de dano em ambos insertos estudados é lascamento do gume; os insertos de PCBN tendem a ter fim de vida por esse tipo de dano;</p> <p>2) O desgaste tende a aumentar com menores velocidades de corte e maiores avanços, e tende a diminuir com maiores velocidades de corte e menores avanços;</p> <p>3) As forças de corte seguem a mesma tendência do desgaste: aumentam com o aumento do avanço;</p> <p>4) O inserto com cobertura apresentou 4 vezes mais lascamentos, o que evidencia que esse tipo de inserto não é recomendável para corte interrompido;</p> <p>5) Desgaste de flanco máximo (critério de fim de vida): 0,7mm;</p>
<p><i>Wear Mechanism of CBN Inserts during Machining of Bimetal Aluminum-Grey Cast Iron Engine Block</i></p> <p>MALAKIZADI, A.; SADIK, I.; NYBORG, L.; 2013</p>	<p>Investigação do mecanismo de desgaste de insertos de PCBN em fresamento de bloco de motor bi-material através de microscopia eletrônico de varredura (MEV)</p>	<p>Bi-material composto de ferro fundido vermicular e alumínio.</p>	<p>Fresa com 12 insertos: 11 insertos redondos da classe CB50 e 1 inserto alisador (*)</p> <p>(*) segundo classificação da companhia Sandvik-Coromant</p>	<p>$f_z = 0,1$ mm/inserto;</p> <p>$a_p = 0.5$ mm;</p> <p>$v_c = 2300$ m/min.</p>	<p>1) Usinagem com fluido de corte;</p> <p>2) Os principais danos à ferramenta no processo de fresamento são: a) lascamento, resultado de repetidas mudanças de força de corte e b) fissuras perpendiculares ao corte, devido a tensões térmicas alternantes;</p> <p>3) Para evitar adesão de material sobre a superfície da ferramenta é recomendado utilização de fluido de corte na usinagem de alumínio. Já no caso do ferro fundido, é recomendado usinagem a seco para evitar choques térmicos;</p> <p>4) Nos experimentos realizados pelos autores, as trincas de origem térmica foram o principal tipo de dano às ferramentas.</p>

Fonte: AUTOR

Tabela 3. 2 – Resumo da pesquisa de aplicação de PCBN para diferentes materiais – parte 2

Torneamento					
Título do Trabalho	Objetivos	Material usinado	Forma de aplicação do CBN / Características inserto	Parâmetros de Corte	Resultados / Conclusões / Informações relevantes
<p>Cutting edge preparation of PCBN inserts by means of grinding and its application in hard turning (Preparação de gume de insertos de PCBN por retificação e sua aplicação em torneamento de ferramentas de PCBN)</p> <p>VENTURA, C.R. H.; KÖHLER, J.; DENKINA, B., 2013</p>	<p>Investigar a preparação do gume dos insertos de PCBN por retificação e verificar sua aplicação em torneamento pesado.</p>	<p>Aço 16MnCr5S, 60 HRC de diâmetro.</p>	 <p>A cima possíveis preparações de gume, na seqüência: chanfro, arredondamento e assimétrico. No trabalho foi utilizado chanfro e um aproximação do assimétrico com 3 e 5 chanfros. Inseto de PCBN é composto de 90% de grãos de CBN com tamanho médio de 4 μm, ligante base TiCN e Co. O inserto de PCBN é braseado em substrato de metal duro classe K10-20.</p>	<p>v_c: 200m/min f: 0,1 mm/rev a_p: 0,1 mm.</p>	<ol style="list-style-type: none"> 1) Devido ao PCBN ser um material frágil, é necessário uma adequada preparação do gume das ferramentas com esse material, a fim de evitar lascamento no processo de torneamento; 2) Geometrias de gume maiores contribuem para aumento das forças de corte e temperatura. Devido à isso, pequenos chanfros e arredondamentos são indicados para refrigerar o gume, sem causar danos ao processo; 3) A retificação geralmente é utilizada em insertos de PCBN para obtenção de superfícies e algumas geometrias. Já os gumes são comumente preparados por processos de escovamento; 4) Um tipo muito comum de preparação de gume é a utilização de um chanfro entre a face e o flanco da ferramenta. Essa geometria introduz algumas características no processo: devido ao ângulo de saída se tornar mais negativo, aumenta a força de corte e a geração de calor, provocando amolecimento no material usinado. As forças de corte induzem tensões compressivas na superfície da peça. Os danos à ferramenta diminuem na presença de chanfros, especialmente o lascamento. 5) Outro tipo de preparação possível é o arredondamento de gume, que também tem como resultado diminuição de lascamento. Porém, quando a profundidade de corte é menor que a metade do raio, o desempenho da ferramenta cai, pois o corte deixa de acontecer por cisalhamento e passa a ser por amassamento do material da peça. Isso tem como consequência maiores temperaturas, maiores forças de corte e tensões residuais, além de poder ocasionar desvios dimensionais; 6) Existem ainda geometrias de gume diversas, que podem ser denominadas como "assimétricas". Seu desempenho tem relação com a forma escolhida. 7) Segundo os autores, a geometria de preparação de gume proposta (aproximação de gume assimétrico por múltiplos chanfros obtidos por retificação) mostrou-se adequada para aumentar a vida de ferramenta e introdução de tensões compressivas na superfície usinada, apenas de gerar menores forças de corte.

$v_c =$
 200m/min
 $f =$
 0,1 mm
 $a_p =$
 0,1 mm.

Fonte: AUTOR

Tabela 3. 3 – Resumo da pesquisa de aplicação de PCBN para diferentes materiais – parte 3

Título do Trabalho	Objetivos	Material usinado	Forma de aplicação do CBN / Características da ferramenta	Parâmetros de Corte	Resultados / Conclusões / Informações relevantes
Torneamento					
CBN coatings on cutting tools UHLMANN, E.; BRÄUER, G.; WIEMANN, E.; KEUNECKE, M., 2004	Desenvolver coberturas de CBN como opções de aplicação a insertos CBN em ferramentas de corte com menor custo. Possibilidade de geometrias mais complexas aos insertos.	Aço ligado 34 CrNiMo 6 / Ferro fundido nodular GJS-500-7 / Aço endurecido 150 CrVMo121.	Insertos de metal-duro classe K10 recoberto com CBN (PVD), TiAlN (PVD), TiCN-Al ₂ O ₃ -Tin (CVD). Insertos de cerâmica óxida e PCBN .	$v_c = 20, 50, 75, 100, 125, 180$ e 1000 m/min $f = 0,1 / 0,3 ; 0,8 / 1,1$ mm $a_p = 0,5 ; 2,0$ mm.	1) Na usinagem de ferro fundido nodular em usinagem de alta velocidade (1000m/min) a vida de ferramentas cobertas com CBN atingiu 50% da vida das ferramentas a base de cerâmica óxida, e 40% da vida das ferramentas em PCBN; 2) No comparativo entre as coberturas de CBN e as demais, não se observaram alterações significativas de força de corte. Já a rugosidade da superfície usinada com ferramenta com cobertura de CBN foi significativamente menor das demais, atingindo metade dos valores médios e menor dispersão de resultados. 4) Os tipos de desgaste apresentados pela cobertura e CBN são os mesmos encontrados nos demais insertos com coberturas a base de titânio.
Turning of interrupted and continuous hardened steel surfaces using ceramic and CBN cutting tools GODOY, V. A. A. ; DINIZ, A. E., 2011	Avaliar o comportamento de materias de ferramentas de elevada dureza - cerâmica e PCBN - em diferentes velocidades de corte, em superfícies contínuas e interrompidas.	Aço AISI 4340, 56 HRC de dureza.	Insertos de CBN (*): 1) 7015 - PCBN com baixo teor de grãos de CBN. Ligante cerâmico; 2) 7025 - PCBN com altoteor de grãos de CBN. Insertos de cerâmica (*): 1) CC650 - cerâmica a base de Alumina e Nitreto de Titânio; 2) CC670 - cerâmica a base de nitreto de silício e reforçado com whiskers (*) segundo classificação da companhia Sandkvik-Coromant:	$a_p = 0.15$ mm and $f = 0.08$ mm Corte interrompido: $v_c = 150$ e 195 m/min Corte Contínuo: $v_c = 150$ e 270 m/min	1) O desgaste de flanco das ferramentas de PCBN, em todas as condições de corte foi consideravelmente menor que nas ferramentas de cerâmica; 2) Em corte contínuo, o desgaste predominante no PCBN a baixas velocidades de corte é o abrasivo e a altas velocidades de corte o desgaste predominante é o desgaste por difusão; 3) Em corte interrompido, os mecanismos predominante no PCBN também foram abrasão e difusão. Não foi observado lascamento, o que indica que ferramentas de PCBN também são adequadas para corte interrompido; 4) Os valores de rugosidade obtidos na usinagem com PCBN foram consideravelmente baixos, e se mantiveram baixos ao longo de toda a vida útil da ferramenta; 5) Como conclusão, os autores afirmam que o PCBN é melhor que cerâmica tanto para corte contínuo quanto interrompido. A conclusão está relacionada com os baixos valores de rugosidade e alta vida da ferramenta. Ainda segundo os autores, mesmo com o preço maior, o PCBN é o único material de ferramenta que consegue ser técnica e economicamente viável na substituição de retificação para aços de elevada dureza.

Fonte: AUTOR

Tabela 3. 4 – Resumo da pesquisa de aplicação de PCBN para diferentes materiais – parte 4

Título do Trabalho	Objetivos	Material usinado	Forma de aplicação do CBN / Características da ferramenta	Parâmetros de Corte	Resultados / Conclusões / Informações relevantes
Torneamento					
<p>Hard Machining of Hardened Bearing Steel Using Cubic Boron Nitride Tool</p> <p>YALLESE, M.A., CHAOUI, K., ZEGHIB, N., BOULANOUAR, L., RIGAL, J.F, 2009</p>	<p>Entender o comportamento de ferramentas de CBN em torneamento pesado de aço de alta liga. Estabelecer parâmetros de usinagem viáveis para essa aplicação.</p>	<p>Aço temperado 100Cr6, 60 HRC de dureza. Material utilizado principalmente para fabricação de pistas de rolamentos.</p>	<p>Inserto de PCBN classe CBN7020 (*):</p> <p>- baixo teor de grãos de CBN, 57%</p> <p>- ligante cerâmico, 35% Ti(C,N).</p> <p>(*): Classificação comercial da empresa Sandvik</p>	<p>$v_c = 90, 120, 180, 220, 280$ e 350 m/min</p> <p>$f = 0.08 < f < 0.24$ mm/rev.</p> <p>$a_p = 0,1 < a_p < 1,0$ mm</p>	<p>1s) É largamente estabelecido na literatura que a alta resistência ao desgaste das ferramentas a base de CBN se dá também pela baixíssima solubilidade desse material. Sendo assim, em todos os processos de usinagem em que o comportamento predominante de desgaste é do tipo dissolução-difusão, as ferramentas a base de CBN são uma opção viável;</p> <p>2) As velocidades de corte entre 90 e 220 m/min se mostraram muito mais interessantes que as velocidades na faixa entre 280 e 350 m/min, devido ao desgaste de flanco significativamente menor; do ponto de vista de desgaste, a velocidade de corte mais interessante é 120m/min;</p> <p>3) Existe uma estreita ligação entre a rugosidade e o desgaste das ferramentas de PCBN. Em velocidades de corte maiores, observa-se aumento do desgaste que conduz a um aumento da degradação da superfície. Porém, a rugosidade manteve-se baixa durante todos os testes, nunca excedendo R_a de $0,55 \mu\text{m}$;</p> <p>4) Foi proposta a equação $R_a = K e_c (VB)$, na qual os elementos K e e_c são coeficientes determinados experimentalmente. Essa fórmula é muito útil para acompanhamento de processo e indica a relação direta entre desgaste de ferramenta e qualidade da superfície gerada;</p> <p>5) A rugosidade mostrou-se largamente influenciada pelo avanço. Porém, a profundidade de corte não mostrou influência direta sobre a rugosidade.</p>

Fonte: AUTOR

Tabela 3. 5 – Resumo da pesquisa de aplicação de PCBN para diferentes materiais – parte 5

Título do Trabalho	Objetivos	Material usinado	Forma de aplicação do CBN / Características da ferramenta	Parâmetros de Corte	Resultados / Conclusões / Informações relevantes
Torneamento					
Machinability of powder metallurgy steels using PcBN inserts SAOUBIA, R.M.; CZOTSCHERA, O. ; ANDERSSON, O.; MEYERB, D, 2014	Estudar a usinabilidade das ligas de aço-rápido obtidas por metalurgia do pó com ferramentas de corte de PCBN, em diferentes velocidades de corte e preparações de gume em torneamento horizontal e ortogonal com ferramentas de PCBN.	Aço-rápido M2 e OB1. Uma variação de cada material contendo 1% de MnS também foi testada. Observação: esse tipo de material é mais conhecido na indústria como Aço-rápido Sinterizado.	Inserto de PCBN classe CBN7020 (*): Preparação de chanfro: 1) Chanfro com ângulos 15, 20, 30°; 2) raio de 10, 25, 40 µm; (*) Classificação comercial da empresa Sandvik	$v_c = 150, 200, 250$ m/min; $f = 0,050; 0,075; 0,1$ mm/ver; $a_p = 0,1$ e $1,75$ mm em torneamento longitudinal e transversal, respectivamente.	1) os critérios de fim de vida utilizados foram $VB_{max} = 0,2$ mm e $KT = 0,1$ mm; 2) As ferramentas de PCBN tiveram uma vida substancialmente maior quando usinando materiais com inclusões de MnS. Na usinagem do aço M2, a vida foi cerca de 7x maior, enquanto que na usinagem do OB1 a vida foi cerca de 3x maior para os materiais com as inclusões; 3) Foram encontrados valores de rugosidade bastante baixos em todos os materiais usinados. Os valores de rugosidade média encontrados ficaram em torno de $0,5$ µm de rugosidade média R_a . Já os valores de rugosidade de pico R_z ficaram abaixo de 3 µm em quase todas as condições testadas; 4) Não foram encontrados efeitos relevantes da preparação de gume (chanfro e arredondamento de gume) nas forças de corte ou desgaste de ferramenta. Todavia, chanfros e raios maiores parecem favorecer rugosidades menores; 5) Avanços maiores implicaram em aumento do desgaste da ferramenta, aumento das forças de corte e maior deterioração da mesma. Já altas velocidades de corte também levaram a maiores desgastes de ferramenta, mas melhoraram o acabamento da peça; 6) O efeito lubrificante do MnS parece ser mais relevante a baixas velocidades de corte. Os autores atribuem isso ao fato de que à baixas velocidades de corte o tempo de contato da ferramenta com o gume é maior; 7) Como conclusão final, os autores afirmam que aumento na quantidade de MnS em aços rápidos usinados com ferramentas de PCBN favorecem a produtividade, através de aumento da velocidade de corte, além de melhorarem a qualidade da superfície usinada.

Fonte: AUTOR

Godoy e Diniz (2011) também chamaram atenção para os baixos valores de rugosidade, enfatizando ainda que os valores se mantiveram baixos ao longo de toda a vida da ferramenta.

Os estudos consultados também trouxeram informações importantes acerca do comportamento da rugosidade em relação a outras variáveis de processo.

Yallese, *et al.* (2009) observaram que o aumento no avanço tem como consequência valores maiores de rugosidade. No mesmo estudo o autor demonstrou que aumento na profundidade de corte não possui influência significativa na rugosidade. Outra informação importante levantada pelos autores é o fato de que a rugosidade, apesar de manter-se em patamares baixos ($R_a = 0,55 \mu\text{m}$), aumenta à medida que a ferramenta se desgasta.

Saoubia *et al.* (2014) constataram que velocidades de corte maiores favorecem rugosidade menores.

No que tange à rugosidade, todos os estudos mencionados anteriormente encontraram resultados coerentes com o trabalho de Brandt (2014), que obteve valores de rugosidade média R_a abaixo de $1 \mu\text{m}$.

A aplicação do PCBN em corte interrompido também foi objeto de estudo. Devido a sua menor tenacidade em relação ao metal-duro e aço-rápido, no início da utilização desse material como ferramenta de corte, havia dúvida quanto à possibilidade desse tipo de aplicação.

Malakizadi, Sadick e Nyborg (2013) em seu estudo sobre fresamento, observaram que os insertos de PCBN apresentam como principais danos em operação o lascamento e fissuras de origem térmica.

Taylan, Çolak e Kayacan (2011) investigaram a aplicação de PCBN também em fresamento e indicam o lascamento como principal dano à ferramenta e causador do fim de vida. Em ambos os estudos, realizados em fresamento, observa-se que o lascamento é fator determinante para o fim de vida. Esse fato está relacionado com a natureza frágil do PCBN, frente às características de corte interrompido do fresamento, que submete a ferramenta a choques térmicos e mecânicos.

Para corte contínuo, o trabalho de Godoy e Diniz (2011), que empregou ferramentas de PCBN para usinagem de aços ferramentas, concluiu que a baixas velocidades de corte o principal mecanismo de desgaste é a abrasão, enquanto que a altas velocidades de corte o mecanismo predominante é a difusão.

O efeito das inclusões de sulfeto de manganês na usinagem de ferro fundido, utilizando ferramentas de PCBN, já foi largamente discutido na

seção sobre usinabilidade desses materiais. De forma similar ao que ocorre com o ferro fundido cinzento, estudos apontam que essas inclusões possuem efeitos benéficos também em outros materiais, como aços ferramenta sinterizados. Saoubia *et al.* (2014) observaram que na usinagem desses materiais, quando se adiciona 1% de MnS, a vida de ferramenta de PCBN pode aumentar de três a sete vezes.

Outro fator relevante a ser considerado na aplicação de PCBN é preparação dos gumes da ferramenta, que consiste na fabricação de geometrias entre a face e o flanco da mesma. Devido ao PCBN ser um material frágil, a ausência de preparação dos gumes pode resultar em lascamentos e outros danos. As duas formas mais comuns de preparação dos gumes são: arredondamento, também conhecido como *honing* e chanfros. Existem outras formas genericamente chamadas de assimétricas. Todas as geometrias citadas tornam o ângulo de saída negativo, o que contribui para elevação da temperatura e forças de corte. Também tendem a provocar tensões compressivas na superfície da peça, que apesar do efeito benéfico, quando de moderada magnitude, podem provocar desvios dimensionais na peça quando elevadas. O arredondamento do gume, quando a profundidade de corte for menor que metade do raio, faz com que o desempenho da usinagem caia, pelo fato de o material passar a ser arrancado durante o corte, gerando superfícies de baixa qualidade (VENTURA; KÖHLER; DENKENA, 2013). Saoubia *et al.* (2014) observaram também que o chanfros e arredondamentos favorecem rugosidades menores na superfície usinada.

O PCBN pode ser aplicado com ou sem fluido de corte. Para materiais dúcteis, com tendência à formação de gume postiço, é indicada a aplicação de fluido de corte, o que também reduz desgaste por adesão. Já em materiais frágeis como o ferro fundido, o mais indicado é usinagem a seco (MALAKIZADI; SADIK; NYBORG; 2013).

As informações anteriormente apresentadas contribuíram para decisões tomadas ao longo deste trabalho. Observou-se que fatores como rugosidade poderiam ser bastante explorados, devido aos excelentes resultados obtidos por todos os autores. Outro aspecto que ganhou importância no estudo dos artigos foi a preparação de gume, que por vezes tem sua importância desconsiderada. Os gumes principais das ferramentas testadas neste trabalho foram preparados com *honing* de 0,05 mm de raio.

3.3.6 Considerações sobre a aplicação de PBCN em furação

Nas seções anteriores, observam-se diversos estudos sobre a utilização do PCBN como material de ferramenta de corte em operações de fresamento e torneamento, mas nenhum em furação.

Efetuiu-se uma extensa pesquisa sobre utilização de PCBN em furação, que teve como resultado apenas o trabalho de Brandt (2014) com informações significativas. Por essa razão, os resultados obtidos na referida fonte serviram de referência para decisões relativas ao projeto das brocas. O conceito de broca apresentado pelo autor baseia-se em uma broca de canal reto, com inserto de PCBN brasado na ponta.

Nessa seção serão feitas considerações sobre furação com PCBN e discussões sobre o conceito de broca aplicado na presente pesquisa.

No que tange à fabricação de brocas com esse conceito, o primeiro ponto a ser discutido é o material do corpo da ferramenta. A força de corte resultante com broca em operação é aproximadamente normal ao gume e paralela à velocidade de corte. Como resultado, a broca é submetida a imensos momentos torsores. Portanto, é necessário que o corpo da broca seja fabricado com material de alta tenacidade para evitar a quebra da broca.

A primeira opção de material estudada por Brandt (2014) para corpo da broca foi aço-rápido, pelo menor custo e maior tenacidade. Todavia, essas brocas não tiveram bom desempenho, pois quando submetida a baixos avanços (0,04 mm), o inserto de PCBN apresentou avarias. Essas avarias foram atribuídas ao fato do aço-rápido não possuir a rigidez necessária para suportar as forças de corte, fazendo com que o inserto flexione, provocando trincas. Quando submetida a avanços maiores (0,2 mm), houve a ruptura do corpo de aço-rápido. A segunda opção de material para o corpo da ferramenta estudada pelo referido autor foi metal-duro classe K40. As brocas com corpo desse material não apresentaram avarias nos insertos de PCBN. Em vista disso, optou-se pela utilização de metal-duro como material do corpo das brocas também para o presente trabalho.

O segundo ponto de interesse para a presente pesquisa é a decisão sobre a forma do inserto de PCBN a ser brasado na ponta das brocas. Brandt (2014) apresenta em suas conclusões que o grande limitante para uma maior vida de sua ferramenta foi a fragilidade do gume transversal. Como o inserto de PCBN utilizado era do tipo “*full face*”, o gume transversal possuía substrato de metal-duro como seu formador, o que o tornava menos resistente que as demais partes do gume da broca (ver figura 3.12). Por essa razão, optou-se neste trabalho pela utilização de insertos integrais para os experimentos principais, que proporcionam gume transversal totalmente em PCBN. Além dos testes feitos com

insertos integrais, foram feitos novos experimentos com o mesmo tipo de inserto utilizado por Brandt (insertos *full face*), visando aprofundar o entendimento do conceito que serviu de fundamentação para esta pesquisa.

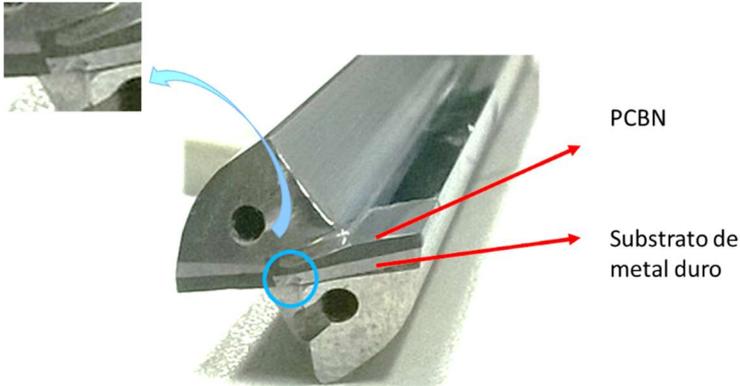


Figura 3. 12 - Broca com inserto de PCBN full face brasado na ponta, conceito utilizado por Brandt (2014). O detalhe apresenta o gume transversal, com a parte de PCBN (escura) e metal-duro (clara)

Fonte: Autor

O presente trabalho visou o estudo do comportamento de brocas com ponta de PCBN em furação de ferro fundido cinzento. O referencial de pesquisa, até esse ponto, já trouxe informações relevantes para subsidiar decisões relativas ao teste, como quais parâmetros de corte são indicados para o PCBN. Indicou cuidados que se deve ter durante a usinagem, principalmente no que se refere à necessidade de fixação e equipamentos rígidos, evitando lascamentos prematuros do PCBN. Por meio do estudo de outras aplicações, percebeu-se ainda que esse material de ferramenta favorece baixas rugosidades e maior precisão dimensional da peça, fatores que serão explorados nos experimentos e análise dos resultados.

Relacionando informações apresentadas no subcapítulo sobre furação, com as discutidas no estudo do PCBN, entendeu-se que existe um grande desafio em conciliar uma característica desse processo, que é a baixa velocidade de corte nas proximidades do centro, com a menor tenacidade do PCBN quando comparado a outros materiais utilizados em ferramentas de corte. De acordo com a literatura consultada, o

PCBN apresenta melhor comportamento quando submetido a velocidades de corte elevadas.

Na seção a seguir, será abordado o material dos corpos de prova utilizado nos experimentos.

3.4 FERROS FUNDIDOS

O ferro fundido é uma liga ferro-carbono-silício, de teores de carbono geralmente acima de 2%. Possui carbono livre na forma de veios ou lamelas de grafita. Em sua composição ainda se encontram manganês, enxofre e fósforo, além de elemento de liga para alterar características do material (GUESSER, 2009).

Os ferros fundidos encontram-se entre os materiais de construção mais utilizados na indústria e existem diversos tipos, atendendo a diferentes necessidades. Segundo Guesser (2009), os ferros fundidos são classificados em cinco tipos principais: ferro fundido cinzento, nodular, vermicular, branco e maleável. A diferenciação entre eles é dada principalmente pela composição química e processo de fabricação, sendo que nesse último fator a taxa de resfriamento é a variável de maior importância.

Neste capítulo será estudado apenas o ferro fundido cinzento, por ser o material empregado na pesquisa.

3.4.1 Ferros Fundidos Cinzentos

A principal característica dos ferros fundidos cinzentos é apresentar a grafita em forma de veios. Isso confere a essa classe de ferro fundido aspecto acinzentado no material.

Nesse material a grafita, que se apresenta em forma de veios, é dispersa em uma matriz que geralmente é perlítica. Adições de níquel podem ainda produzir uma matriz austenítica. Apresentam em sua composição química o carbono entre 2,5 a 4%, o silício entre 1 a 3%, além de outros elementos que alteram as propriedades mecânicas do material (GUESSER, 2009).

Na figura 3.13 apresenta-se a microestrutura típica dos ferros fundidos cinzentos.



Figura 3. 13 - Microestrutura Típica de Ferro Fundido Cinzento. Grafita em forma de veios dispersas em matriz perlítica.

Fonte : (AMERICAN SOCIETY FOR METALS,1972).

A microestrutura do ferro fundido cinzento confere a esse material algumas características peculiares. Embora ele tenha uma resistência mecânica e ductilidade relativamente baixa, apresenta alta capacidade de amortecimento de vibrações, propriedade desejada para estruturas de máquinas e componentes de motores, elevada resistência ao desgaste, elevada condutividade térmica, além de ser das ligas metálicas mais baratas que existem. Em decorrências dessas propriedades, o ferro fundido cinzento é amplamente empregado na indústria de máquinas e automobilística (CALLISTER, 2009).

No Brasil, a norma de referência para ferros fundidos cinzentos é ABNT NBR 6589/1986. Essa norma foi desenvolvida com o objetivo de, a partir do estabelecimento de padrões mínimos de qualidade, gerar reduções de custos e permitir escalas crescentes de produção (GUESSER, 2009).

A figura 3.14 apresenta aplicações típicas desse material.



Figura 3. 14 - Bloco de motor: exemplo de aplicação de ferro fundido cinzento.
Fonte: Site da empresa Tupy S.A

O material utilizado nos experimentos desta dissertação foi o ferro fundido cinzento, classe FC-250. Cada lote de material passou por testes laboratoriais para avaliar se suas propriedades se encontravam dentro da especificação seguindo a norma ABNT NBR 6589/1986.

3.4.2 Usinabilidade dos Ferros Fundidos Cinzentos

A usinabilidade é um conceito amplamente discutido na literatura. Sabe-se que ela depende de muitos fatores, relacionados à máquina, ferramenta, material e forma da peça, fluido de corte e parâmetros de processo. Nessa seção a usinabilidade será estudada do ponto de vista do material da peça.

O ferro fundido cinzento, de forma geral, possui elevada usinabilidade, sendo esse um dos motivadores de sua larga utilização.

Entre as características que favorecem a usinagem do ferro fundido cinzento, listam-se: sua baixa pressão de corte e potência consumida, que possibilita altas taxas de remoção de material, baixo desgaste de ferramenta, e cavacos curtos que favorecem automatização do processo.

O ferro fundido cinzento é, portanto, bastante interessante do ponto de vista de produtividade e custo em usinagem, além das vantagens relacionadas à sua aplicação já citadas na seção anterior.

Nos ferros fundidos cinzentos, tanto as propriedades mecânicas quanto a usinabilidade pode ter forte variação de acordo com a classe a que o material pertence. Dentro de uma mesma classe, inclusive, podem

ser esperadas variações significativas. Fatores relacionados à microestrutura, composição química e inclusões explicam esse comportamento.

Microestrutura e composição química

De forma geral, a microestrutura do ferro fundido cinzento pode ser descrita como grafitas na forma de veios, dispersas em matriz que pode ser ferrítica, perlítica ou mistura de ambas. Sendo assim, tanto variações da grafita como da matriz podem afetar a usinabilidade (MACHADO *et al.*, 2009; GUESSER, 2009).

No que tange à matriz, a primeira variação se refere à proporção entre ferrita e perlita. Em ferros fundidos de menor resistência mecânica, por consequência menor classe, existe predomínio da ferrita na estrutura. Uma matriz predominantemente ferrítica e pouca ou nenhuma perlita é a mais fácil de usinar com baixas forças, permitindo altas velocidades de corte e de avanço com desgaste de ferramenta em condições econômicas. Essa estrutura, em geral, possui dureza em torno de 150HB, além de estrutura macia e alta ductilidade, características da ferrita, o que pode levar à ocorrência de APC (aresta postiça de corte) se baixas velocidades de corte forem usadas. À medida que aumenta a resistência mecânica (classes maiores), aumenta também a quantidade de perlita na matriz.

A matriz perlítica tem características abrasivas nos processos de usinagem. Somado a isso, aumentando a quantidade de perlita, diminui-se a quantidade de grafita. Microestruturas contendo maiores porcentagens de perlita podem atingir até 280 HB a 300 HB, com alta resistência mecânica. Por consequência da menor quantidade de grafita e maior quantidade de perlita, quanto maior a classe do ferro fundido cinzento, menor sua usinabilidade (GUESSER, 2009; MACHADO; SILVA, 2004; MACHADO *et al.*, 2009)

Mills e Redford *apud* Dias (2011) criaram uma escala de usinabilidade para comparar o desgaste de ferramenta na usinagem de materiais com diferentes matrizes. Os autores atribuíram 20 como valor de referência para matriz ferrítica (menor desgaste). Em seus testes, a matriz composta de 50% perlita e 50% ferrita obteve valor de 10. Já as matrizes com perlita grossa e a perlita fina receberam os valores de 2 e 1 respectivamente, na mesma escala. Isso demonstra a necessidade de investigação da matriz, visto que a mesma possui forte influência nos resultados da usinagem.

Guesser (2009) ressalta que a quantidade de cementita na perlita da matriz modifica o comportamento abrasivo da perlita. Como é a cementita que dá o comportamento abrasivo da perlita, quanto sua quantidade aumenta, a perlita torna-se mais abrasiva, diminuindo a vida da ferramenta. Apesar de sua importância, esse parâmetro geralmente não faz parte dos controles da microestrutura dos ferros fundidos.

A estrutura lamelar da grafita colabora com a remoção de material. No ferro fundido cinzento, a estrutura básica semelhante a do aço é interrompida pelas lamelas de grafita, que durante o processo de usinagem levam a formação de cavacos cisalhados ou arrancados. Em decorrência disso a usinagem desse material sempre resulta em cavacos curtos, geralmente na forma de pequenos caracóis ou cavacos quebrados. A grafita possui ainda ação lubrificante, diminuindo o desgaste de ferramenta e potência de corte (SCHROETER; WEINGAERTNER, 2002; MACHADO *et al.*, 2009; MACHADO; SILVA, 2004).

As variações químicas são sentidas na usinabilidade dos ferros fundidos cinzentos principalmente pelas alterações de microestrutura que causam. Os elementos químicos presentes nos ferros fundidos podem ser divididos em dois tipos: elementos grafitizantes, que tendem a decompor a cementita em grafita, como o silício e estabilizadores de carbonetos, que retardam a formação da grafita, como o cromo.

Os efeitos benéficos da grafita variam com sua quantidade e como ela se apresenta dentro do material. Isso torna importante a investigação do tipo, forma e tamanho da grafita para entender resultados de testes de usinabilidade.

Inclusões

São bastante conhecidos os efeitos das inclusões de sulfeto de manganês (MnS) sobre a usinabilidade. Sua ação benéfica já foi estudada por Boehs (1979), que afirma que essas inclusões formam uma camada lubrificante, que protege a ferramenta e facilita o corte. Desde então, diversos estudos chegaram a conclusões similares, ressaltando os efeitos positivos dessas inclusões.

O foco nessa seção será dado no estudo das inclusões de MnS em ferros fundidos, quando empregadas ferramentas de corte de PCBN. A figura 3.15 apresenta um exemplo de inclusão de MnS.

Abele, Sahn e Schulz (2002), em seus estudos sobre usinabilidade de ferros fundidos com diferentes materiais de ferramenta e velocidades de corte, observaram um comportamento curioso na

usinagem do ferro fundido cinzento empregando ferramentas de PCBN: quando acima de 400m/min, à medida que se aumentava a velocidade de corte, a vida da ferramenta também aumentava, contrariando a teoria proposta por Taylor. Esse comportamento aparentemente anômalo pode ser explicado pela formação da camada protetora de MnS, cuja espessura tende a aumentar em velocidades de corte mais elevadas.

O estudo de Gastel *et al.* (2000) corrobora os resultados obtidos por Abele, Sahn e Schulz (2002). No referido estudo, os autores realizaram teste de usinagem em ferro fundido cinzento e vermicular, com diferentes velocidades de corte (10, 100, 400 e 800m/min) e emprego de ferramentas de PCBN. Foram utilizados insertos com 50 e 90% de grãos de CBN. Na usinagem de ferro fundido cinzento, a função protetora do MnS sobre a ferramenta se deu de duas formas: enriquecimento da superfície da ferramenta com partículas de MnS que ocorre a velocidades de corte moderadas (100 e 400 m/min) e formação de camada protetora pelo mesmo material que ocorre à altas velocidades de corte (800 m/min). A camada não se formou nas ferramentas de ferro fundido vermicular, devido às menores quantidades de enxofre e manganês desse material. A figura 3.16 mostra a camada de sulfeto de manganês formada sobre a ferramenta.

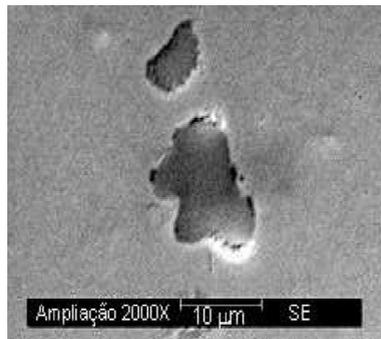


Figura 3. 15 - Inclusões de sulfeto de manganês na estrutura do ferro fundido cinzento FC-250 com 0,18% de enxofre.

FONTE: (PEREIRA, 2005).

Observa-se que variações de composição química e microestrutura têm forte impacto sobre a usinabilidade e propriedades mecânicas do ferro fundido cinzento. Isso aponta para a necessidade de investigação do material dos corpos de prova utilizado nos experimentos, visto que essas variações poderiam alterar os resultados

dos testes. Portanto, analisou-se a microestrutura e composição dos corpos de prova utilizados. Investigou-se: a) grafita: tipo, forma e tamanho; b) tipo de matriz do material; c) presença de inclusões de sulfeto de manganês, d) composição química e e) propriedades mecânicas.



Figura 3. 16 - Camada de sulfeto de manganês formada sobre ferramenta de PCBN. Velocidade de corte: 800 m/min. Inserto com 50% de grãos de CBN.
Fonte: Gastel *et al.* (2000)

Na seção seguinte será abordado quais foram os equipamentos e materiais empregados na pesquisa. Serão apresentados também os métodos de aquisição de dados e descrição dos procedimentos experimentais.

4 EQUIPAMENTOS, MATERIAIS E MÉTODOS

Nesse capítulo será descrita a estratégia de investigação adotada para atingir os objetivos do trabalho.

Serão apresentados os equipamentos, materiais e os métodos empregados.

4.1 EQUIPAMENTOS

A pesquisa foi realizada utilizando equipamentos da empresa parceira, além dos recursos do Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade do Estado de Santa Catarina.

a. Centro de usinagem: para realização dos testes práticos de usinagem foi utilizado centro de usinagem vertical da marca Mazak, modelo 530C (figura 4.1, esquerda). Esse equipamento possui as seguintes características:

- Cone de fixação ISO 40;
- Rotação máxima do eixo-árvore: 12000 rpm;
- Potência do eixo-árvore: 19 kW;
- Curso longitudinal (X): 1050 mm;
- Curso transversal (Y): 530 mm;
- Curso vertical (Z): 510 mm;
- Peso admissível na mesa: 1200kg

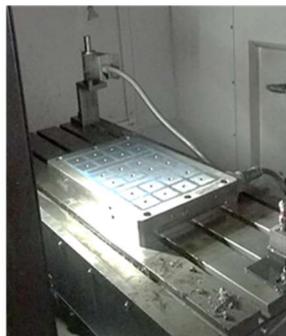


Figura 4. 1 – Centro de usinagem Mazak, modelo 530C (esquerda) e mesa com placa magnética Shunk (direita).

Dado que a máquina pode ser fonte de erros geométricos nas peças usinadas, foram estudadas as folgas do equipamento, além do batimento e pressão de fixação do cone do eixo-árvore. Nos resultados apresentados no Anexo B, conclui-se que o equipamento pode ser considerado adequado para os experimentos de furação.

b. Dispositivo de fixação da peça: a correta fixação da peça, em qualquer operação de usinagem, é um dos fatores primários de interesse para o processo. Bem como acontece com a ferramenta, a fixação inadequada da peça pode gerar erros de forma, posição e desvios dimensionais. Pode ainda ocasionar quebra da ferramenta. Portanto, compromete todo o resultado da usinagem. Sendo assim, o sistema de fixação escolhido deve apresentar a robustez necessária na fixação da peça. Optou-se pela fixação com mesa magnética, por ser um sistema robusto e possibilitar trocas rápidas dos corpos de prova. Nesse sistema, a face inferior da peça fica presa diretamente sobre a mesa. Garante-se que todos os seis graus de liberdade da peça estejam com sua movimentação restringida. Essa estratégia também evita que a peça flexione durante a usinagem devido às forças de corte. A placa utilizada é do fabricante Shunk, modelo magnos MFR (figura 4.1, direita).

c. Ajuste e *preset* da ferramenta: marca Zoller, modelo Venturio, utilizado para medição da ferramenta e batimento.

d. Máquina de ensaios mecânicos: a máquina utilizada para medição dos furos gerados nos testes é da marca Mitutoyo, modelo beyond 916.

e. Rugosímetro: para medição de rugosidade foi utilizado rugosímetro do fabricante Mahr, modelo perthometer M2. O estilete é de diamante, formato cônico e raio de ponta de 2 μm .

f. Máquina de ensaios mecânicos: a máquina utilizada para medição de resistência mecânica foi do tipo máquina universal de ensaios, da marca EMIC, com software Tesc de aquisição e tratamento de dados.

g. Durômetro: para análise de dureza Brinell do material dos corpos de prova, foi utilizado durômetro da marca Wolpert. O penetrador consiste em uma esfera de carbetto de tungstênio de 5 mm de diâmetro, com carga aplicada de 750 kgf (7,35 kN) .

h. Estereoscópio: marca Olympus, modelo SXZ7, com ampliação de até 56x. A aquisição da imagem é feita utilizando uma câmera CCD, acoplada ao estereoscópio, da marca Lumenera, modelo Infinity 1, com resolução de 2 megapixels. Foi utilizado para avaliação da ferramenta (desgaste, geometria).

i. Microscópio óptico: marca Olympus, modelo BX41M-Led, integrado a sistema de aquisição de imagem. O software para essa finalidade foi o *Image-Pro plus*, da empresa MediaCybernetics (figura 4.2). Foi utilizado para avaliação de micrografia do material.

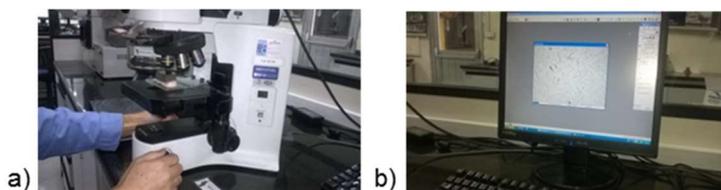


Figura 4. 2 - a) Microscópio óptico e b) sistema de aquisição de imagens metalográficas. Aumento máximo do conjunto: 1000x

j. Microscópio eletrônico de varredura (MEV): marca Jeol, modelo JSM 6701F. Foi utilizado para avaliação de composição do inserto de PCBN.

l. Espectrômetro de emissão ótica: fabricante ARL - Applied Research Laboratories, modelo ARL 3460 Metal Analyzer (FU-BL). Foi utilizado para avaliação de composição dos corpos de prova.

4.2 MATERIAIS

Nessa seção serão apresentados os materiais utilizados na pesquisa: brocas, corpos de prova e fluido de corte.

4.2.1 Corpos de Prova

A correta escolha dos corpos de prova é fundamental para validar qualquer experimento de usinagem. Deve-se escolher a geometria adequada aos testes, bem como o material que apresente relevância para estudo.

Os corpos de prova foram fundidos na empresa parceira da pesquisa, utilizando método de fundição em fornos cubilot e moldes em areia verde.

Sabe-se que dentro de uma mesma classe de ferro fundido é possível encontrar diferentes características de usinabilidade do material. Isso torna a caracterização dos corpos de prova fundamental para a credibilidade científica da pesquisa. A caracterização deu-se pela investigação das propriedades mecânicas, microestruturais e de composição química. A metodologia utilizada para essa finalidade está descrita na seção 4.3.13.

Mocellin (2002) escolheu os corpos de prova pela semelhança microestrutural e de propriedades mecânicas com o material utilizado na fabricação de blocos e cabeçotes de motores, facilidade e qualidade de fixação dos corpos de prova durante a usinagem.

Andrade (2005) cita outros fatores relevantes relacionados à geometria, como facilidade de fundição, rigidez e facilidade da fixação na máquina ferramenta.

Entendendo que os requisitos apresentados por ambos os pesquisadores são pertinentes à presente pesquisa, determinaram-se as características dos corpos de prova com base nas considerações reportadas.

Os corpos de prova utilizados foram maciços, fabricados de ferro fundido cinzento, classificação FC-250 de acordo com Norma ABNT NBR 6589/1986, devido à larga aplicação desse material em blocos e cabeçotes de motor. A geometria escolhida foi do tipo prismática de base retangular, medindo 400 x 250 x 40 mm, atendendo ao requisito de facilidade de fundição e fixação, além da rigidez da peça durante a usinagem.

4.2.2 Meio Lubrificarrefrigerante

Utilizou-se fluido de corte do tipo emulsionável semissintético, com 40% de óleo mineral na formulação do óleo concentrado. O fabricante é a companhia Quaker Chemical, e o nome comercial do produto é Quakercool 7040 BF TP.

A faixa de concentração de trabalho foi de 7 a 9% e a faixa de controle do pH é 8 a 10. O pH deve ser controlado por ser esse indicativo de qualidade do fluido de corte.

A aplicação do fluido deu-se por sistema de alta pressão através de refrigeração interna, com 40 bar de pressão de trabalho.

No apêndice E é apresentado o controle do fluido de corte nos dias de teste. Vê-se que nenhum resultado se encontra fora das faixas de especificação.

4.2.3 Brocas de PCBN utilizadas na pesquisa

As brocas utilizadas nos estudos possuem canal reto com corpo em metal-duro e inserto de PCBN brasado na ponta, de forma que os gumes cortantes sejam desse material. O emprego de PCBN para furação é algo bastante inovador, com poucos trabalhos publicados sobre o assunto. Foram utilizados dois tipos de insertos de PCBN: *full face* e integrais.

A fabricação das brocas seguiu os seguintes passos: 1) a partir de um corpo cilíndrico de metal-duro, foram fabricados os canais e as guias; 2) confecção de alojamento para o inserto de PCBN; 3) brasagem do inserto de PCBN no alojamento criado na operação anterior; 4) afiação da broca conferindo sua geometria de corte final. As etapas 1, 2 e 4 foram realizadas por meio de retificação. Na figura 4.3 apresenta uma broca obtida com essa sequência de fabricação.

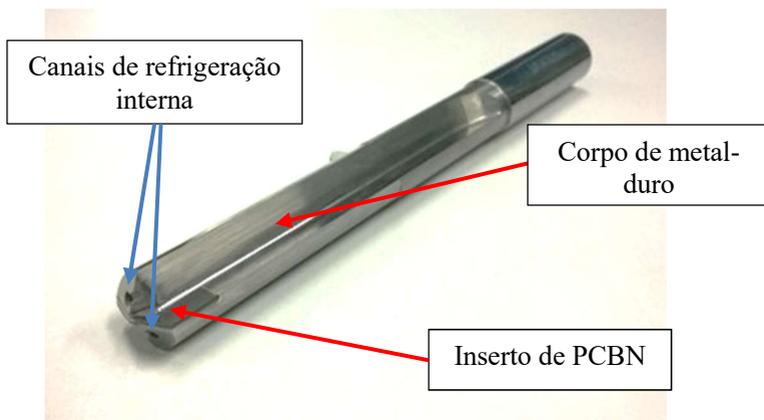


Figura 4. 3 - Broca de canal reto e inserto de PCBN integral.

Fonte: Autor

O primeiro grupo de testes realizados ocorreu com insertos de PCBN *full face*, e diâmetro de 12 mm. As brocas desse grupo de testes não apresentaram grandes dificuldades em sua fabricação. Os insertos de PCBN *full face*, juntamente com o inserto *tipped*, são as formas mais

comuns de aplicação de PCBN como ferramenta de corte em usinagem de geometria definida. Existe grande variedade de tamanhos e formas disponíveis comercialmente e não foi difícil encontrar um inserto apropriado para a fabricação da broca. Além disso, a brasagem do inserto *full face* é realizada utilizando a face de metal-duro do inserto sobre o corpo da ferramenta, que também é de metal-duro. A brasagem entre materiais semelhantes possui, em geral, menor dificuldade da brasagem entre materiais distintos.

Brocas com inserto de PCBN *full face* já foram testadas por Brandt (2014). A classe de metal-duro para o corpo das brocas, classe de inserto de PCBN e afiação foram as mesmas utilizadas pelo referido autor. A empresa Hanna Tools fabricou as brocas com inserts de PCBN classe BZN 6000, fornecidos pela empresa Sandvik Coromant (tabela 4.1).

Tabela 4. 1 - Classes de PCBN dos inserts *full face*.

Classe	Características	CBN	Aplicações
BZN 6000	Elevada resistência à abrasão; Excelente qualidade do gume Superfícies usinadas de alta qualidade	aproximada mente 90%	Corte interrompido Feros fundidos perlíticos

Fonte: Sandvik Coromant

O segundo grupo de testes ocorreu com brocas com inserto de PCBN sólido, e diâmetro de 11,9 mm. Esse conceito de broca apresentou uma série de desafios em sua fabricação.

Segundo Tönshoff, König e Neises (1994), uma das limitações técnicas para o conceito de brocas com ponta de PCBN refere-se à brasagem do inserto ao corpo da broca, pois devido às solicitações mecânicas e térmicas, a zona de união entre os materiais acaba sendo sobrecarregada.

A brasagem de PCBN em metal-duro é um processo delicado. O material de adição precisa ter afinidade química entre os dois elementos a serem brasados. Além disso, a brasagem de materiais distintos pode ocasionar aparecimento de tensões de origem térmica e deterioração dos materiais devido ao aquecimento (SECHI; TSUMURA; NAKATA, 2012).

Mesmo recorrendo aos grandes fabricantes mundiais de ferramentas, encontrar uma empresa com tecnologia para fazer a

brasagem foi um desafio. Algumas empresas que tinham capacidade técnica se recusaram a produzi-las, alegando inviabilidade econômica.

Outro desafio encontrado na fabricação das brocas foi encontrar inserto de PCBN integral com as dimensões necessárias. No total, foram dez meses de pesquisa junto a fornecedores nacionais e estrangeiros para conseguir uma empresa com inserto e tecnologia de brasagem disposta a fabricar as brocas. Por fim, através meio de negociações efetuadas pela empresa parceira, a empresa alemã Mapal aceitou a fabricação das brocas de PCBN integral.

Nas brocas com insertos de PCBN integral variou-se a classe do material, com o objetivo de entender principalmente as consequências da variação de tenacidade. Na tabela 4.2 encontram-se informações fornecidas pela Mapal, fabricante das brocas, sobre os insertos utilizados. A primeira classe, FU720, possui alto teor de PCBN e por consequência maior tenacidade, enquanto que a segunda, FU820, possui maior dureza.

Tabela 4. 2 - Classes de PCBN dos insertos integrais

Classe	CBN [%]	Tamanho do Grão [μm]	Ligante	Observações
FU720	> 85	< 6 μm	Cerâmico	Alto teor de CBN. Indicado para ferro fundido para elevadas velocidades de corte (até 2500m/min)
FU820	Entre 50 e 70	< 3 μm	Cerâmico	Baixo teor de CBN

Fonte: Fabricante de ferramentas Mapal. As informações foram enviadas por e-mail

4.3 MÉTODOS UTILIZADOS

Para avaliar o desempenho e viabilidade das concepções das brocas propostas foram adotados testes de furação. Foram usinados furos com 12 mm de diâmetro, com 36 mm de profundidade. Mais detalhes da furação podem ser vistos na figura 4.4.

O primeiro teste ocorreu com brocas de inserto de PCBN *full face*, conceito de broca análogo ao pesquisado por Brandt (2014). Esse teste visou aprofundar os resultados obtidos pelo referido autor, visto que a broca com maior vida não foi submetida à réplica para avaliação de repetibilidade.

Na segunda etapa, foram testadas as brocas com inserto de PCBN integral. Esse conceito de broca foi proposto pelo presente trabalho, visando solucionar problemas de quebra prematura apresentadas pelas brocas com conceito utilizado por Brandt (2014).

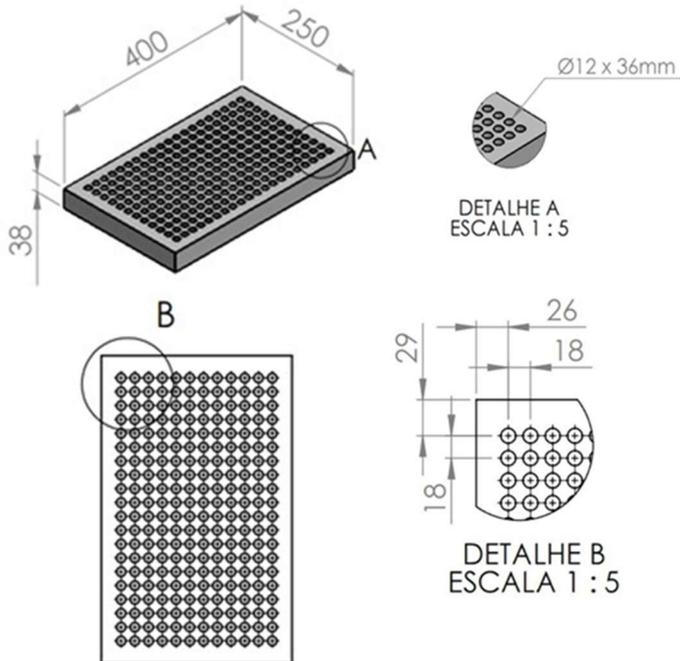


Figura 4. 4 - Detalhes do corpo de prova usinado nos testes de furação.

Para análise de viabilidade econômica, foi realizado um terceiro teste, com broca de metal-duro comercialmente aplicada para furação em ferro fundido cinzento. Os dados de vida de ferramenta, custo e qualidade do furo desse teste serviram de comparativo para os testes com inserts de PCBN.

Em todos os testes, os resultados obtidos (desgaste, erros geométricos, etc.) serão apresentados em função de “metros de comprimento de furação”. Essa grandeza refere-se à soma do comprimento de cada um dos furos usinados pelas brocas. Assim, por exemplo, 30 furos de 30 mm de profundidade cada, representam 0,9 metros de comprimento de furação.

Abaixo serão apresentadas com profundidade as estratégias de aquisição de dados e detalhados os testes de usinagem.

4.3.1 Estratégias de aquisição de dados

Alguns métodos de aquisição de dados possuem normas específicas, como é o caso da medição de dureza e resistência à tração. Outros devem ser desenvolvidos de acordo com a necessidade. Foram desenvolvidas estratégias específicas para avaliação dos danos às brocas, avaliação geométrica dos furos gerados e caracterização dos corpos de prova, voltadas para a finalidade dos experimentos.

4.3.1.1 Avaliação de danos às brocas

O acompanhamento das brocas durante os experimentos foi dividido em três momentos, que ocorreram com finalidades distintas, a saber: medição das brocas nova, medição do desgaste e avaliação da quebra.

A medição das brocas novas teve por finalidade registrar a geometria da ferramenta antes do teste, além de avaliar se não existia alguma avaria. Com auxílio de estereoscópio, foram feitas aquisição dos seguintes dados:

- Ângulo de ponta;
- Ângulos de incidência;
- Ângulo do gume transversal;
- Integridade dos gumes de cortes e guias: presença de trincas, lascamentos, raios de arredondamento, chanfros.

A medição do desgaste ocorreu durante os testes de usinagem, em frequência estipulada para cada tipo de teste. Com auxílio de estereoscópio, efetuou-se a medição de desgaste dos flancos, desgaste das guias, desgaste das quinas e gume transversal. Também se procurou identificar presença de outras avarias.

O acompanhamento do desgaste utilizou como parâmetro o desgaste nos flancos principais e gume transversal.

4.3.1.2 Avaliação geométrica dos furos

A avaliação geométrica dos furos gerados foi feita partir dos seguintes parâmetros:

- a) Erros de forma (cilindricidade), orientação (perpendicularidade) e localização (posição);

- b) Erro de medida: diâmetro do furo;
- c) Rugosidade.

Os três primeiros erros geométricos listados foram medidos por máquina de medir por coordenada. Esse equipamento mede a partir de referências, geradas a partir de apalpamento de pontos estrategicamente escolhidos dentro da peça. É fundamental, portanto, que se escolham pontos apropriados para apalpar a peça, tanto para criar referência como para realizar a medição. A seguir a estratégia de medição adotada:

- i) Apalpamento de três pontos na face superior do corpo de prova, onde foram usinados os furos, criando um plano de referência;
- ii) Apalpamento do primeiro e último furo da primeira linha, criando uma linha de referência no plano anteriormente gerado. O primeiro furo apalpado foi considerado a origem do sistema de coordenada. Dessa forma tem-se referência e ponto zero em todos os 6 graus de liberdade;
- iii) Medição de um furo por linha de furação: em cada um dos furos foram feitas três medições de diâmetro nas profundidades de 2, 22 e 32 mm em relação à superfície de referência. O diâmetro da esfera é 4 mm, com 1500 pontos de medição e filtro do tipo Gauss 50 OPR;
- iv) Da medição é possível obter os seguintes parâmetros nos furos: erro de posição, cilíndricidade, diâmetro e perpendicularidade.

Para medição de rugosidade dos furos, criou-se o procedimento descrito abaixo:

- i) Separação das amostras para análise de acordo com a frequência estabelecida em cada teste;
- ii) Medição dos parâmetros R_a e R_z , com auxílio de rugosímetro, na primeira e na última linha de furação, 4 furos em cada linha: primeiro e último furo, e outros dois equidistantes a esses;
- iii) Valor admitido à rugosidade do corpo de prova será a média aritmética dos quatro valores medidos;

Os parâmetros utilizados para medição da rugosidade foram: valores de *cutoff* $\lambda_c = 0,8$ mm, comprimento de medição $l_m = 4,00$ mm e percurso total de apalpamento $l_t = 5,6$ mm. Os valores estão de acordo com a norma ISO 4288:1996.

4.3.1.3 Caracterização dos corpos de prova

A seguir tem-se a descrição da metodologia utilizada na investigação das propriedades mecânicas, da microestrutura e da composição química dos corpos de prova.

É comum materiais fundidos apresentarem variações de propriedades quando oriundos de diferentes bateladas de material produzido. Isso motivou a decisão de fazer caracterização em cada lote de corpos de prova.

Propriedades mecânicas

Para o acompanhamento das propriedades mecânicas, foram feitos testes de tração e dureza, em uma amostra selecionada aleatoriamente.

O teste de tração foi utilizado para o controle de qualidade do material, já que a maioria das especificações de materiais inclui itens como resistência à tração (GUESSER, 2009). Os ensaios mecânicos ocorreram conforme ABNT NBR 6589/1986. Essa norma estipula o limite de tração do ferro fundido FC-250 de 250 a 350 Mpa.

O ensaio de dureza realizado nos ferros fundidos é o ensaio Brinell de dureza. Essa grandeza foi medida no núcleo e na superfície, com especificações de dureza de 207 a 241 e 207 a 255, respectivamente, também de acordo com a ABNT NBR 6589/1986. Ainda para controle de qualidade dos materiais, foram separadas aleatoriamente três placas para medição de dureza durante os testes de usinagem. Foi utilizada esfera de 5 mm e carga de 750 kgf.

Composição Química

A análise de composição química foi feita por espectrometria de emissão ótica. Os elementos de interesse para análise do ferro fundido cinzento são: manganês, silício, enxofre, fósforo, cromo, titânio, cobre, estanho, níquel e carbono.

Análise da microestrutura

A investigação da microestrutura deu-se por análise metalográfica. Escolheu-se uma região de interesse do material, visto que a microestrutura pode variar substancialmente dentro da mesma peça. Foi feito o seccionamento, lixamento, seguido de polimento, ataque químico para posterior análise em microscópio.

Foi retirada uma amostra do núcleo dos corpos de prova para análise de microestrutura. Os seguintes pontos foram avaliados:

- a) Forma, tipo, tamanho da grafita, conforme a ISO-945-1, 2008;
- b) Tipo de matriz;
- c) Presença de inclusões de sulfeto de manganês.

4.3.2 Experimentos de usinagem

Os testes de usinagem, apesar de utilizarem brocas e parâmetros de corte distintos, seguiram a mesma metodologia básica.

Os corpos de prova foram fixados sobre a placa magnética, fresados em ambos os lados, as brocas devidamente preparadas e fixadas no cone do eixo árvore da máquina, para somente então serem realizadas as furações. Abaixo mais detalhes de cada uma das etapas.

Como critério de fim de vida, foram escolhidos:

- a) Desgaste de flanco;
- b) Colapso total, isto é, quebra da broca;
- c) A broca apresentar avarias graves, tais como lascamento com grande remoção de material e perda de inserto;
- d) Algum dos erros geométricos medidos nos corpos de prova (cilindricidade, erro de posição, diâmetro ou perpendicularidade com variações acima de 0,2mm).

Fixação dos corpos de prova

A primeira etapa para a correta fixação dos corpos de prova sobre a mesa magnética é o fresamento do lado oposto à furação (figura 4.5), com remoção de 1,5 mm de material para limpeza da primeira face bruta. Caso fosse fixada a peça com lado bruto diretamente sobre a mesa, as irregularidades da superfície poderiam ocasionar movimentação da peça durante a usinagem, comprometendo os resultados do teste.

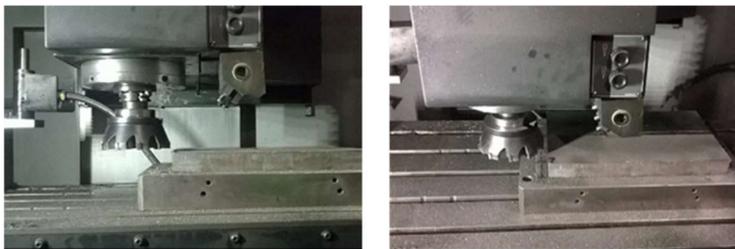


Figura 4. 5 - Faceamento da superfície bruta de fundição.

Após o fresamento do primeiro lado, a placa foi virada e teve sua segunda face usinada, com remoção de 2,5 mm de material, para limpar a superfície bruta de fundição. Foi necessário efetuar a remoção da primeira camada da superfície bruta, pois ela é irregular geometricamente e possui areia de fundição e outros elementos abrasivos, que poderiam comprometer a vida da broca e qualidade do furo.

Para fazer a usinagem das faces foi utilizada uma fresa de faceamento com insertos de cerâmica, diâmetro de 125 mm, velocidade de corte de 300 m/min e avanço de 0,1 mm.

Preparação da ferramenta

O primeiro passo, depois da chegada das brocas, é submetê-la à análise no estereoscópio, a fim de analisar os ângulos e a integridade das brocas novas. No apêndice B são apresentadas algumas dessas análises.

Após essa etapa, as brocas foram montadas em mandril hidráulico (figura 4.6), e então levadas ao equipamento Zoller, onde era feito o *preset* da ferramenta, medição de diâmetro e análise de batimento. As brocas somente seguem para o centro de usinagem se o batimento fosse menor que 0,02 mm.



Figura 4. 6 - Broca montada no cone hidráulico

As brocas foram montadas na máquina, onde o batimento era conferido com o auxílio de um relógio comparador com divisão milesimal. A verificação do batimento foi realizada sobre as guias no meio das brocas, e perto do gume, com máximo permitido era de 0,02 mm (figura 4.7).

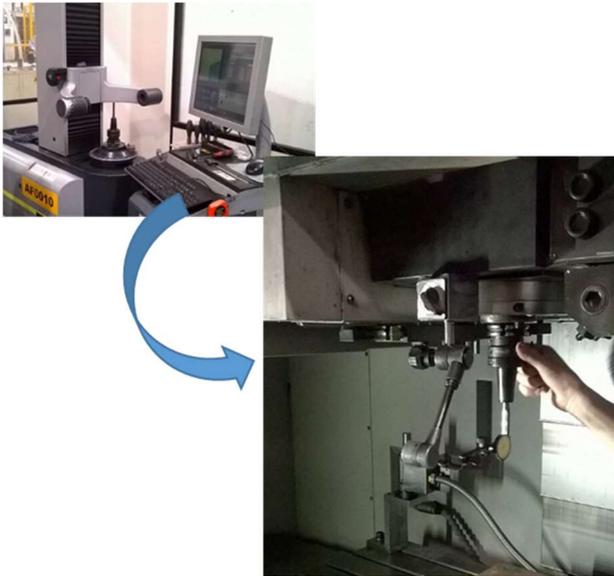


Figura 4. 7 - Equipamento de *preset* (esquerda) e conferência de batimento na máquina, com cone montado no eixo-árvore (direita).

4.3.2.1 Testes de furação com PCBN *full face*

Neste grupo de teste foi empregado o mesmo conceito de broca utilizado por Brandt (2014). Como o trabalho referido testou a broca com melhor resultado apenas uma vez, nesta pesquisa foi realizada a réplica desses testes com o objetivo avaliar a repetibilidade dos resultados obtidos no emprego dessa broca. Além disso, para o melhor entendimento da aplicação do conceito de broca proposto por Brandt (2014), foram feitos testes nos parâmetros de corte diferentes dos utilizados por esse autor ($v_c = 300$ m/min e $f = 0,1$ mm). Optou-se por testar a broca também com 450 m/min, visto que de acordo com a literatura consultada é indicado que o PCBN trabalhe com velocidades de corte superiores a 400 m/min. Já o segundo parâmetro de avanço foi f

= 0,13 mm, pois assim tem-se aumento da quantidade de material removido por unidade de tempo, além da possibilidade de diminuir o desgaste por abrasão. Os dados de corte utilizados estão na tabela 4.3.

Tabela 4. 3- Dados de corte dos testes de usinagem com insertos de PCBN *full face*

	300 [m/min]	450 [m/min]
0,1 [mm]	Teste A	Teste B
0,13 [mm]	Teste C	Teste D

Foi realizada réplica do teste que apresenta maior vida de ferramenta.

Nas primeiras medições, a retirada da ferramenta para avaliação ocorreu a cada 20 furos. Foi medido o desgaste de flanco nos gumes principais, desgaste de guia, desgaste do gume transversal. A frequência de medição a cada 20 furos se manteve até ser observada tendência de estabilização do desgaste, ou aumento constante (linear) ao longo da utilização da broca, denominado de estágio II de desgaste, segundo Machado *et al.* (2009). Nesse momento as medições passaram a ocorrer a cada 40 furos. A frequência de medição foi aumentada cada vez que se observava estabilização ou aumento linear do desgaste.

Todas as peças passaram por análise de rugosidade e dimensional, conforme metodologia descrita na seção 4.3.1.

A afiação empregada foi a mesma que Brandt (2014) utilizou em seus testes finais. Os ângulos da afiação são apresentados na tabela 4.4.

Tabela 4. 4 - Ângulos da broca de insertos de PCBN *full face* nova

Característica	Valor medido
Ângulo de incidência	10°
Ângulo do gume transversal	70°
Ângulo de ponta	140 °

O gume transversal é apresentado na figura 4.8, gerada pelo programa da afiadora CNC empregada na afiação das brocas. Nessa se pode notar o alívio de gume transversal

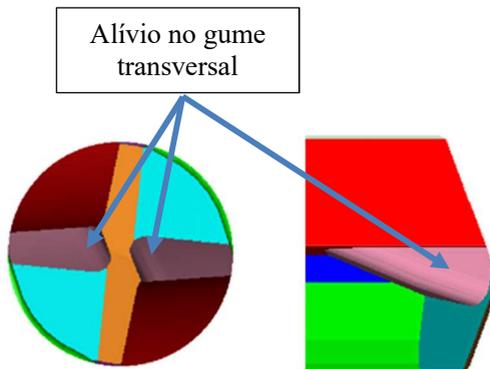


Figura 4. 8 - Afiação do gume transversal: vista de topo (esquerda) e vista lateral (direita)

Mais detalhes da afiação da broca estão presentes no Anexo C.

4.3.2.2 Testes de furação com PCBN integral

Diversas variáveis de ferramenta e processo influenciam no desempenho da furação, tais como: classe da ferramenta de corte, ângulos de ponta da broca, velocidade de corte, avanço, etc. No presente trabalho o número de variáveis foi limitado em quatro. Caso se optasse por estudar o impacto de cada variável individualmente, depois todas as combinações possíveis de variáveis, o número de experimentos seria demasiado grande.

Por esse motivo se utilizou DOE (*Design of Experiment*), traduzido como Planejamento de Experimento. Nesse tipo de abordagem, cada variável é tratada como um fator e os valores que o fator pode assumir são chamados de níveis. Segundo Montgomery e Runger (2003), quando vários fatores são de interesse em um fenômeno, o planejamento fatorial de experimento deve ser utilizado. A mesma fonte esclarece que por experimento fatorial se quer dizer que para cada prova ou réplica do experimento, todas as possíveis combinações de níveis dos fatores são investigadas.

Segundo Duckworth (1968), o planejamento fatorial de experimento pode render muito mais informações que o planejamento clássico, com uma quantidade substancialmente menor de experimentos.

Neste trabalho foi escolhida a estratégia de experimento “*One-Half Fraction of the 2^k Design*”, ou experimento Fatorial 2^k fracionário,

no qual cada fator é testado em dois níveis, e somente levado em consideração a parte superior da matriz de combinação de fatores. Sendo k o número de fatores, tem-se nesse tipo de planejamento 2^{k-1} experimentos. (MONTGOMERY; RUNGER; 2003).

Foram escolhidas três variáveis (fatores) de interesse para o estudo: velocidade de corte, tipo de PCBN utilizado e afiação. Assumindo a estratégia de 2^{k-1} , tem-se 2^{3-1} experimentos, ou seja, quatro.

Na montagem da matriz de experimentos, ao nível superior de cada fator/variável é atribuído o sinal “+” e o nível inferior “-”. Na figura 4.9 apresenta-se um exemplo de montagem de *DOE* com quatro fatores.

<i>A</i>	<i>B</i>	<i>C</i>	<i>D = ABC</i>	Treatment Combination
-	-	-	-	(1)
+	-	-	+	<i>ad</i>
-	+	-	+	<i>bd</i>
+	+	-	-	<i>ab</i>
-	-	+	+	<i>cd</i>
+	-	+	-	<i>ac</i>
-	+	+	-	<i>bc</i>
+	+	+	+	<i>abcd</i>

Figura 4.9 - Exemplo de Experimento Fatorial Fracionado com 4 fatores.
Fonte: (MONTGOMERY; RUNGER; 2003).

Os valores que cada variável assumiu para os testes estão apresentados na tabela 4.5:

Tabela 4.5 - Variáveis utilizadas no pré-teste

Nível	Afiação	vc [m/min]	PCBN
-	Mapal	300	FU720
+	Brandt	450	FU820

Foram utilizadas duas afiações nas brocas dos testes. A afiação “mapal” refere-se à sugerida pela empresa que confeccionou das brocas. A afiação “Brandt” foi a empregada nos experimentos de Brandt (2014)

que obteve os melhores resultados para brocas de PCBN. Na tabela 4.6 os ângulos principais de cada uma das duas afiações:

Tabela 4. 6 – Ângulos de afiação das brocas novas

Característica	Afiação Brandt	Afiação Mapal
Ângulo de incidência	10°	12°
Ângulo do gume transversal	70°	60°
Ângulo de ponta	140°	144°

A outra variável do DOE é a classe do PCBN. O inserto da classe FU720 possui maior tenacidade, ao passo que o inserto da classe FU820 apresenta maior dureza, segundo o fabricante.

As variáveis e níveis foram arranjados conforme estratégia “*One-Half Fraction of the 2k Design*”. A tabela 4.7 apresenta valores utilizados para cada uma das provas:

Tabela 4. 7 - DOE - Planejamento de experimentos

Prova	Afiação	vc [m/min]	Material do inserto
1	Brandt	450	FU720
2	Brandt	300	FU820
3	Mapal	450	FU820
4	Mapal	300	FU720

A frequência de medição de desgaste e avaliação das brocas, no início do teste, foi a cada 20 furos gerados. Da mesma forma que no experimento com brocas com insertos *full face*, sempre que foi percebida estabilidade no desgaste, foi diminuída a frequência de medição das brocas.

Todas as peças usinadas passaram por análise de rugosidade e dimensional, com metodologia descrita na seção 4.3.1.

4.3.2.3 Teste de furação com broca de metal-duro

Em paralelo com o teste de furação com broca de PCBN, foi realizado teste com broca de metal-duro. Esse teste serviu de

comparativo para os resultados obtidos em brocas de PCBN, pois em produção em série o metal-duro é o material de ferramenta mais utilizado para furação em ferros fundidos cinzentos. O comparativo permitiu avaliar se os conceitos de brocas de PCBN testados possuem potencial de aplicação industrial. Nos testes com metal-duro os parâmetros de corte foram escolhidos dentro da faixa de trabalho indicada para esse material, retirados de catálogo de fornecedor, e que permitisse mesma taxa de remoção de material que as brocas de PCBN. Os dados de corte de referência para as brocas com insertos de PCBN foram $v_c = 300$ m/min e $f = 0,1$ mm, condição de corte testada no presente trabalho e sugeridas por Brandt (2014), e os parâmetros para o metal-duro foram $v_c = 100$ m/min e $f = 0,3$ mm. Dessa forma, compararam-se os materiais em condições de produtividade semelhantes. Todas as demais condições do teste foram idênticas, tanto ao que concerne à preparação do equipamento, quanto aquisição de dados de desgaste de ferramenta e qualidade do furo.

A broca de metal-duro utilizada possui as seguintes características: ângulo de hélice de 22° , ângulo de incidência de 10° , ângulo do gume transversal de 70° , e recoberta pela empresa Plaitit (cobertura do tipo TiXCo).

4.3.2.4 Testes complementares de furação

A broca e os parâmetros desse grupo de testes foram decididos após a realização testes dos descritos anteriormente.

Nos testes de usinagem com brocas de insertos de PCBN sólido, nos quais todos os gumes são de PCBN, ficou evidente que a ponta (gume transversal e proximidades) é a região de maior preocupação, pois apresentou lascamento e quebra em todas as condições testadas. Para tentar contornar esse problema, foi proposta uma broca com duas regiões de corte distintas: uma ponta de metal-duro ao centro e uma região externa com insertos de PCBN, defasados entre si em 90° (figura 4.10). Denominou-se esse conceito de ferramenta de “broca dupla”. A broca testada possuía 13,45 mm de diâmetro, com 150° de ângulo de ponta na parte de PCBN. O diâmetro da parte de metal-duro era de 7,5 mm e 140° de ângulo de ponta. O avanço utilizado foi $f = 0,1$ mm e as velocidades de corte foram 300, 250 e 160 m/min.

O segundo teste complementar consistiu na tentativa de fazer a furação com PCBN integral sem fluidos de corte. O teste foi motivado pelo referencial teórico, que indicava que a camada protetora de MnS se forma a altas temperaturas. O fluido de corte poderia estar impedido a

formação dessa camada, devido a sua propriedade refrigerante. O teste foi realizado com a mesma broca e parâmetros de corte que obtiveram o melhor resultado do grupo de testes com PCBN integral.

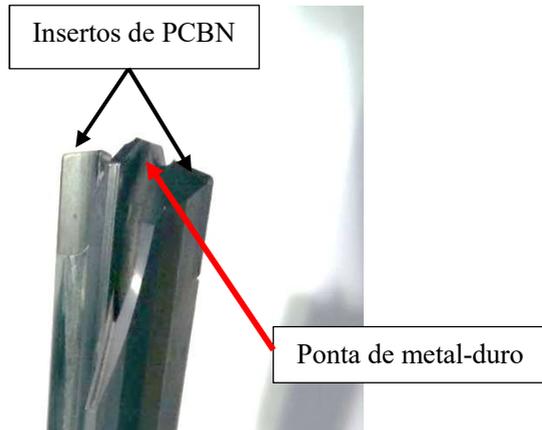


Figura 4. 10 - Broca com diâmetro menor em metal-duro e diâmetro maior em PCBN – “broca dupla”.

Foram detalhados nesta seção os equipamentos, materiais e métodos empregados na pesquisa. Na seção a seguir são apresentados os resultados obtidos na parte experimental do trabalho.

5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

5.1 CARACTERIZAÇÃO DOS CORPOS DE PROVA

Os corpos de prova foram fundidos em uma única batelada. A temperatura durante o vazamento variou entre 1408 e 1413°C. O tempo de resfriamento foi de duas horas.

A seguir os resultados dos testes feitos para caracterização do material dos corpos de prova.

Propriedades Mecânicas

Para investigação das propriedades mecânicas foi escolhido um corpo de prova aleatoriamente no lote de peças fundidas

Segundo a norma ABNT NBR 6589/1986, a resistência à tração do ferro fundido cinzento FC250 deve estar entre 250 e 350 MPa. Na tabela 5.1 a resistência à tração do corpo de prova investigado foi de 269 MPa, o que atende à especificação do material.

Tabela 5. 1 - Propriedades mecânicas do material dos corpos de prova

Dureza [HB]		Resistência à tração [MPa]
Núcleo	Superfície	
201	212	269

A mesma norma faz recomendações sobre a faixa de dureza, baseada no limite de resistência do material. Para resistência à tração de 269 MPa, a faixa de dureza aceitável está aproximadamente entre 190 e 290 HB. As durezas, tanto a medida no núcleo da peça quanto na superfície estão conforme a especificação, sendo que os valores obtidos foram, respectivamente, 201 e 212 HB.

Foram ainda realizados testes de dureza em 3 corpos de prova usinados, para avaliar eventual variação de qualidade. Nos resultados a seguir (tabela 5.2) observa-se que os valores de dureza variaram pouco e dentro da especificação dando indicativo de homogeneidade do material dos corpos de prova.

Tabela 5. 2 – Dureza dos corpos de prova selecionados durante os testes para controle de qualidade.

	Dureza [Mpa]				
	Valores medidos			Média	Desv. Pad.
Placa 1	211	211	211	211	0
Placa 2	211	211	211	211	0
Placa 3	226	217	220	221	3,7

Composição Química

Durante o preparo da liga foi retirada uma pequena quantidade de metal líquido para controle de composição química por espectrometria de emissão ótica.

Na tabela 5.3 tem-se o resultado da análise para os principais elementos constituintes do ferro fundido cinzento. Os demais elementos analisados encontram-se no Aapêndice A.

Tabela 5. 3 - Composição química da amostra, em percentual de massa. Desvio padrão calculado baseado em 3 amostras.

	C [%]	Si [%]	Mn [%]	P [%]	S [%]
Média	3,42	2,11	0,61	0,04	0,12
Desvio Padrão	0,02	0,01	0,00	0,00	0,00

Comparando a tabela 5.3, que possui o resultado encontrado na análise, com as faixas de concentração química de controle para os ferros fundidos cinzentos utilizada pela empresa parceira da pesquisa, conclui-se que o material está conforme especificações para classe FC-250.

Análise da microestrutura

Após preparação da amostra, o primeiro passo foi a investigação da grafita. A micrografia de diferentes pontos da amostra mostrou similaridade entre as grafitas, indicando homogeneidade do material (figura 5.1). As grafitas foram classificadas, de acordo com a norma ISO-945-1, 2008, como sendo da forma I, tipo A e tamanho de 4-3.



Figura 5. 1- Micrografia de diferentes pontos amostra para classificação da grafita. Ampliação: 100x.

Na análise com maior ampliação (500x), investigou-se a presença de inclusões de sulfeto de manganês, conforme figura 5.2, onde estão destacadas em vermelho as inclusões de sulfeto de manganês. Além daquelas em destaque, veem-se outras menores, bem distribuídas na matriz. A figura 5.3 apresenta micrografias complementares, com maior ampliação em outros pontos do material. Toda extensão da amostra analisada apresentava quantidades bem distribuídas de inclusões.

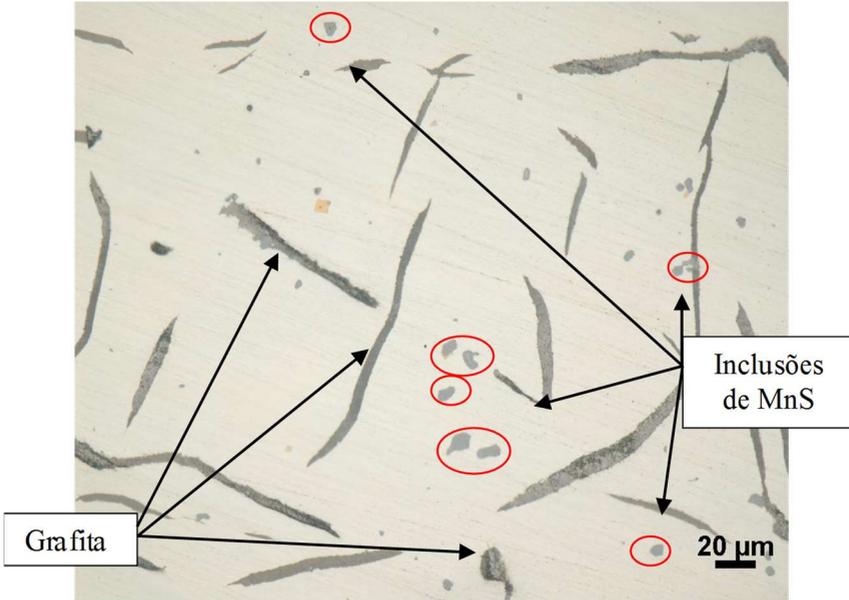


Figura 5. 2 - Inclusões de sulfeto de manganês e grafitas. Ampliação: 500x

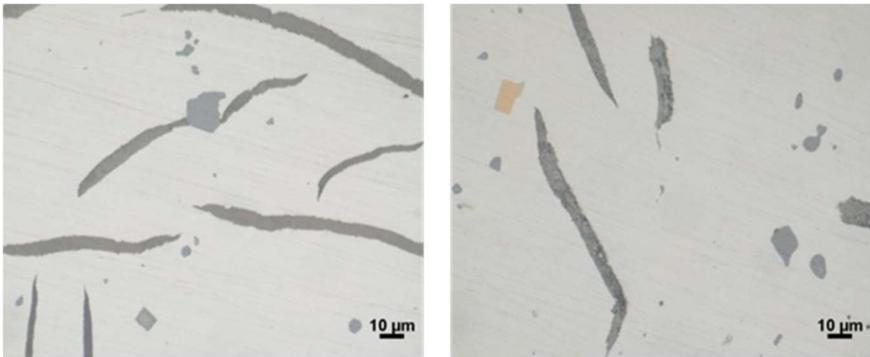


Figura 5. 3 - Inclusões de sulfeto de manganês. Ampliação: 1000x

Após análise da grafita e inclusões, a amostra foi submetida a ataque químico com Nital à concentração de 3%.

Com isso foi possível avaliar a matriz da amostra. Vê-se na figura 5.4 que a matriz é 100% perlítica.

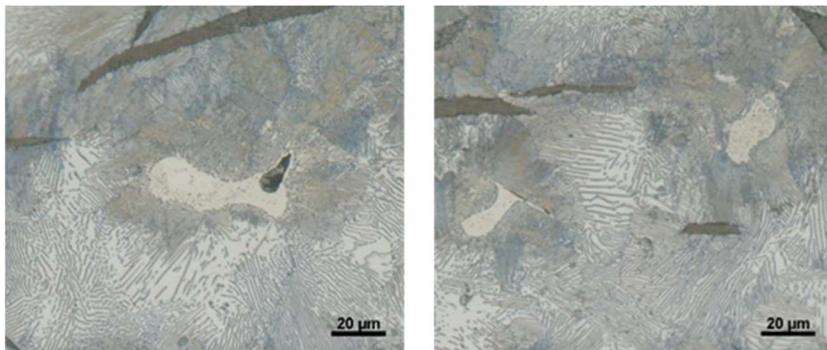


Figura 5. 4 - Matriz da amostra: 100% perlítica. Ampliação: 500x

Sobre a microestrutura, pode-se afirmar que o ferro fundido é do tipo cinzento pela forma da lamela da grafita (forma I), tipo A e tamanho de 4-3, com presença de inclusões de sulfeto de manganês e matriz perlítica.

Conclui-se, dos resultados encontrados na investigação do material dos corpos de prova, que o material possui a resistência à tração, dureza, composição química e microestrutura recomendadas para ferros fundidos cinzentos FC-250, atendendo assim aos requisitos para realização da presente pesquisa. A seguir, serão apresentados os resultados dos testes práticos de furação.

5.2 TESTES DE FURAÇÃO COM PCBN *FULL FACE*

Nessa seção serão apresentados os resultados realizados com as brocas com inserto *full face*, o mesmo tipo de inserto utilizado por Brandt (2014). Os parâmetros de corte dos testes estão apresentados na tabela 4.3.

Antes do início dos testes, a broca foi submetida à análise em estereoscópio. A broca não apresentou avarias e, portanto, está apta para os testes. Os ângulos encontrados na medição foram: ângulo de incidência: 10°; ângulo do gume transversal: 70° e ângulo de ponta: 140°.

Teste A

O teste A ocorreu com velocidade de corte $v_c = 300$ e avanço $f = 0,1$ mm.

A evolução do desgaste de flanco está apresentada na figura 5.5. A tabela 5.4 apresenta o acompanhamento da broca para cada medição.

A tabela 5.4 cita o desgaste de flanco no gume transversal composto por metal-duro (1º gume, na figura 5.5) como o mais significativo durante o teste, enquanto a parte do gume transversal composto de PCBN não apresentou desgaste mensurável durante todo o teste (2º gume, mesma figura). O desgaste de flanco nos gumes principais de PCBN apresentaram valores bastante baixos, não ultrapassando 0,08 mm. Essas características de desgaste foram similares às observadas por Brandt (2014).

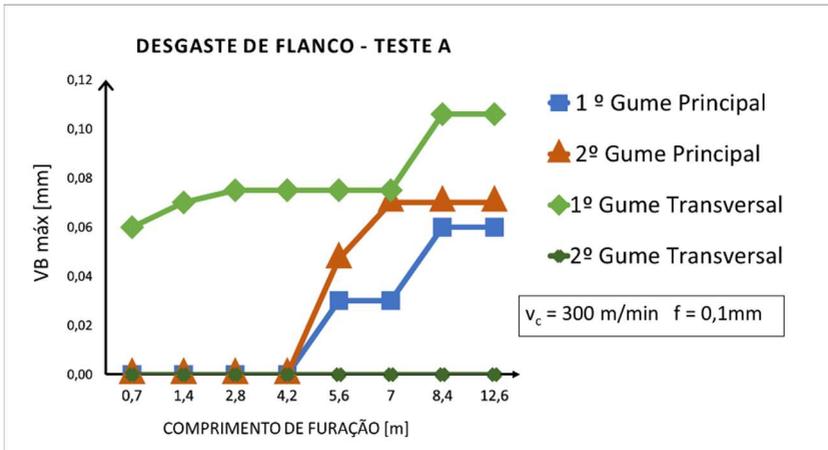


Figura 5.5 - Evolução do desgaste de flanco. Teste A.

Na tabela de acompanhamento 5.4, observa-se que não houve nenhum evento relevante durante a usinagem, além dos desgastes mensurados na figura 5.5.

Tabela 5. 4 – Acompanhamento da broca. Teste A.

Quantidade de furos	Metros de furação [m]	Comentários
Primeira placa		
20	0,7	1) Gumes principais sem desgaste aparente; 2) Gume transversal, parte de metal duro, apresentou desgaste acentuado; 3) Sem desgaste de quina ou de guia;
40	1,4	4) Sem alterações em relação à medição anterior ;
80	2,8	5) Toda região do gume transversal, formada por metal duro, apresentou forte desgaste; 6) A região do gume transversal formada por PCBN não apresentou desgaste mensurável; 7) Gumes principais sem desgaste significativo;
120	4,2	8) Condições de desgaste inalteradas em relação à medição anterior;
160	5,6	9) Pequeno desgaste nos gumes principais; 10) Aprofundamento do desgaste abrasivo no gume transversal de metal duro;
200	7	11) Sem alterações em relação à condição anterior;
240	8,4	12) Sem alterações em relação à condição anterior;
Segunda placa		
360	12,6	13) Quebra

Outro ponto dessa região que merece atenção é a interface entre os dois insertos brasados, apresentada na mesma figura. A interface possui folga natural de montagem entre os dois insertos. A folga entre os dois insertos promove uma descontinuidade do gume e não apresenta corte. À medida que a broca é utilizada, essa descontinuidade do gume resulta na formação de entalhe. Ambos os fenômenos: perda de material do gume transversal e formação de entalhe na interface dos insertos, fragilizam a ponta da broca.

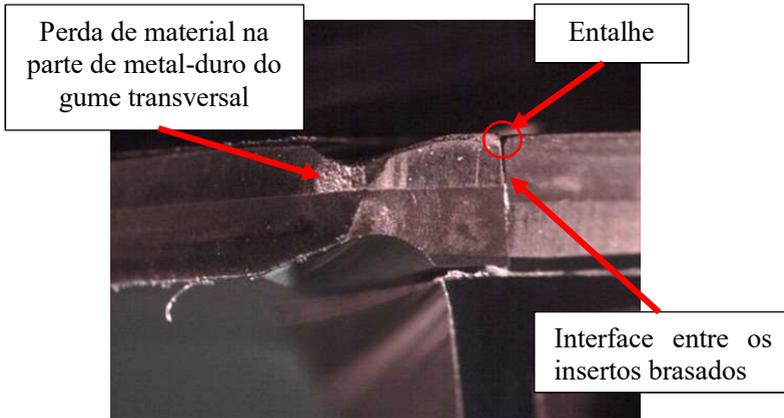


Figura 5. 6 – Desgaste e perda de material no gume transversal

O avanço empregado foi bastante baixo ($f = 0,1\text{mm}$), enquanto que em aplicações normais com metal-duro é comum encontrar valores acima de $f = 0,3\text{ mm}$. Mesmo com as forças de corte menores, oriundas dos baixos avanços, as causas de fragilização da ponta já listadas, somadas ao aumento dos esforços de corte decorrentes do desgaste de flanco no gume transversal, ocasionaram ruptura da ponta da broca ainda com baixa vida de ferramenta (12 m de furação).

A broca em fim de vida está apresentada na figura 5.7. Observe-se que ela lascou a partir da ponta, devido aos fatores de fragilização mencionados.

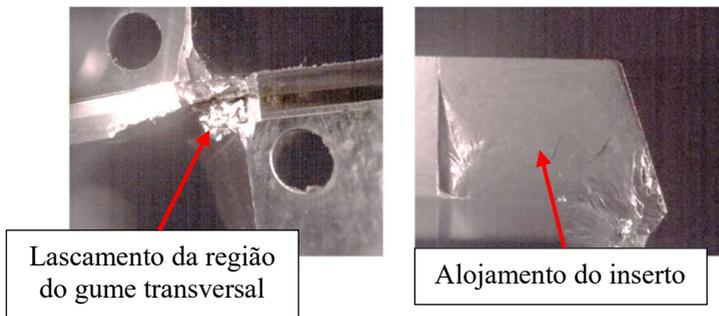


Figura 5. 7 – Lascamento da região do gume transversal (esquerda) e alojamento sem o inserto devido à quebra (direita), com 12,6 m de furação.

Teste B

O Teste B ocorreu com velocidade de corte de $v_c = 450\text{m/min}$ e avanço $f = 0,1\text{ mm}$.

Na figura 5.8, pode-se observar que os valores de desgaste foram semelhantes ao Teste A. Da mesma forma que no teste anterior, houve elevado desgaste de flanco no gume transversal de metal-duro (1º gume, na figura 5.8). Os gumes principais de PCBN obtiveram valores de desgaste de flanco de 0,10 mm no fim de vida, maior que o do teste anterior, devido à maior vida, porém similar quando comparados a 12 metros, valor de fim de vida no Teste A.

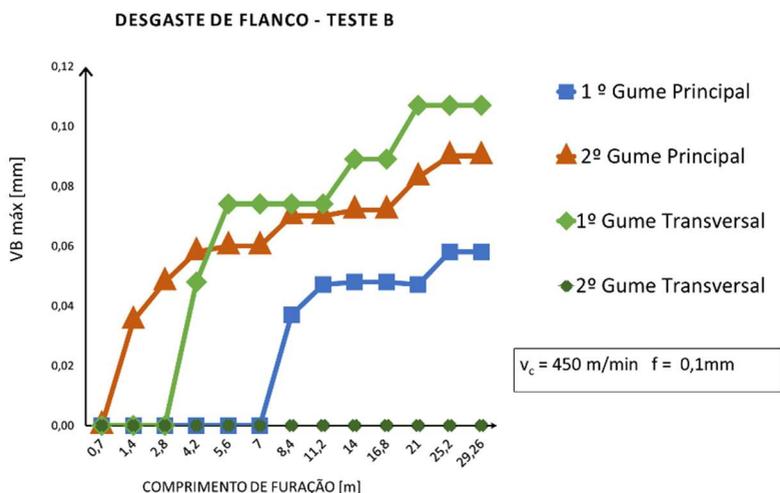


Figura 5. 8 - Evolução do desgaste de flanco. Teste B.

Na tabela 5.5 apresenta-se o acompanhamento do teste B, onde é comentado que a partir dos 5,6 m de furação o gume transversal de metal-duro perde sua geometria, não sendo mais possível medição correta do desgaste. Isso explica a aparente estabilização do desgaste desse gume observado na figura 5.8.

Tabela 5. 5- Acompanhamento da broca. Teste B

Quantidade de furos	Metros de furação [m]	Comentários
Primeira placa		
20	0,7	1) Sem desgaste aparente;
40	1,4	2) Desgaste abrasivo na parte de metal duro do gume transversal;
80	2,8	3) Sem alterações em relação à condição anterior;
120	4,2	4) Sem alterações em relação à condição anterior;
160	5,6	5) Arredondamento ao longo de todo o gume transversal de metal duro: perda de geometria de corte;
200	7	6) Sem alterações em relação à condição anterior;
240	8,4	7) Sem alterações em relação à condição anterior;
Segunda placa		
320	11,2	8) Sem alterações em relação à condição anterior;
400	14	9) Sem alterações em relação à condição anterior;
480	16,8	10) Aumento do arredondamento ao longo do gume transversal de metal duro: perda da geometria de corte;
Terceira placa		
600	21	11) Sem alterações em relação à condição anterior;
720	25,2	12) Perda completa da geometria de corte do gume transversal de metal duro;
Quarta placa		
836	29,26	13) Quebra.

Os fatores de fragilização do teste A, entalhe na interface entre os insertos e perda de metal-duro no gume transversal, estão presentes no Teste B. No teste A, porém, a velocidade de corte é maior ($v_c = 450$ m/min contra $v_c = 300$ m/min no teste anterior). Conforme Abele, Sahn e Schulz (2002) e Gastel *et al.* (2000), velocidades de corte maiores favorecem a ação lubrificante de sulfeto de manganês na usinagem de ferro fundido cinzento. A velocidade de corte menor no teste B explica porque a vida dessa ferramenta foi menor em relação ao teste anterior.

Na figura 5.9 nota-se que da mesma forma que no Teste A, houve formação de entalhe na interface entre os dois inserts.

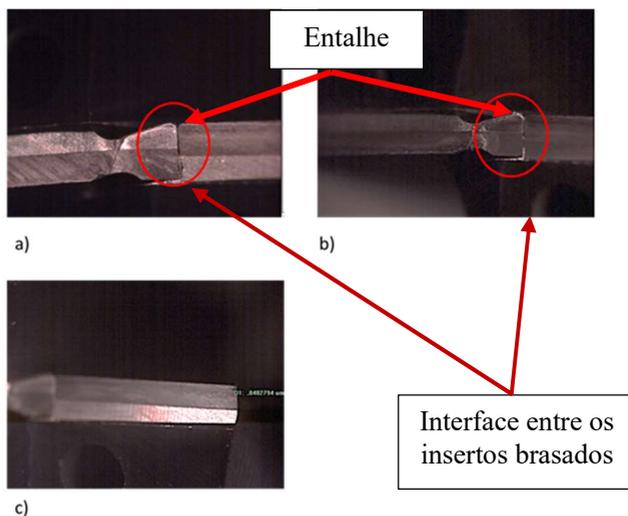


Figura 5. 9 – a) e b) Interface entre os dois inserts brasados na região da ponta da ferramenta com formação de entalhe. c) gume principal com pouco desgaste de flanco

A figura 5.10 apresenta a broca após a quebra. Vê-se na letra ‘b’ o alojamento do inserto após a quebra da broca. Os pontos onde o material de brasagem ficou aderido no corpo da broca (ancoragem) são indicados pelas setas vermelhas. Esses pontos cobrem apenas pequenas áreas da interface do inserto e do corpo da ferramenta, indicando que a brasagem formou poucos pontos de ancoragem. Poucos pontos de ancoragem significam uma brasagem de qualidade inferior, que resiste a menor solitação mecânica suportada antes do rompimento. Também se observa que o inserto foi arrancado quase inteiramente, fato que pode estar relacionado à baixa formação desses pontos. A qualidade da brasagem não foi avaliada antes dos testes.

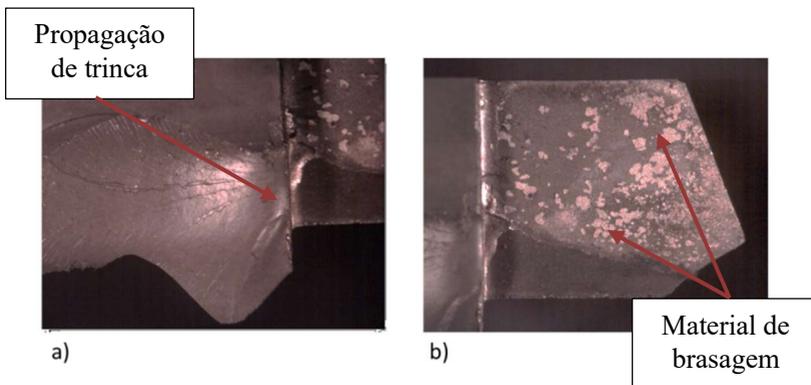


Figura 5. 10 – a) Propagação da trinca originária da quebra do inserto para o corpo da broca, que ocasionou quebra da broca com 29,6m de furação e b) alojamento do inserto após a quebra da broca.

Teste C

O Teste C ocorreu com velocidade de corte de $v_c = 300$ m/min e avanço $f = 0,13$ mm. A tabela 5.6 apresenta o acompanhamento durante as medições.

Tabela 5. 6 - Acompanhamento da broca. Teste C.

Quantidade de furos	Metros de furação [m]	Comentários
Primeira placa		
20	0,7	1) Perda de material à frente do gume transversal: formação de cratera; 2) Sem desgaste nos gumes principais;
40	1,4	3) Sem alterações em relação à condição anterior;
80	2,8	4) Formação de entalhe entre os dois insertos de PCBN; 5) Lascamento no gume principal; 6) Forte perda de material no gume transversal: perda da geometria de corte;
83	2,905	7) Quebra

Ao contrário dos testes anteriores, em que o gume transversal apresentou elevado desgaste desde as primeiras medições, no Teste C isso não foi observado. O entalhe formado interface entre os insertos desempenhou papel predominante, presente já na primeira medição com 20 furos. Houve também formação de microlascamentos no gume principal (figura 5.11).

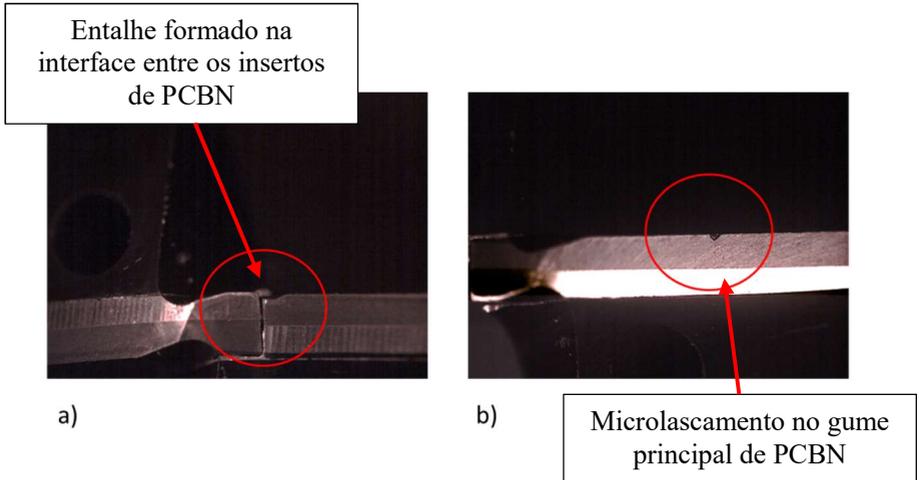


Figura 5. 11 - Formação de entalhe na junção entre os insertos (a) e lascamento no gume principal (b).

A presença de entalhe na interface entre os insertos e o microlascamento do gume principal já nas primeiras medições podem ser atribuídas ao avanço maior se comparado aos testes anteriores ($f = 0,13$ mm), que aumenta as solicitações mecânicas sobre o inserto quando empregados avanços menores, como nos testes anteriores nos quais foram utilizados avanço de $f = 0,1$ mm.

Mesmo com o pouco desgaste no gume transversal, houve lascamento da ponta da broca (figura 5.12), com apenas 83 furos (2,905 m de furação). A trinca se propagou para a parte do corpo da broca, provocando a quebra da mesma.

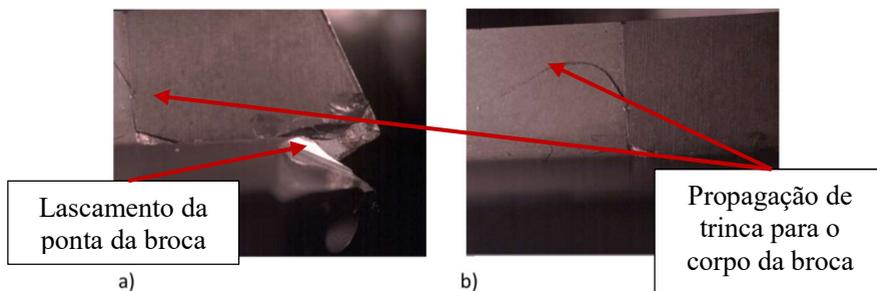


Figura 5. 12 - Quebra com 2,9 m de furação.

A falta de tenacidade do material da ponta para resistir aos pontos de fragilização, embora já observado nos testes anteriores, fica mais evidente para avanços maiores.

Teste D

O Teste D ocorreu com $v_c = 450$ m/min e avanço $f = 0,13$ mm. A tabela 5.7 apresenta o acompanhamento das medições desse teste.

Tabela 5. 7 - Acompanhamento da broca. Teste D

Quantidade de furos	Metros de furação [m]	Comentários
Primeira placa		
20	0,7	1) Sem desgaste nos gumes principais; 2) Perda de material à frente do gume transversal: formação de cratera;
23	0,805	3) Quebra

Da mesma forma que no Teste C, nesse teste a broca está submetida a avanços maiores que nos testes A e B. A velocidade de corte desse teste é maior que a do teste C. Esse é o teste com parâmetros de corte mais elevado dentre os testados. A broca não apresentou resistência nessa condição de corte e quebrou com apenas 23 furos gerados (0,805 m de furação). Na figura 5.13 observa-se que a quebra ocorreu a partir da junção dos insertos.

Conforme já discutido, as brocas de PCBN *full face* apresentam dois pontos críticos na região da ponta da broca: o gume transversal de metal-duro e a interface entre os dois insertos brasados. Nos testes C e D, submetidos a avanços maiores ($f = 0,13$ mm), as brocas quebraram com vidas muito baixas e nos pontos de fragilização citados.

Conclui-se que avanço de $f = 0,13$ mm é muito elevado para esse conceito de broca. Nessa condição de corte, o material utilizado no inserto não confere ao mesmo tenacidade suficiente para suportar os pontos de fragilização desse conceito de broca.

Os resultados dos testes C e D estão de acordo com os apresentados por Taylan, Çolak e Kayacan (2011). Em sua pesquisa com ferramentas de PCBN, os autores observaram que aumento do avanço é acompanhado de aumento de desgaste e diminuição de vida. Saoubia *et al.* também afirmam que avanços maiores implicaram em aumento do desgaste da ferramenta, aumento das forças de corte e maior deterioração da mesma

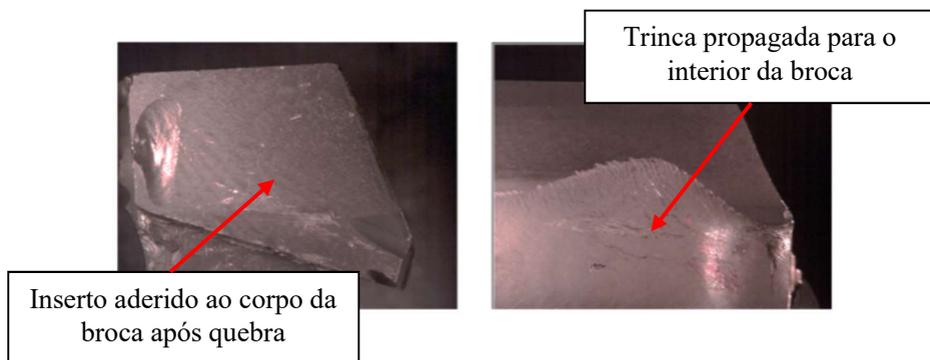


Figura 5. 13 - Quebra com 0,805 m de furação.

Teste E

Os testes acima apresentados ocorreram em cada um dos parâmetros propostos na tabela 4.3. O teste que apresentou maior vida de ferramenta foi o Teste B. Em vista disso, e conforme metodologia proposta pelo trabalho, foi realizada réplica desse teste. O Teste E, réplica do Teste B, utilizou as mesmas condições de corte e geometria da ferramenta: $v_c = 450$ m/min e $f = 0,1$ mm, bem como a afiação proposta por Brandt (2014).

A evolução do desgaste de flanco do Teste E está apresentada na figura 5.14 e a análise das medições individuais está contida na tabela 5.8. Da mesma forma que nos testes anteriores, houve acentuado desgaste de flanco no gume transversal desde as primeiras medições. O desgaste de flanco nos gumes principais foi menor que o registrado nos testes anteriores, não ultrapassando 0,06 mm.

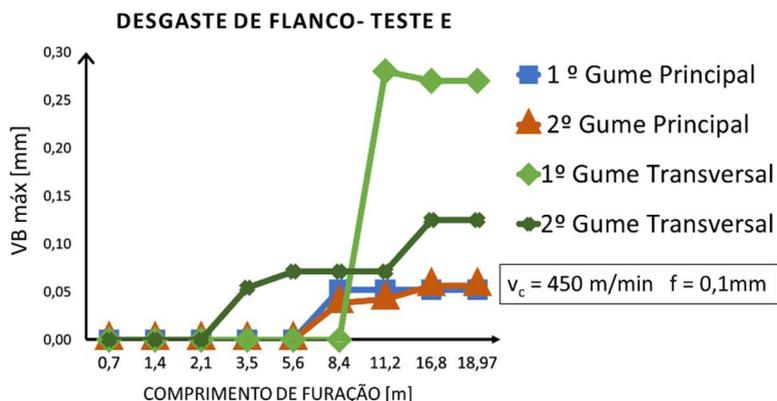


Figura 5. 14 - Desgaste de flanco. Teste E.

Tabela 5. 8 – Acompanhamento da broca. Teste E.

Quantidade de furos	Metros de furação [m]	Comentários
Primeira placa		
20	0,7	1) Desgaste na região de junção dos dois insertos de PCBN; 2) Sem desgaste nos gumes principais e transversal;
40	1,4	3) Sem alterações em relação à condição anterior;
60	2,1	4) Formação de entalhe entre os dois insertos de PCBN de 0,14 mm;
100	3,5	5) Entalhe entre os insertos aumentou para 0,25 mm; 6) Sem desgaste nos gumes principais e no gume transversal de PCBN;
160	5,6	7) Entalhe entre os insertos aumentou para 0,29 mm;
240	8,4	8) Sem alterações em relação à condição anterior;
Segunda placa		
320	11,2	9) Desgaste pronunciado no gume transversal de PCBN; 10) Forte deterioração da parte de metal duro do gume transversal: perda de geometria de corte;
480	16,8	11) sem alterações em relação à condição anterior;
Terceira placa		
542	18,97	12) Quebra

Ao contrário dos testes anteriores, no teste E houve fortes danos na parte de PCBN do gume transversal. O aumento súbito no desgaste com 8,4 m de furação indica que houve lascamento, que está apresentado na figura 5.15. Na mesma figura observa-se a forte remoção de material substrato de metal-duro do inserto, o que fragilizou o PCBN, provocando o lascamento do mesmo.

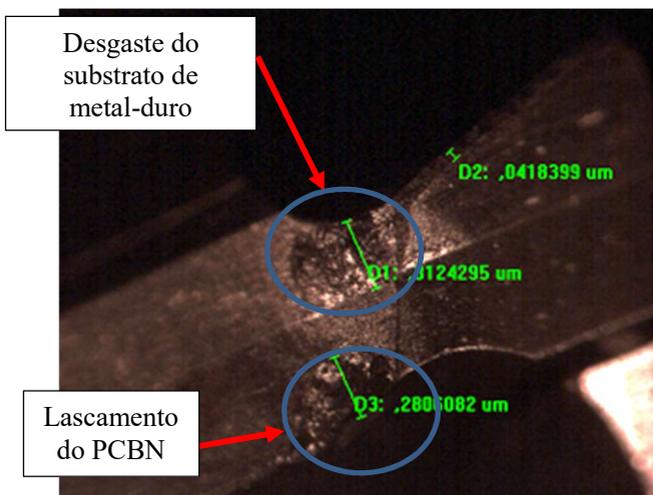


Figura 5. 15 - Desgaste no gume transversal de PCBN

No teste E foi observada a formação de entalhe na interface dos insertos, com magnitude superior aos testes anteriores (figura 5.16). Como já discutido nos resultados acima, a interfase entre os dois insertos apresenta uma zona sem corte (folga entre os insertos). À medida que a broca é utilizada, essa folga favorece a formação de entalhe, que é uma fonte de instabilidade no corte e fragilidade para a broca.

A broca do Teste E, bem como as brocas anteriores, apresenta dois pontos de fragilização na região da sua ponta: entalhe formado na interface dos insertos brasados e desgaste acentuado no gume transversal de metal-duro. O inserto de PCBN não apresentou tenacidade para resistir a essa fragilização e quebrou com 18,97 metros de comprimento de furação (figura 5.17). Essa vida é 35% menor que o teste B, realizado com as mesmas condições.

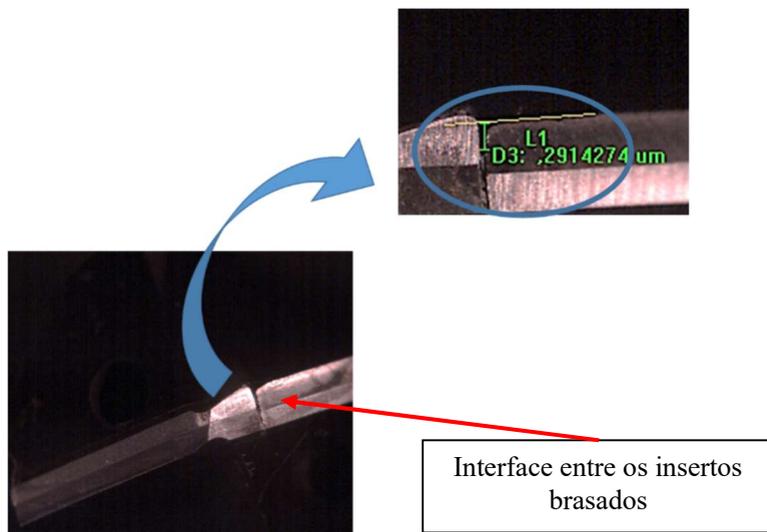


Figura 5. 16 - Desgaste em forma de entalhe na junção entre os dois inserts

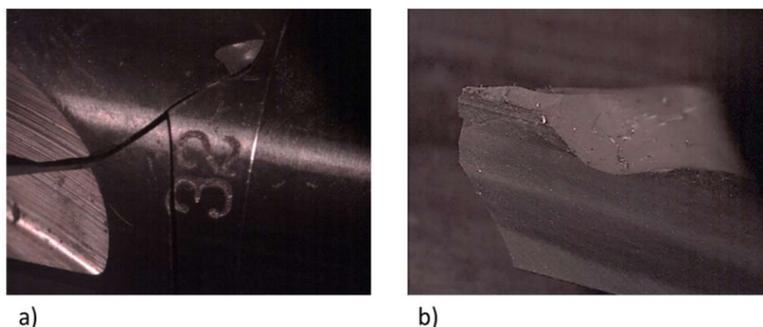


Figura 5. 17 - Quebra com 18,67 m de comprimento furação. Teste E. a) ponto onde a broca partiu na haste. b) característica da quebra do corpo da broca.

Para concluir sobre os resultados obtidos no grupo de testes com brocas de inserto *full face*, é necessário considerar dois pontos. Primeiro, o PCBN possui tenacidade inferior ao metal-duro. Segundo, é o fato de que as regiões do gume transversal e proximidades (chamadas nesse trabalho de “região da ponta”), de forma geral, possuem a remoção de material prejudicada, devido às baixas velocidades de corte e ângulos de saída bastante negativos, especialmente no gume transversal, resultando

em forças de corte normais ao gume em outras regiões da broca. É, portanto, uma região crítica no processo de furação. O conceito de broca *full face* apresenta dois pontos de fragilidade em sua constituição, que ficaram bem claros ao longo dos testes: a parte de metal-duro do gume transversal e a interface entre os dois insertos brasados. Esses pontos de fragilização, somados à criticidade citada da ponta e a menor tenacidade do PCBN, ocasionaram a quebra da ferramenta em vidas inferiores às esperadas.

Observa-se também que mesmo com idênticos parâmetros, os testes B e E apresentaram resultados bastante diferentes em termos de vida. No teste B, o inserto soltou quase que completamente do corpo de metal-duro sem avarias (figura 5.10), indicando falta de pontos de ancoragem. A qualidade da brasagem, assunto não estudado nesse trabalho, mostrou-se uma fonte de variação dos resultados, que deve ser melhor entendida antes da aplicação comercial do conceito de broca *full face*.

5.3 TESTES DE FURAÇÃO COM PCBN INTEGRAL

Nesta seção serão apresentados os resultados obtidos com o conceito de broca com insertos de PCBN integrais brasados na ponta.

As combinações de valores estipulados no DOE para utilização em cada um dos testes estão representados na tabela 4.7.

5.3.1 Pré-testes: primeiro grupo

O primeiro lote disponibilizado pelo fornecedor continha duas brocas com inserto da classe FU820, de maior dureza e menor tenacidade. Com elas foi possível efetuar as provas 2 e 3 do DOE (tabela 4.7).

Prova 2

A Prova 2 ocorreu com a mesma afiação da utilizada por Brandt (2014), velocidade de corte $v_c = 300$ m/min e avanço $f = 0,1$ mm.

A broca quebrou no primeiro furo, após furar 11 mm de profundidade (figura 5.18).



Figura 5. 18 – Partes da broca quebrada na Prova 2 após 11 mm de furação.

Com a finalidade de entender as causas da quebra da broca, analisou-se o furo gerado (figura 5.19).



Figura 5. 19 – Análise do fundo do furo gerado. Em azul: início do corte, diâmetro próximo ao diâmetro externo. Em vermelho: início do corte, próximo ao centro.

Durante a usinagem foi percebido som característico de vibração. A análise do furo (figura 5.19) mostra a superfície característica de usinagem com vibração no fundo do furo. Na mesma figura observa-se, indicado pelas setas, três pontos de início de corte: um em vermelho, mais perto do centro e outros dois em azul, perto do diâmetro externo e defasados entre si em 180° , indicando que as regiões próximas a ponta e a quina quebraram em momentos diferentes.

Nos processos de furação, o fundo do furo apresenta o formato de uma superfície de revolução, cuja geratriz é a curva pelos gumes da broca. O formato comum da furação é um cone, com ângulo idêntico ao ângulo de ponta da broca. Para investigar o fundo do furo, foi realizado

seccionamento do mesmo (figura 5.20). Observa-se, destacado no quadrado vermelho, que o fundo do furo apresenta geometria plana no centro e cônica nas extremidades. Isso corrobora a hipótese levantada no parágrafo anterior de que a ponta e a quina quebraram em momentos distintos. O fundo plano ainda indica que a ponta da broca quebrou antes, conferindo ao fundo do furo o formato da broca no momento da quebra.

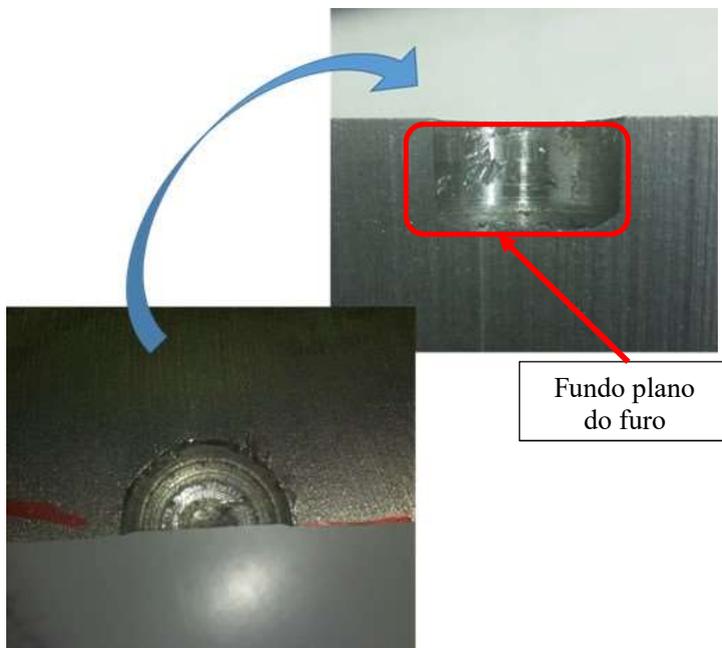


Figura 5. 20 - Seccionamento do furo para análise. No detalhe: região plana no fundo do furo.

Como já discutido, a ponta da broca (gume transversal e regiões próximas) é uma região crítica. Nesse teste, o material do inserto não ofereceu a tenacidade necessária para atender a essas solicitações e quebrou ainda no primeiro furo. O lascamento da ponta da broca ocasionou uma trinca que se propagou para o corpo da broca, ocasionando a quebra da mesma (figura 5.21).



Figura 5. 21 - Trinca no corpo da broca, que inicia na região do alojamento do inserto.

Prova 3

A Prova 3 ocorreu com a afiação sugerida pela fabricante da broca (Mapal), velocidade de corte $v_c = 450$ m/min e avanço $f = 0,1$ mm.

A broca quebrou no primeiro furo, após 28 mm de furação (figura 5.22).

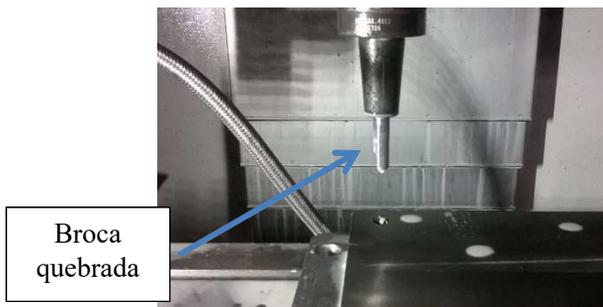


Figura 5. 22 - Broca quebrada com 28 mm de furação, ainda presa no cone.

Parte da broca quebrou dentro do corpo de prova, o que possibilitou aprofundamento no estudo das causas. Foi removida a parte do corpo de prova onde a broca ficou alojada e posteriormente foram feitos dois cortes longitudinais em formato “V” para possibilitar observação do corte (figura 5.23).



Figura 5. 23 - Preparação da amostra para análise. Em sentido horário: marcação do corpo de prova, corte e corpo de prova preparado para análise.

Depois de feitos os cortes longitudinais foi possível visualizar a broca quebrada (figura 5.24).

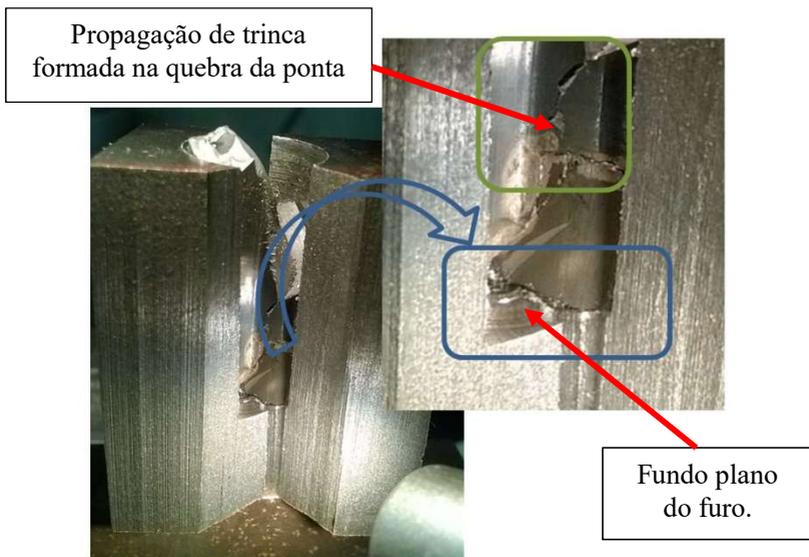


Figura 5. 24 - Corte da amostra para análise de quebra da broca.

Os cortes longitudinais em formato “V” possibilitaram a visualização da broca quebrada dentro do furo. Na imagem ampliada da figura 5.24 observa-se, destacado em azul, que o fundo do furo apresenta formato plano e não cônico, indicando que houve lascamento da ponta da broca antes da quebra total da mesma, de forma similar à Prova 2. Destacado em verde, existe a presença de uma trinca que começa na ponta da broca e se propaga para o corpo da broca.

Após as análises acima, a broca foi retirada do interior do corpo de prova. O fundo do furo apresenta superfície característica de usinagem com vibração (figura 5.25) e região plana no centro.

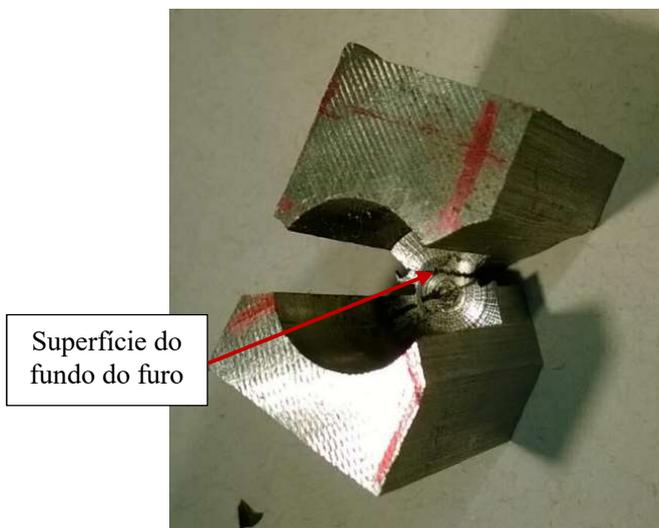


Figura 5. 25 – Fundo do furo: superfície característica de usinagem com vibração.

A broca retirada do furo estava completamente quebrada e seus pedaços foram juntados para continuar a investigação. Na figura 5.26 observa-se que a broca não apresentava mais ponta no momento da quebra, mas a quina ainda estava inteira e aderida ao corpo da broca, confirmando que a ponta quebrou antes do colapso total da ferramenta.

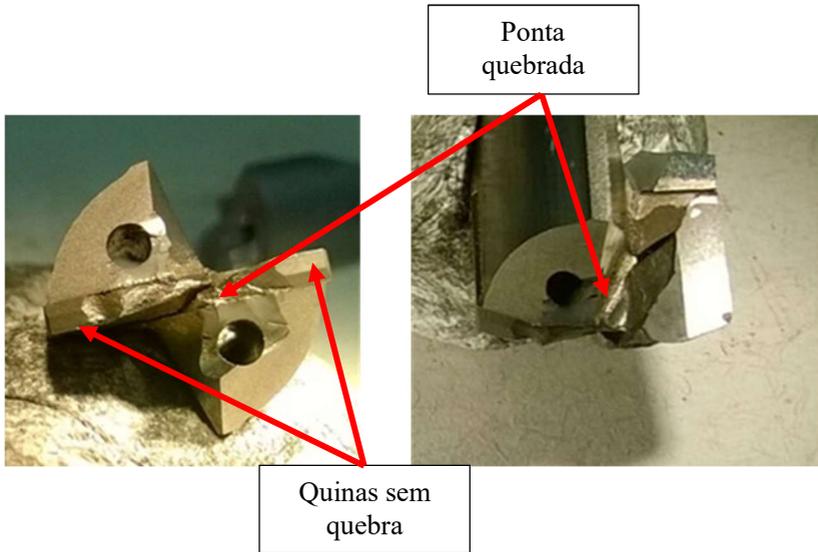


Figura 5. 26 – Análise da broca retirada do furo após quebra.

O conceito de broca com um único inserto integral foi proposto com o objetivo de eliminar os pontos de fragilização apresentados pelas brocas *full face* (perda de material do gume transversal e interface entre insertos soldados). Por consequência, as duas brocas testadas na Prova 2 e Prova 3 não possuíam esses pontos de fragilização. Mesmo assim, em ambos os testes, a brocas não permitiram terminar o primeiro furo. Conforme o referencial de pesquisa sabe-se que as ferramentas de PCBN possuem tenacidade menor que o metal-duro e que esse material não se comporta bem a baixas velocidades de corte. Os resultados obtidos confirmam essas informações, visto que a quebra ocorreu na ponta da broca, onde as velocidades de corte são menores e as forças de corte sobre o gume são maiores, necessitando de maior tenacidade do material da ferramenta.

Conclui-se que a causa primária da quebra é a falta de tenacidade da classe de PCBN FU820, material do inserto integral utilizado.

5.3.2 Pré-testes: segundo grupo

Nesse grupo foram testadas as brocas com inserto mais tenaz, classe FU720. No DOE proposto (Tabela 4.7), correspondem às **Prova 1** e **Prova 4**.

Prova 1

A Prova 1 ocorreu com a mesma afiação da utilizada por Brandt (2014), velocidade de corte $v_c = 450$ m/min e avanço $f = 0,1$ mm.

A evolução do desgaste está apresentada na figura 5.27. Já na primeira avaliação, com 20 furos (0,7 m), evidenciou-se forte desgaste, tanto nos gumes principais quando no gume transversal (entre 0,11 e 0,22 mm, respectivamente).

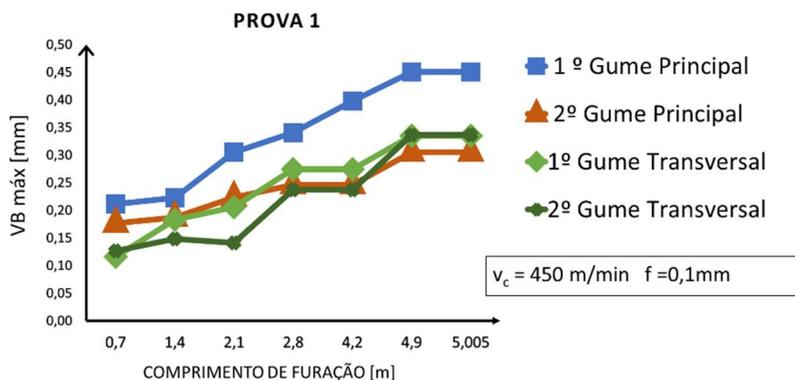


Figura 5. 27 - Evolução do desgaste de flanco. Prova 1.

Observa-se, tanto na figura 5.27 quanto na tabela de acompanhamento 5.9, que o desgaste de flanco no gume principal apresentou tendência de crescimento à medida que a distância do centro se tornava menor (figura 5.28, letras “a” e “b”). A velocidade de corte varia ao longo do gume principal decrescendo em direção ao centro. O desgaste de flanco no gume principal e a velocidade de corte seguem tendências opostas: a diminuição da velocidade de corte implica aumento do desgaste. Essa tendência oposta está alinhada com os resultados obtidos por Abele, Sahn e Schulz (2002) e Gastel *et al.* (2000), que asseveram que as propriedades lubrificantes do MnS necessitam de altas velocidades de corte para se tornarem efetivas.

Tabela 5. 9 – Acompanhamento da broca. Prova 1

Quantidade de furos	Metros de furação [m]	Comentários
Primeira placa		
20	0,7	1) Aparecimento de entalhe no gume transversal (0,390 mm); 2) Desgaste no gume principal ocorreu nas proximidades do centro. Próximo ao diâmetro externo não houve desgaste significativo;
40	1,4	3) O desgaste do gume principal continua com as mesmas características de desgastes descritas no item 2; 4) Gume transversal apresenta forte arredondamento, evidenciando desgaste abrasivo severo;
60	2,1	5) Crescimento do arredondamento do gume transversal; 6) As características de desgaste no gume principal permanecem inalteradas;
80	2,8	7) Gume transversal apresenta forte deterioração; 8) As características de desgaste no gume principal permanecem inalteradas;
120	4,2	9) Gume transversal perdeu as características geométricas do corte;
140	4,9	10) Desgaste severo no gume principal à aproximadamente metade do diâmetro; 11) Em diâmetros mais externos, o desgaste do gume principal não é significativo;
143	5,005	11) Quebra

Próximo aos diâmetros mais externos, onde as velocidades de corte são máximas, o gume permaneceu intacto durante todo o teste (figura 5.28, letra “d”).

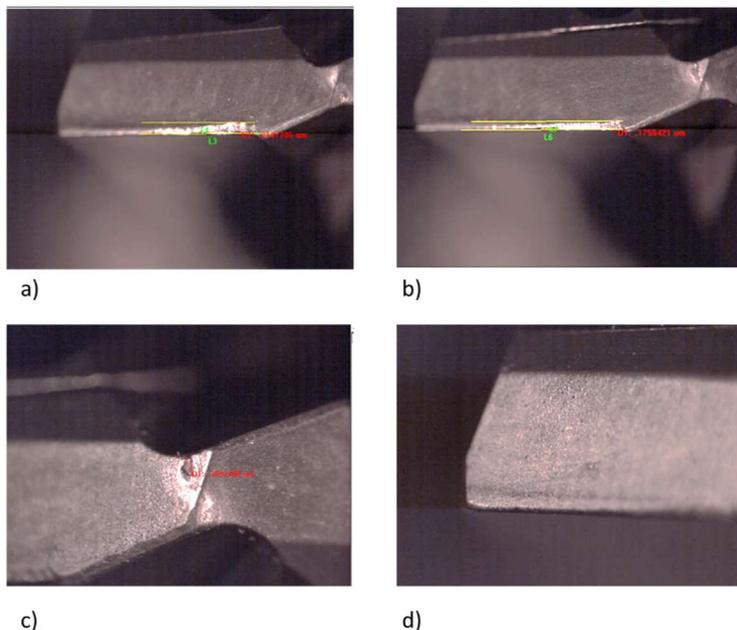


Figura 5. 28 - Primeira medição da broca da Prova 1. a) e b) desgaste do gume principal, com desgaste maior em direção ao centro. c) gume transversal, com acentuado desgaste. d) parte mais externa do gume principal sem desgaste mensurável.

O desgaste no gume transversal apresentou comportamento similar ao gume principal. Desde as primeiras medições o desgaste foi elevado (aproximadamente $VB = 0,13$ mm com 0,7 m de furação) com aumento constante ao longo do teste. Segundo a tabela de acompanhamento 5.9, a partir dos 4,2 metros de comprimento de furação o gume transversal já havia perdido as características geométricas. Essa perda de características geométricas pode ser observada na figura 5.29, última medição antes da quebra, com 4,9 m de furação.

No fim de vida da ferramenta, os valores de desgaste já estavam próximos a 0,5 mm, muito acima até mesmo do valor comumente esperado para metal-duro, que é 0,3 mm. Em ferramentas de PCBN não são esperados desgastes de flanco maiores que 0,1 mm.

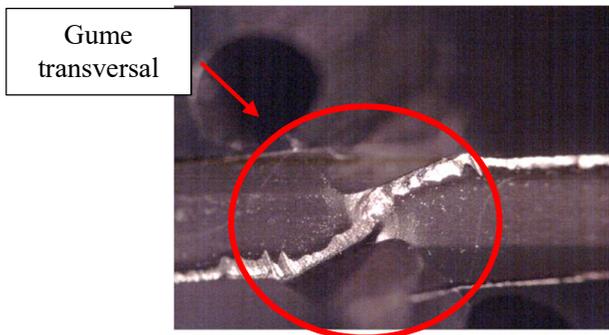


Figura 5. 29 - Gume transversal com elevado desgaste. Broca de PCBN utilizado na Prova 1. Última medição antes da quebra. 4,9 m de furação.

Esse teste apresentou resultados superiores aos anteriores realizados com inserto de PCBN integral. A maior resistência do gume transversal está associada a classe mais tenaz do PCBN e à afiação utilizada (mesma que Brandt). A afiação Brandt apresenta alívio de gume transversal menor (apêndice B), o que dá mais robustez a ponta da broca.

Embora mais tenaz, a classe FU720 possui dureza menor que a classe dos testes anteriores, o que diminui sua resistência ao desgaste abrasivo. Somado a isso, as baixas velocidades de corte próximas ao centro resultaram no elevado desgaste de flanco, observado tanto nos gumes principais, quanto no gume transversal.

Analisando a broca quebrada (figura 5.30, letra b), é possível observar que parte da superfície do alojamento do inserto de PCBN não apresenta presença de material de brasagem. Irregularidades na brasagem podem comprometer totalmente a qualidade final da broca, visto que são uma fonte de instabilidade, não sendo possível estimar em que ponto do uso da broca a brasagem se romperá.

Como já mencionado, a broca de PCBN utilizada na Prova 1 foi a que apresentou a maior vida nos testes com inserto de PCBN integral (5,0 metros de comprimento de furação). Mesmo assim, desempenho ainda ficou muito aquém do esperado. A vida de brocas comuns de metal-duro varia conforme a aplicação, mas são esperados valores próximos a 60 metros para ferro fundido cinzento. As brocas de inserto de PCBN *full face* testadas nesse trabalho tiveram vidas de até 29,26 (Seção 5.2, teste B).

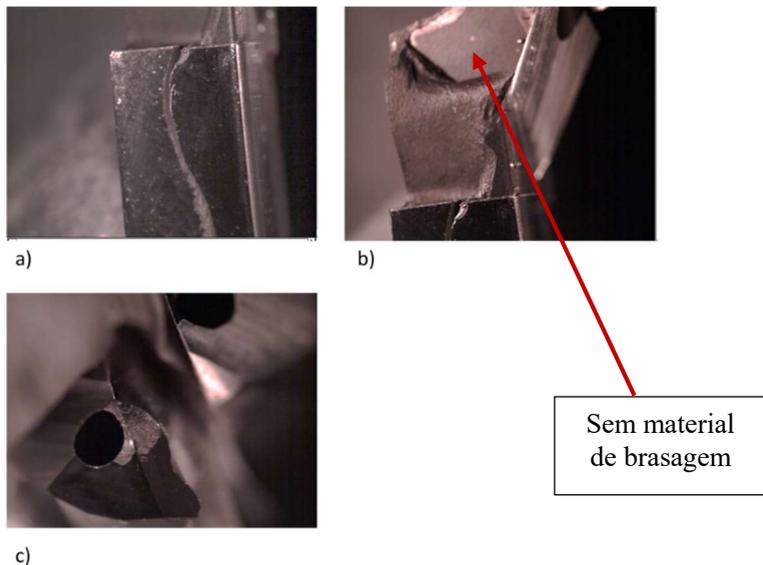


Figura 5. 30 - Broca de PCBN integral quebrada. Prova 1

Prova 4

A Prova 4 ocorreu com a afiação sugerida pela fabricante da broca (Mapal), velocidade de corte $v_c = 300$ m/min e avanço $f = 0,1$ mm.

Após o 1º furo, a usinagem foi interrompida para análise da broca que já apresentava lascamento da ponta (figura 5.31). Foi encerrado o teste com essa broca e a mesma encaminhada para análise em estereoscópio.

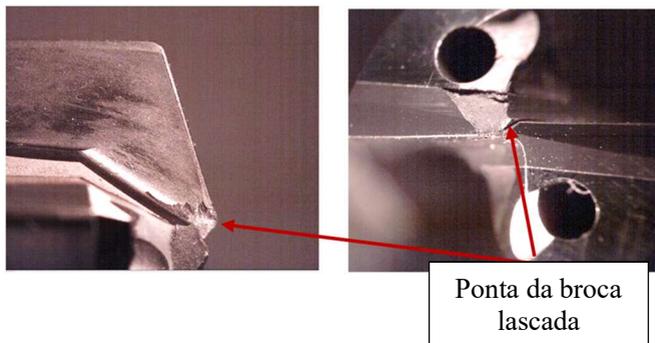


Figura 5. 31 – Lascamento da ponta da broca. Prova 4

A classe de inserto da Prova 4 é o mesmo da Prova 1 (FU720). Portanto, nas duas provas a tenacidade foi similar. A diferença mais significativa entre os dois testes e que afeta a resistência da ponta (gume transversal e proximidades) é o tipo da afiação. O apêndice B mostra os dois tipos empregados nesse grupo de testes. A afiação Mapal, utilizada na Prova 4, apresenta alívio de gume transversal com dois rebaixos ao longo da face da ferramenta, ao contrário da afiação Brandt, utilizada no teste anterior, no qual o alívio de gume transversal consiste em dois rebaixos somente nessa região. Devido a essa geometria, a afiação Brandt propicia um gume transversal mais robusto que a sugerida pela Mapal.

Na figura 5.32 observa-se que houve propagação de trinca a partir da ponta quebrada, justamente na zona do rebaixo que caracteriza a afiação Mapal. A trinca se propagou em direção ao corpo da broca.

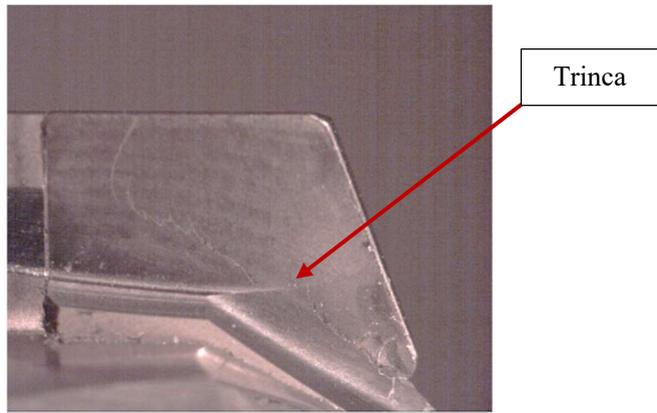


Figura 5. 32 - Trinca a partir da ponta quebrada e se propaga para o restante inserto de PCBN.

Devido à fragilização gerada na região da ponta da ferramenta, conclui-se que a afiação sugerida pela fabricante Mapal não é indicada para o conceito de broca utilizada nos presentes experimentos. Mesmo se tratando de teste com classe mais tenaz de PCBN que deveria conferir maior resistência a quebras, a broca quebrou já no primeiro furo, evidenciando essa fragilização.

As brocas com insertos de PCBN integral foram propostas para resolver os problemas de desgaste excessivo do gume transversal, parte de metal-duro e de formação de entalhe na interface dos insetos soldados apresentados pela broca de PCBN *full face*. Imaginava-se que

eliminando esses pontos de fragilização que causavam a quebra das ferramentas, alcançar-se-iam maiores vidas. Mesmo considerando *a priori*, que a falta de tenacidade do PCBN no gume transversal poderia ocasionar as quebras, foi decidido pela fabricação e teste das brocas. Dos resultados, conclui-se que esse conceito de broca não confere à região gume transversal e proximidades resistência suficiente para suportar as solicitações mecânicas a que a broca é submetida em operações de furação. Não se indica teste com insertos de maior tenacidade para melhorar a resistência a quebras e lascamentos, visto que comumente o aumento de tenacidade vem acompanhado de redução de dureza. Como apresentado no resultado da Prova 1, durezas mais baixas resultariam em desgaste de flanco excessivo, comprometendo a broca. Portanto, a viabilidade do conceito de brocas de PCBN integral está condicionado ao desenvolvimento de materiais de dureza e tenacidade superior às classes de inserto presentemente utilizados.

5.4 TESTE DE FURAÇÃO COM BROCA DE METAL-DURO

A figura 5.33 apresenta a evolução do desgaste de flanco nos gumes principais.

O desgaste de flanco permaneceu baixo durante o teste devido a cobertura da ferramenta aplicada nas faces e flanco da ferramenta.

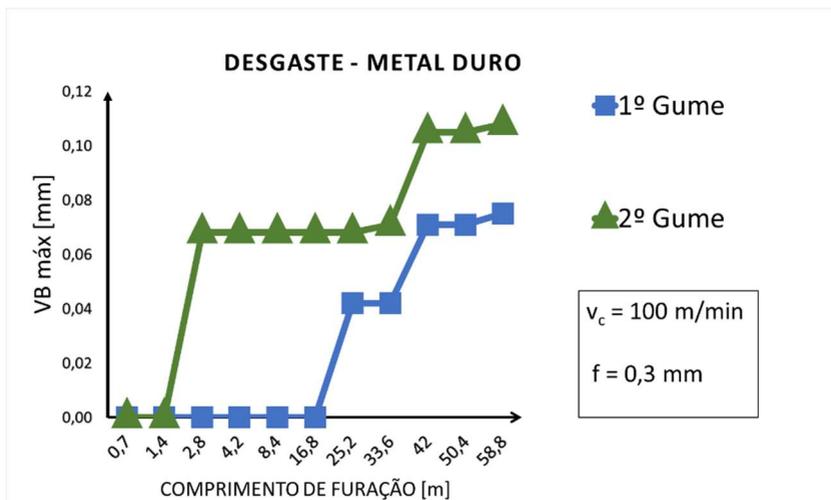


Figura 5. 33 – Evolução do desgaste de flanco. Teste com metal-duro.

Após 58,7 m de furação (1680 m de furação) o teste foi encerrado por elevado desgaste das guias, que atingiu valores de 1,03 e 0,815 mm (figura 5.34).

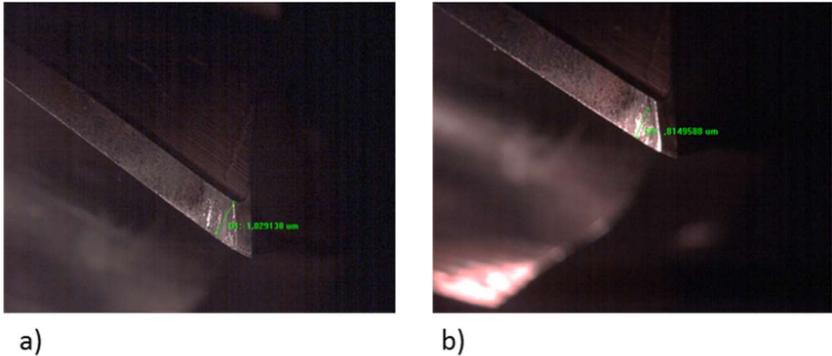


Figura 5. 34 - Desgaste de guia. Teste com metal-duro. 58,8 m de furação.

Os furos gerados foram medidos conforme estabelecido na seção 4.3.1.2. Os parâmetros geométricos obtidos nesse experimento serviram como base comparativa para as brocas de PCBN testadas neste trabalho e serão apresentados na seção seguinte.

5.5 TESTES COMPLEMENTARES DE FURAÇÃO

1º Teste – Broca dupla

Os testes foram conduzidos com velocidade de corte de $v_c = 300$ m/min e avanço de $f = 0,1$ mm, mesmos utilizados por Brandt (2014).

Na primeira medição, com 18 furos (0,63 m de furação), foi observado forte desgaste de flanco no gume transversal de metal-duro. Os gumes principais não apresentaram desgaste aparente.

Com 36 furos (1,26 m de furação), os gumes principais de PCBN continuam sem desgaste aparente. Já no gume transversal o desgaste atingiu toda sua extensão, deformando-o completamente. Optou-se pelo encerramento do teste, devido à rápida deterioração do gume transversal (figura 5.35).

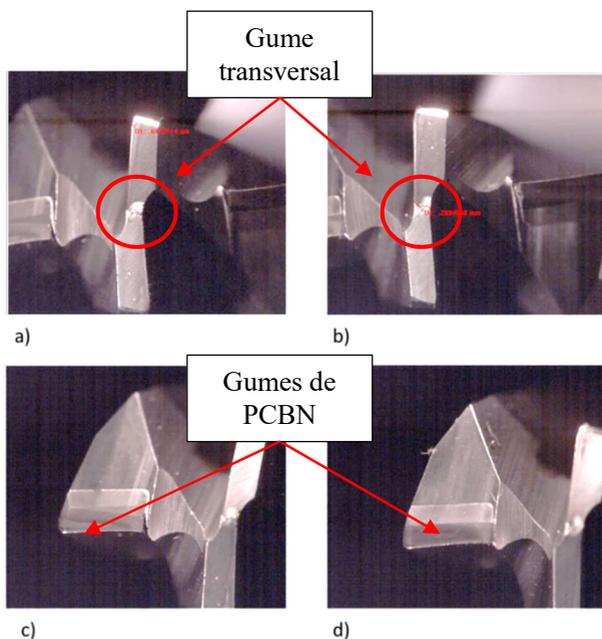


Figura 5.35 - Desgaste da broca - 36 furos. a) e b) gume transversal, c) e d) gumes principais de PCBN. $v_c = 250$ m/min, $f = 0,1$ mm.

2º Teste – Broca dupla

Devido ao elevado desgaste do gume transversal no 1º teste, optou-se por reduzir a velocidade de corte, mantendo-se o mesmo avanço do teste anterior. Os dados de corte foram: $v_c = 250$ m/min, $f = 0,1$ mm.

Após 36 furos (1,26 m de furação, figura 5.36) foram feitas novas medições. Os gumes principais de metal-duro do diâmetro menor da broca apresentavam desgaste de flanco de 0,20 mm, perto do limite indicado para fim de vida em brocas de metal-duro (0,30 mm). Os gumes principais de PCBN também apresentaram desgaste ($VB = 0,03$ mm), diferentemente do 1º teste. O gume transversal já havia perdido a geometria de corte. Concluiu-se assim pelo fim do teste, por causa da rápida deterioração do gume transversal.

Comparando o desgaste do teste atual com o teste anterior, observa-se que a diminuição da velocidade de corte ocasionou aumento do desgaste de flanco dos gumes de PCBN conforme era esperado,

confirmando mais uma vez que esse tipo de material de corte se comporta melhor a altas velocidades de corte. Porém, o diâmetro interno, composto de metal-duro, não apresentou redução de desgaste, que era o objetivo principal com a redução de velocidade de corte.

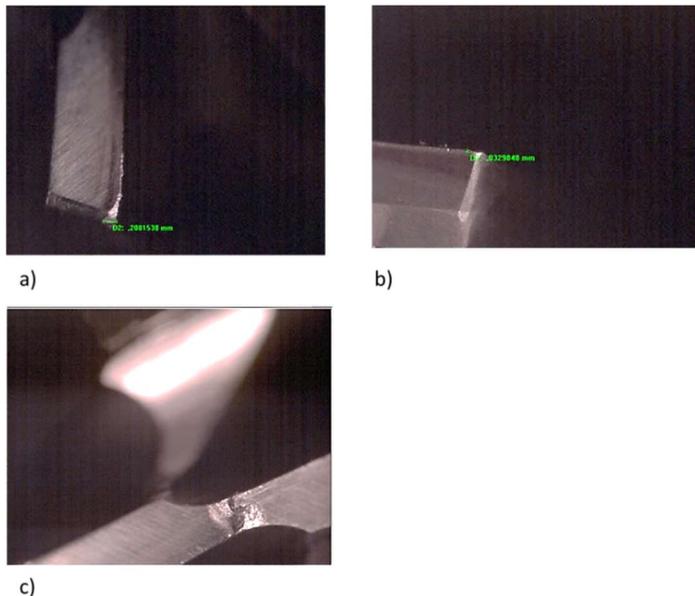


Figura 5. 36 - Desgaste da broca - 36 furos. a) gume principal de metal-duro. b) gume principal de PCBN. c) gume transversal. $v_c = 250$ m/min, $f = 0,1$ mm.

3º Teste – Broca dupla

Como o principal problema apresentado no 2º teste permanecia o elevado desgaste da parte de metal-duro da broca, optou-se por baixar novamente a velocidade de corte. Os dados utilizados foram: $v_c = 160$ m/min, $f = 0,1$ mm.

Com 36 furos, o desgaste no diâmetro menor de metal-duro apresentou comportamento similar aos 1º e 2º testes.

A redução da velocidade de corte não ajudou a preservar o gume transversal de metal-duro (figura 5.37). Na figura 5.28, observa-se que a menor velocidade de corte implicou danos ao inserto do PCBN, com aparecimento de microtrincas, tendência já observada no 2º teste. Esse teste, como nos demais, confirma que esse material tem desgaste aumentado com menores velocidades de corte.

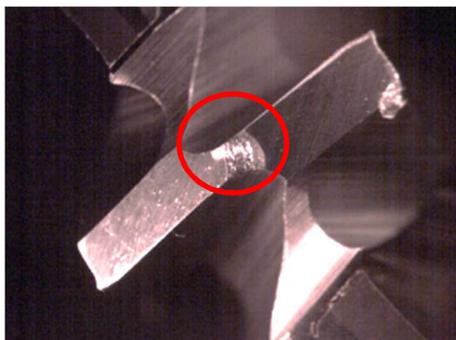


Figura 5.37 - Gume transversal de metal-duro – Perda de características geométricas.

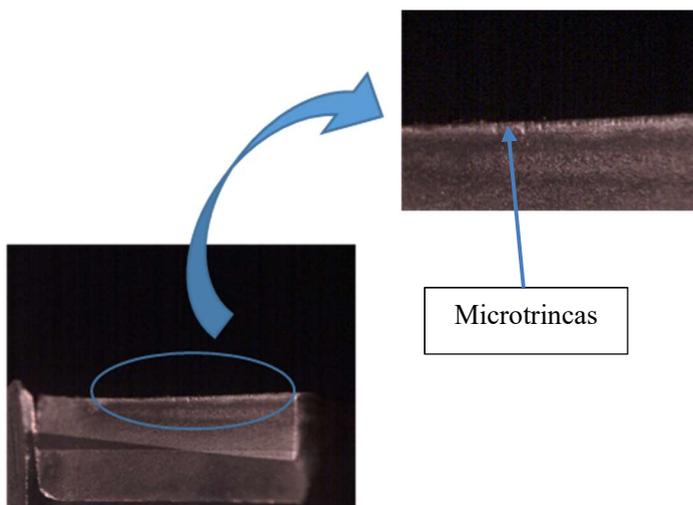


Figura 5.38 - Desgaste do inserto de PCBN – aparecimento de microtrincas.

Conclui-se que as altas velocidades de corte possuem influência negativa no desgaste dos gumes de metal-duro, visto que altas velocidades de corte provocam acentuado desgaste abrasivo nesse material, inviabilizando a aplicação conceito de ferramenta do tipo 'broca dupla'.

O último teste complementar de furação ocorreu com a broca e parâmetros de corte da Prova 1 do grupo de testes com PCBN integral,

porém sem aplicaç. A broca quebrou (figura 5.39) com apenas 13 mm de furação, indicando que a refrigeração é necessária para esse conceito de ferramenta.



Figura 5. 39 - Broca de inserto de PCBN integral quebrada - teste sem refrigeração.

A apresentação dos resultados até esse ponto teve como foco o estudo do desgaste e causas do fim de vida da ferramenta. O desgaste da ferramenta tem influência na qualidade do furo gerado. Na seção a seguir, será apresentado o resultado do estudo geométrico realizado nos furos.

5.6 AVALIAÇÃO DA QUALIDADE DOS FUROS GERADOS

Essa seção apresenta os resultados dos erros geométricos das furações obtidas. Foram estudados os seguintes parâmetros: erro de posição, perpendicularidade, cilíndricidade, diâmetro e rugosidade.

As análises serão feitas baseadas nos testes de maior interesse: 1) teste B, por ser o teste que apresentou o melhor resultado em termos de vida de ferramenta; 2) teste E, por ser réplica do teste B; 3) teste “PCBN integral”, representando as brocas de PCBN integral.

A referência de comparação foram os resultados obtidos pela broca de metal-duro.

5.6.1 Medição dos diâmetros, erros de posição, perpendicularidade, cilindricidade dos furos

Os valores das medições em máquina de medir por coordenadas estão contidos no apêndice F. A amostragem utilizada foi de 5 furos para cada corpo de prova. Os resultados são apresentados no apêndice F em termos de média das medições, desvio padrão e amplitude, para todos os testes realizados no presente trabalho.

As figuras 5.40, 5.41, 5.42 e 5.43 apresentam, respectivamente, os gráficos com diâmetro, erro de posição, perpendicularidade e cilindricidade medidos nos furos gerados. Como o objetivo observar a dispersão dos valores, foi utilizado gráfico do tipo *boxplot*.

Nesses gráficos observa-se que a dispersão dos resultados variou bastante entre os testes. Para os erros de posição, perpendicularidade e cilindricidade dos testes com metal-duro, e Teste E foram similares, porém os resultados para os testes B e com PCBN integral, a dispersão foi bastante inferior.

A amplitude, para valor de diâmetro, é compreendida como a diferença entre o maior e menor valor medido. Já os erros de posição, cilindricidade e perpendicularidade são falhas de fabricação indesejáveis, e por isso não possuem limite inferior de especificação (ou pode ser entendido como zero). Para essas medições, a amplitude é o maior valor medido para cada erro.

Quando se trata de produção seriada é muito importante entender a capacidade de uma ferramenta manter dimensões ou erro de forma dentro de um campo de tolerância. Para isso, pode-se de forma mais simples estudar a amplitude dos valores obtidos em uma determinada grandeza e compará-la a faixa de tolerância do produto. Outra alternativa, utilizada especialmente para produção em larga escala, é a análise estatística, calculando-se índices de capacidade do processo.

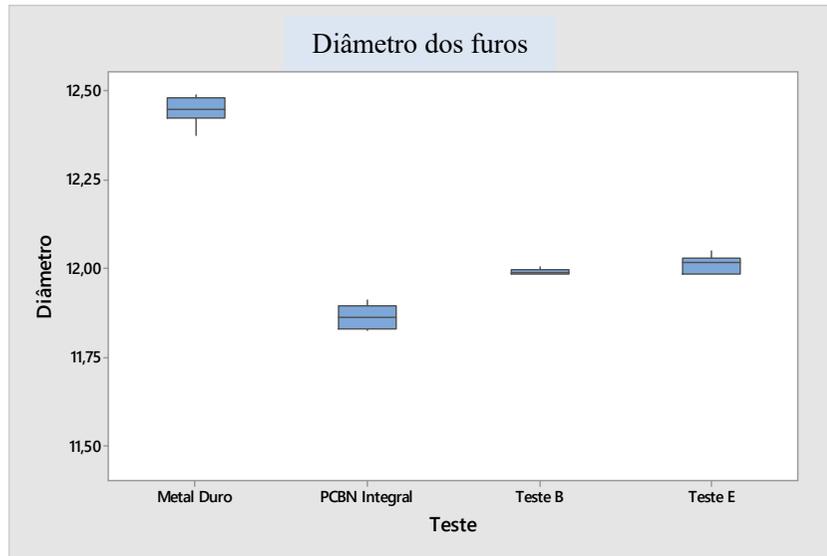


Figura 5. 40 – Dispersão dos valores de diâmetro dos furos usinados
Diâmetros das brocas: Metal-duro: 12,50 mm; PCBN: 11,90 mm; Teste A e Teste E: 12 mm.

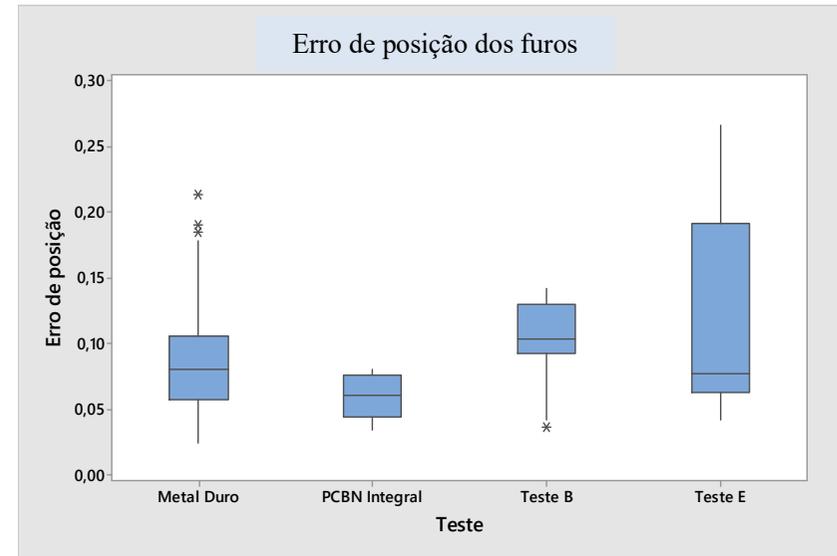


Figura 5. 41 - Dispersão dos valores de erro de posição dos furos usinados

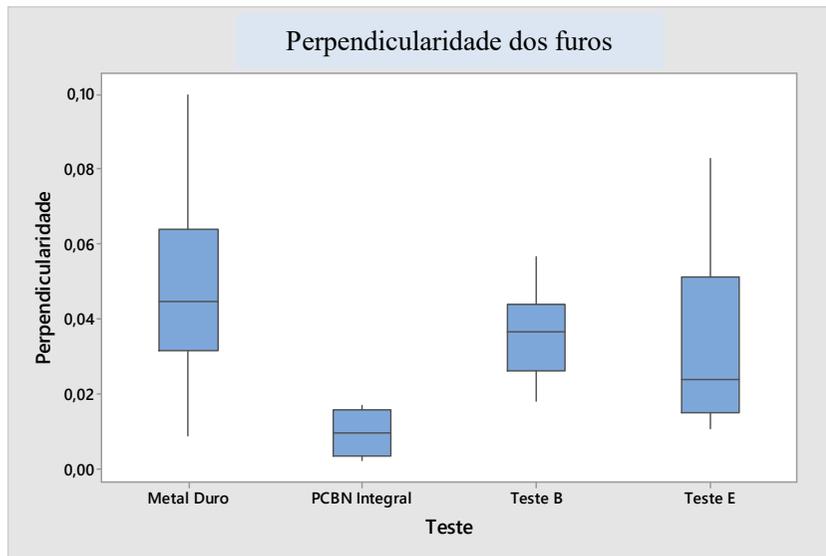


Figura 5. 42 - Dispersão dos valores de perpendicularidade dos furos usinados

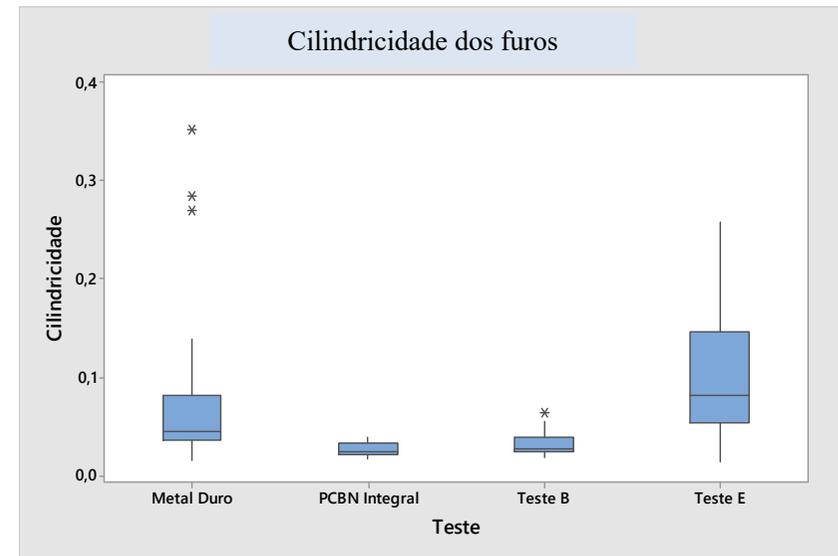


Figura 5. 43 - Dispersão dos valores de cilindridade dos furos usinados

Na primeira abordagem citada, analisa-se a amplitude dos valores medidos num experimento ou processo, para qualquer grandeza, estimando o campo de tolerância que a ferramenta pode atender. Grandes amplitudes significam que a ferramenta possui pouca estabilidade e conseqüentemente não atendem a campos de tolerância pequenos, e o inverso é verdadeiro.

Caso se opte por essa abordagem, baseada na amplitude, para analisar os resultados obtidos, observa-se, por exemplo, que a amplitude dos valores de diâmetro no teste B foi 3,7 vezes menor que a broca de metal-duro. Uma amplitude de 3,7 vezes menores nos valores de diâmetro medidos significa que se pode atender com a broca de PCBN *full face* uma tolerância 3,7 vezes menor do que com uma ferramenta de metal-duro.

Na tabela 5.10, calculou-se em termos percentuais, qual seria a variação do campo de tolerância baseado em amplitude de valores para cada um dos testes, em relação ao metal-duro.

Tabela 5. 10 - Variação percentual do campo de tolerância dos testes em relação ao teste com metal-duro, baseado na amplitude.

	Diâmetro	Erro de posição	Perpendicularidade	Cilindricidade
Teste B	-78,7%	-33,4%	-43,4%	-81,8%
Teste E	-38,2%	24,8%	-17,1%	-26,9%
Teste PCBN integral	-25,2%	-62,7%	-83,0%	-89,1%

Pelos resultados obtidos, entende-se que os conceitos de broca de PCBN testados indicam potencial a ser explorado, no que tange qualidade dimensional. No teste B, todos os valores apresentaram reduções significativas quando comparados ao metal-duro, chegando a 81,8% de redução para cilindridade. Isso significa, por exemplo, que a broca de PCBN poderia atingir campos de tolerância 7,3 vezes menor em cilindridade que as brocas comuns de metal-duro.

No teste E, as alterações percentuais foram aproximadamente 20% menores que com brocas de metal-duro. Comparando com o teste B, observa-se que os resultados foram inferiores. Isso se deve ao fato da broca ter apresentado entalhe entre os dois insertos de PCBN, o que gerou instabilidade durante o corte.

No teste com PCBN integral, todos os valores apresentaram melhora em relação ao metal-duro. Os valores de cilindridade chegaram a ser 89,1% melhores.

Caso se opte para análise dos resultados a abordagem baseada na análise estatística, pode-se utilizar como referência o índice de capacidade do processo (C_p):

$$C_p = \frac{LSE - LIE}{6\sigma} \quad (1)$$

Sendo LSE e LIE os limites superior e inferior de engenharia, respectivamente, e σ o desvio padrão. Pode-se entender a diferença entre os limites superior e inferior de engenharia como campo de tolerância T ($T = LSE - LIE$). Logo:

$$T = C_p \times 6\sigma \quad (2)$$

Segundo Montgomery e Runger (2003), o valor de C_p aceitável para considerar um processo como estável é 1,33. Pode-se então, a partir dos valores de desvio padrão encontrados (ver apêndice F) e da equação acima, comparar os campos de tolerância T para cada um dos testes.

O campo de tolerância para diâmetro de brocas de metal-duro calculado foi de $T = 0,230$ mm. Ou seja, essa broca atenderia, com $C_p = 1,33$, um campo de tolerância de 0,230. Já para a broca do teste B, a mesma grandeza foi calculada em $T = 0,059$ mm, ou 3,9 vezes menor. Se as mesmas contas forem feitas para a cilindricidade, vê-se que a broca do teste B atinge campo de tolerância 5,6 vezes menor.

Na tabela 5.11, calculou-se em termos percentuais, qual seria a variação do campo de tolerância baseado no estudo estatístico para cada um dos testes, em relação ao metal-duro.

Tabela 5. 11 - Variação percentual do campo de tolerância estimados dos testes em relação ao teste com metal-duro, baseado no estudo estatístico.

	Diâmetro	Erro de posição	Perpendicularidade	Cilindricidade
Teste B	-74,2%	-40,3%	-53,8%	-82,2%
Teste E	-12,2%	55,3%	-9,4%	-17,2%
Teste PCBN integral	6,3%	-67,0%	-76,1%	-90,9%

Todos os valores do teste B foram muito favoráveis, quando comparados ao metal-duro, com resultados similares ao comparativo baseado na amplitude.

Para o teste E, a redução dos campos de tolerância não foi significativa. Para o erro de posição, o resultado foi até inferior, devido à grande dispersão dos resultados o que eleva o valor do desvio padrão. Como já citado, isso se deve à instabilidade gerada na furação pelo entalhe formado na junção dos dois insertos.

A broca de PCBN integral apresentou bons resultados nos erros de forma, perpendicularidade e cilindricidade, com redução significativa em relação aos valores medidos no teste de metal-duro. Porém, o diâmetro apresentou valor maior de campo de tolerância estimado, o que poderia comprometer a utilização dessa broca em processos que se exijam tolerâncias de diâmetro menores que no metal-duro.

Conclui-se que, do ponto de vista dimensional, a broca de PCBN com inserto integral não apresenta resultados gerais superiores às brocas de metal-duro. Já a broca do teste B demonstra elevada capacidade de atingir valores muito superiores às brocas de metal-duro, indicando a possibilidade de utilização em substituição de furação e operações posteriores de acabamento. No teste E, devido ao entalhe, os resultados apresentaram instabilidade, principalmente no erro de posição cujo resultado foi superior ao metal-duro.

5.6.2 Rugosidade

Nessa seção serão apresentados e discutidos os valores de rugosidade medidos nos testes realizados.

Nas figuras 5.44 e 5.45 mostram os valores médios de rugosidade R_a e R_z , respectivamente. Os resultados completos estão no apêndice C.

Da mesma forma que na seção anterior, a análise na presente seção será baseada nos seguintes testes: broca de metal-duro, broca com inserto de PCBN integral, teste B e teste E.

Os furos obtidos com a broca de metal-duro apresentaram valor máximo de $R_a = 2,5 \mu\text{m}$. De acordo com a norma NBR 8404/1984, essa faixa de rugosidade pode ser classificada como N8. Esse valor é considerado baixo para os processos de furação e dentro da rugosidade típica de processos de torneamento. O valor máximo para o teste B foi de $R_a = 1,1 \mu\text{m}$. Essa faixa de rugosidade pode ser classificada de acordo com mesma norma como N7, valor típico encontrado em processos de fresamento em acabamento e alargamento, que é uma operação de acabamento.

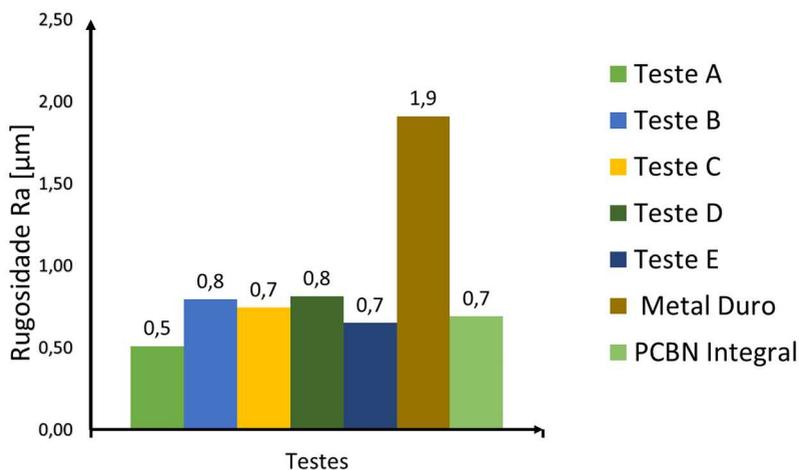


Figura 5. 44 - Valores médios de rugosidade R_a

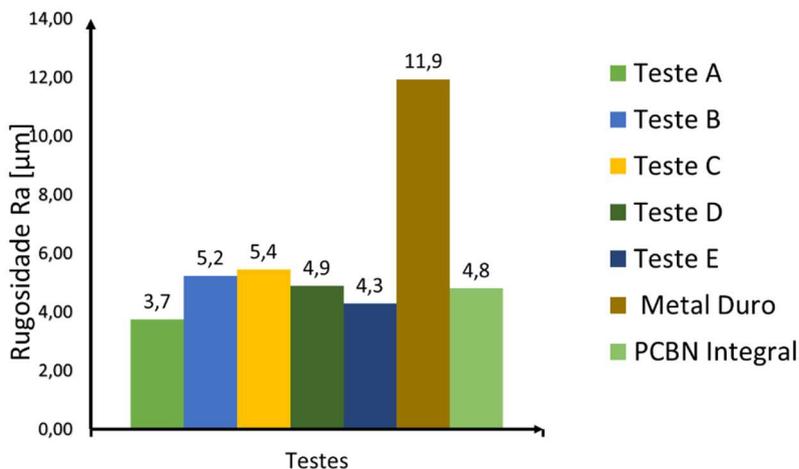


Figura 5. 45 - Valores médios de rugosidade R_z

O teste E obteve valores de rugosidade máxima $R_a = 0,8 \mu\text{m}$, classificada como N6, somente uma classe acima de N5, considerada como superacabamento (rugosidade menor que $0,4 \mu\text{m}$).

A rugosidade media nos testes com PCBN *full face* foi igual ou menor que 0,8 μm , muito abaixo da média de 1,9 μm das furações com metal-duro.

Os valores de rugosidade R_z também foram menores nos testes com PCBN do que nos com metal-duro. Enquanto o valor máximo dos testes em PCBN foi de 7,1 μm no teste B, o valor máximo da broca de metal-duro foi de 13,8 μm .

Observa-se que ambos os parâmetros indicam que as brocas com PCBN *full face* proporcionaram resultados superiores àqueles obtidos com metal-duro. Isso indica a possibilidade de utilização dessas brocas em substituição a operações de acabamento, muitas vezes necessárias após a furação.

Os baixos valores da rugosidade obtidos nos furos usinados nessa pesquisa também foram constatados na usinagem com PCBN nos trabalhos consultados – ver referencial teórico, seção 3.3.5. Os valores encontrados de R_z e R_a se mostraram similares aos obtidos por Saoubia *et al.* (2004) em torneamento, e aos de Brandt (2014) que também estudou furação. Os valores menores de rugosidade estão associados aos menores avanços utilizados e ao menor desgaste de quina apresentados pelo PCBN ao longo da vida da ferramenta.

5.7 ANÁLISE ECONÔMICA

Para o levantamento do custo de uma ferramenta é necessário considerar o preço de aquisição de ferramentas novas, preço da re-afiação, número de re-afiações possíveis e vida útil. É importante salientar que o preço considerado das brocas de PCBN se refere a compras em pequenos lotes, ao passo que nas brocas e alargadores, o preço considerado foi o de aquisição em grandes lotes e por empresa de grande porte do ramo de usinagem, que possui maior poder de negociação. Isso significa que, apesar de servir de referência, a comparação não é absoluta, pois as ferramentas não foram adquiridas com mesma base de formação de preço por parte do fornecedor.

Na tabela 5.12 são apresentados os custos estimados para uma vida de 100 metros de usinagem (seja furação ou alargamento). A vida por ferramenta para brocas de metal-duro e alargadores foi de 60 metros (vida média dessas ferramentas, informação cedida pela empresa parceira). O custo da ferramenta de PCBN foi estimado baseado na vida de ferramenta do teste B (29,26 metros).

Tabela 5. 12 - Levantamento de custos por operação, baseados em vida de 100 metros.

	Preço da ferramenta nova [R\$]	Preço da reafiação [R\$]	Número de reafiações	Custo para vida de 100m [R\$]
Metal duro	450	60	8	193,8
Alargador	600	80	5	333,3
PCBN <i>full face</i>	490	76	6	538,8

Ao se comparar o preço da ferramenta nova e afiações de PCBN *full face* com o a broca de metal-duro (tabela 5.12), observa-se que o custo de furação com ferramenta de PCBN *full face* é significativamente maior do que o metal-duro (R\$ 538,80 contra R\$ 193,80). Todavia, a vida da ferramenta de PCBN é metade da ferramenta de metal-duro. Isso implica custos muito maiores para furação com PCBN. Logo, pode-se afirmar que a furação com ferramentas de PCBN *full face* em substituição a ferramentas de metal-duro, onde esse atende as exigências de qualidade do furo é inviável economicamente.

Outra análise econômica pode ser feita, considerando uma furação com exigência de erros geométricos, cujas tolerâncias sejam menores que as atingidas por ferramentas de metal-duro. Em aplicações gerais, essa exigência seria atingida com aplicação de ferramentas de acabamento, geralmente alargadores. Seriam necessárias assim duas ferramentas para realizar essa furação. Caso os valores de erros geométricos obtidos pela ferramenta de PCBN atinjam às exigências do furo, outra análise econômica poderia ser feita, considerando eu somente essa ferramenta faria o papel das duas citadas anteriormente. A broca de PCBN *full face*, dessa forma, faria as operações de furação e acabamento. Somando o custo da broca de metal-duro e do alargamento para 100 metros de vida, chega-se ao valor de R\$ 527,10. O valor para mesma vida, com furação com PCBN é ligeiramente maior, R\$ 538,8. Lembrando as considerações sobre a formação de preço feita no começo dessa seção, conclui-se que se aplicada em escalas maiores, as brocas de PCBN *full face* são viáveis economicamente.

Os ganhos potenciais provenientes da redução do número de ferramentas gerenciadas e reduções nos tempos de ciclo, por serem necessárias menos ferramentas em processo não foram considerados no levantamento de custos, pois esses ganhos potenciais variam conforme a

estrutura, forma de gerenciamento, tipo de produto e equipamento utilizado no processo. Pelo mesmo motivo, não se mensurou financeiramente o retorno oriundo da maior taxa de remoção de material da ferramenta de PCBN *full face*. Os parâmetros de corte utilizados no teste com esse material, $v_c = 450$ m/min e $f = 0,1$ mm, resultam numa taxa de remoção aproximadamente 50% maior do que no teste com metal-duro integral, que utilizou $v_c = 100$ m/min e $f = 0,3$ mm.

6 CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

6.1 CONCLUSÕES

O objetivo deste trabalho foi o estudo da viabilidade técnica e econômica das brocas com pontas de PCBN. Para isto, os conceitos de brocas propostos foram submetidos a testes de usinagem e analisados os resultados de desgaste e avarias das ferramentas, assim como a qualidade dos furos obtidos.

Para conclusão sobre viabilidade de utilização, os resultados dos testes realizados com brocas de PCBN foram comparados com teste similar em brocas de metal-duro, por ser esse o material muito utilizado na produção seriada de peças em ferro fundido cinzento.

De forma geral, os resultados encontrados evidenciaram que a limitação da aplicação das brocas de PCBN em furação é dada pela quebra prematura da ponta desse tipo de ferramenta. Brandt (2014) atribuiu o fim de vida das brocas de sua pesquisa à mesma causa. Segundo Schroeter e Weingaertner (2002), na furação a velocidade é nula no centro da broca e baixa em suas proximidades, além de possuir ângulos de saída negativos na mesma região. Tais características ocasionam grande sollicitação mecânica na região da ponta, fatores estes que aliados a menor tenacidade do PCBN, comparado a outros materiais utilizados, resultam na referida quebra prematura.

Outro fator a ser considerado na avaliação das brocas é o efeito que as variações da velocidade de corte proporcionam sobre o desgaste. Abele, Sahm e Schulz (2002), observaram em seus experimentos diminuição do desgaste com o aumento da velocidade de corte. O estudo de Gastel *et al.* (2000) apresenta informações que corroboram as apresentadas pelos autores anteriormente citados. Esse comportamento do desgaste, aparentemente anômalo, também foi constatado nos testes de furação realizados no presente trabalho. Nos testes com PCBN *full face*, o teste B, que utilizou velocidade de corte de 450 m/min, obteve vida de ferramenta 2,3 vezes maior que o teste A, realizado com 300 m/min, evidenciando os efeitos positivos de velocidades de corte maiores sobre o desgaste e vida da ferramenta. Mesmo efeito da velocidade sobre o desgaste foi observado na furação com PCBN integral: ao longo do gume principal o desgaste aumenta em diâmetros menores, onde as velocidades de corte também são menores. Pôde observar-se também que em todos os experimentos, quando analisadas regiões do gume próximo ao diâmetro externo, onde as

velocidades de corte são maiores, o desgaste foi menor, sendo imperceptível em muitos deles.

No conceito de PCBN *full face*, outro ponto da broca que apresentou desgaste excessivo foi à junção entre os dois insertos. As baixas velocidades de corte, associadas ao espaço entre os dois insertos onde não existia corte, fez com que se formasse entalhe. A primeira consequência desse entalhe é a instabilidade da furação, visto que a junção está presente em somente um dos lados da ferramenta. A segunda consequência é o aumento de forças de corte sobre esse ponto do gume, que somado ao fato dos valores relativamente baixos de tenacidade, ocasionando o lascamento da broca a partir desse ponto.

Os trabalhos de: Taylan, Çolak e Kayacan (2011) e de Malakizadi, Sadick e Nyborg (2013), apontaram que o principal dano sofrido pelas ferramentas de PCBN durante a usinagem é o lascamento, não sendo significativo o desgaste ocasionado pela abrasão e difusão no gume. Nos testes realizados no presente trabalho o desgaste do PCBN também foi baixo e o fim de vida ocorreu devido ao lascamento da ferramenta. A exceção ocorreu na Prova 1, onde se utilizou PCBN de baixa dureza e ocorreu desgaste abrasivo.

A brasagem do inserto no corpo da broca é outro fator que se observou como influente nos resultados obtidos nesta pesquisa, porém, carece ainda de análise mais específica e detalhada. Caso durante o processo de brasagem o posicionamento dos insertos não seja adequado, pode-se formar uma região do gume sem material de corte. Comparando os resultados entre os testes E e B, vê-se que a vida da ferramenta foi 35% menor do primeiro em relação ao segundo teste, mesmo não havendo diferenças entre os parâmetros de corte. Essa variação de vida da broca foi atribuída às variações do processo de brasagem. Quando se analisam as quebradas ocorridas no Teste B e Prova 1, vê-se que nesses testes a quebra arrancou total ou parcialmente o inserto do corpo da ferramenta, mostrando falta de pontos de ancoragem na brasagem.

Outros fatores relacionados à geometria da broca que influenciaram os resultados não são descartados, permanecendo assim como oportunidade de assunto para trabalhos futuros. Os experimentos com brocas de inserto de PCBN *full face* ocorreram todos com a mesma geometria, impossibilitando a identificação da influência dessa na vida de ferramenta ou qualidade do furo, apesar dos resultados de Brandt (2014) indicarem que ela existe. Nos experimentos com brocas de insertos de PCBN integral, foram utilizadas apenas duas geometrias e encontrados resultados distintos no comportamento das brocas. Porém, é

necessário analisar outras geometrias adicionais para que respostas mais conclusivas possam ser encontradas.

Os parâmetros utilizados para avaliação geométrica dos furos foram: dimensão, erro de posição, cilíndricidade, perpendicularidade. Esses parâmetros variaram significativamente ao longo dos testes. Na Prova 1, com PCBN integral, os valores de perpendicularidade, circularidade e erro de posição foram, respectivamente, 83%, 89,1% e 62,7% menores que na furação com metal-duro, porém o diâmetro apresentou variação dimensional 25,2% maior, reduzindo possibilidade de utilização desse tipo de broca. Já no teste B, com insertos de PCBN *full face*, todos os parâmetros de avaliação geométrica apresentaram vantagens quando comparados ao metal-duro, o que denota a possibilidade desse conceito de broca substituir a furação e processos subsequentes de acabamento do furo com uma operação apenas.

As rugosidades medidas nos furos gerados com brocas de ponta de PCBN foram menores às obtidas na furação com metal-duro. Os valores de rugosidade R_a ficaram abaixo de 0,8 μm para os testes de PCBN *full face*, inferior à média de 1,9 μm para o teste com metal-duro. Redução similar foi observada no parâmetro de rugosidade R_z , no qual a média com brocas de PCBN ficou em torno de 5 μm , enquanto que para o metal-duro o valor foi de 11,9 μm . Da mesma forma que a avaliação geométrica, a rugosidade também indica potencial para as ferramentas de PCBN substituírem operações de acabamento.

A vida de ferramenta variou consideravelmente entre os testes. Nas ferramentas de PCBN integral, as provas 1, 2 e 3 apresentaram quebra da broca no primeiro furo. A Prova 1 furou apenas 5 metros, vida considerada excessivamente baixa se comparada à broca de metal-duro, cuja vida é em média de 60 metros. Isso inviabiliza a utilização desse conceito de broca. Nas brocas de PCBN *full face* as vidas dos testes A, C e D foram de: 12,6 - 2,9 e 0,8 metros de comprimento de furação, respectivamente. Essas são vidas de ferramenta consideradas baixas para qualquer aplicação industrial. No Teste B foi alcançada vida de 29,2 metros de comprimento de furação, resultado que, apesar de metade das brocas de metal-duro, é promissor se levado em consideração a qualidade superior dos furos gerados relação ao metal-duro.

Baseado no resultado de vida da ferramenta, conclui-se que a velocidade de corte indicada para furação em PCBN *full face* é 450 m/min, com avanço de 0,1 mm. Avanços maiores foram testados (0,13 mm), mas resultaram em quebra da broca. Sobre parâmetros de corte para insertos integrais, bem como classe de inserto e geometria da broca

não se obteve resultado conclusivo, devido às vidas de ferramenta extremamente baixas.

Finalmente, afirma-se que as brocas de PCBN integral com geometria, composição e parâmetros de corte utilizados, não possuem viabilidade técnica de aplicação nos parâmetros e classe de PCBN testados. As brocas de PCBN *full face* podem ser viáveis tecnicamente devido à alta qualidade do furo gerado e vidas de ferramenta intermediárias. Porém, sua viabilidade para aplicação em escala ainda está condicionada à criação de métodos estáveis de brasagem em série.

A viabilidade econômica está condicionada à utilização da broca de PCBN *full face* em uma única operação, em substituição a duas operações: furação com metal-duro e alargamento. Para que isso ocorra, a qualidade requerida do furo deve estar dentro dos parâmetros de qualidade estipulados para a broca (seções 5.5.1 e 5.5.2).

6.2 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

A seguir serão apresentadas sugestões para trabalhos futuros, visando aprimoramento da utilização de ferramentas de PCBN para furação:

- Estudo da influência da geometria, velocidade de corte e material do gume transversal na vida de ferramenta e erros geométricos;
- Desenvolver metodologia para caracterização de insertos de PCBN: microestrutura, composição e propriedades mecânicas;
- Desenvolver técnica brasagem padronizada para produção em escala de ferramentas de PCBN;
- Técnica de avaliação de qualidade de brasagem, visando evitar instabilidade de broca em operação.

REFERÊNCIAS

- ABELE, E.; SAHM, A.; SCHULZ, H. **Wear Mechanism when Machining Compacted Graphite Iron**. CIRP Annals - Manufacturing Technology, v.51, p.53-56, 2002.
- AMERICAN SOCIETY FOR METALS. **Metals Handbook: Atlas of Microstructure of Industrial Alloys**. 8 e.d. Ohio. 1972.
- AMERICAN SOCIETY FOR METALS. **Metals Handbook: Machining**. 9 e.d. Ohio. 1995.
- ANDRADE, C. L. F. de. **Análise da furação de ferro fundido vermicular com brocas de metal-duro de canais retos revestida com TiN e TiAlN**. 2005. 153 p . Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2005.
- ANGSERYD, J.; OLSSON, E.; ANDRÉN, H. **Effect of workpiece sulphur content on the degradation of a PCBN tool material**. International Journal of Refractory Metals and Hard Materials. v.6, p. 675-680, 2011.
- ARSECULARATNEA, J. A.; ZHANGA, L. C.; MONTROSSB, C. **Wear and tool life of tungsten carbide, PCBN and PCD cutting tools**. International Journal of Machine Tools & Manufacture n. 46 p. 482–491, 2006.
- BARBOSA, L. M.; MIRANDA, G. W. A. **Monitoramento do comportamento da broca chamdrill na usinagem do ferro fundido cinzento**. 2005. Universidade de Taubaté. São Paulo, 2005.
- BOBROVNITCHII, G.; SKURY, A. L. D.; FILGUEIRA, M.; TARDIM, R. C. **Pastilhas de cBN para aplicação em usinagem de aços temperados**. V Congresso Brasileiro de Engenharia de Fabricação - COBEF, Belo Horizonte, 2009.
- BOEHS, L. **Influência do Sulfeto de Manganês na Usinabilidade do Ferro Fundido Maleável Preto Ferrítico**. 1979. 105 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Programa de Pós-graduação em

Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 1979.

BRANDT, S. **Desenvolvimento de brocas de canal reto com ponta de PCBN para furação em ferro fundido cinzento**. 2014. 91 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Instituto Superior Tupy, Joinville, 2014.

CALLISTER, W. D. J. **Fundamentals of Materials Science and Engineering: An Integrated Approach**. 8 ed. New York: John Wiley&Sons, Inc., 2009.

CONTRERAS, O. F.; CARRILLO, J.; ALONSO, J.; **Local Entrepreneurship within Global Value Chains: A Case Study in the Mexican Automotive Industry**. World Development. v.40, n.50, p.1013- 1023, 2012.

DIAS, L. R. M. **A Influência do Teor Relativo Perlita/Ferrita na Usinabilidade do Ferro Fundido Cinzento**. 2011. 149 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Programa de Pós - Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2011.

DIN 1412: **Spiralbohrer - Begriffe**. Deutsches Institut für Normung (Hrsg.), Berlin: Beuth Verlag, 1966.

DINIZ, A. E.; MARCONDES, F. C.; COPPINI, N. L., **Tecnologia da usinagem dos materiais**. 1 ed. São Paulo: MM Editora., 1999.

DUCKWORTH, W. E. **Statistical techniques in technological research: An aid to research productivity**. 1 ed. London: Methuen and Company Ltd, 1968.

GASTEL, M.; KONETCHNY, C.; REUTER, C.; FASEL, C.; SCHULZ, H.; RIEDEL, R.; ORTNER, H. M. **Investigation of the Wear Mechanism of Cubic Boron Nitride Tools used for the Machining of Compacted Graphite Iron and Grey Cast Iron**. International Journal of Refractory Metals & Hard Materials. v.18, p.287-296, 2000.

GODOY, V. A. A.; DINIZ, A. E. **Turning of interrupted and continuous hardened steel surfaces using ceramic and CBN cutting tools.** Journal of Materials Processing Technology n. 211, p.1014–1025, 2011.

GUESSER, W. L. **Propriedades mecânicas dos ferros fundidos.** São Paulo: Editora Blucher, 2009.

GÜHRING. Catálogo de produtos - **Superhard tool materials.** Disponível em: <<http://www.guhring.com>>. Acesso em: 6 de maio de 2015.

KATOA, H.; SHINTANIA, K.; SUMIYAB, H. **Cutting performance of a binder-less sintered cubic boron nitride tool in the high-speed milling of gray cast iron.** Journal of Materials Processing Technology. v. 127 p. 217–221, 2002.

KENNEDY, B. The Straight Story: When the application is appropriate, straight-flute drills outperform twist drills. **Cutting Tool Engineering Magazine.** n. 1, v.58, 2006.

KHAIDER, B.; MOHAMED, A. Y.; SAMIR, K.; SALIM, B. **Analysis and optimization of hard turning operation using cubic boron nitride tool.** Journal of Refractory Metals and Hard Materials. n. 45, p. 160-178, 2014.

KÖNIG, W.; NEISES, A. Wear mechanisms of ultrahard, non-metallic cutting materials **Wear - An International Journal on the Science and Technology of Friction, Lubrication and Wear.** p. 12-21. v. 162-164, 1993.

LIEW, W. Y. H.; NGOI, B. K. A.; LU, Y. G. **Wear characteristics of PCBN tools in the ultra-precision machining of stainless steel at low speeds.** **Wear - An International Journal on the Science and Technology of Friction, Lubrication and Wear.** v. 254, p. 265–267, 2002.

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

MACHADO, A. R.; SILVA, M. B. **Usinagem dos Metais – LEPU – Laboratório de Ensino e Pesquisa em Usinagem –UFU – Uberlândia, 8ª versão, 2004.**

MALAKIZADI, A.; SADIK, I.; NYBORG, L. **Wear mechanism of CBN inserts during machining of bimetal aluminum-grey cast iron engine block.** 14th CIRP Conference on Modeling of Machining Operations. v.8, p. 188-193, 2013.

MOCELLIN, F. **Avaliação da usinabilidade do ferro fundido vermicular em ensaios de furação.** Florianópolis, 2002. 97 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2002.

MONTEIRO, S. N.; SKURY, A. L. D.; AZEVEDO, M. G.; BOBROVNITCHIIB, G. S. **Cubic boron nitride competing with Diamond as a superhard engineering material – an overview.** Journals of material research and technology. v.2, ed.1, p. 68-74, 2013.

MONTGOMERY, D. C.; RUNGER, G. C. **Applied Statistics and Probability for Engineers.** 3 ED. New York, NY: John Wiley and Son, 2003.

PEREIRA, A. A. **Influência do teor de enxofre na microestrutura, nas propriedades mecânicas e na usinabilidade do ferro fundido cinzento.** 2005. 141 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2005.

ORTNER, H. M.; ETTMAYER, P.; KOLASKA H.; SMIDD, H. **The history of the technological progress of hardmetals.** International Journal of Refractory Metals and Hard Materials. v. 44, p. 148- 159, 2014.

ROSINSKI, M.; MICHALSKI, A. **WCCO/CBN composites produced by pulse plasma sintering method.** Journal of Materials Science. v. 47, Issue 20, p. 7064-7071, 2012.

SAOUBIA, R. M.; CZOTSCHERA, O.; ANDERSSON, O.; MEYERB, D. **Machinability of powder metallurgy steels using PcBN inserts.**

Procedia CIRP - 6th CIRP International Conference on High Performance Cutting. v. 14, p. 83-88, 2014.

SCHROETER, R. B.; WEINGAERTNER, W. L. **Tecnologia da Usinagem com Ferramentas de Corte de Geometria Definida**. Traduzido por Prof. Dr. Eng. Rolf Bertrand Schroeter e Prof. Dr.-Ing. Walter Lindolfo Weingaertner do livro “Fertigungsverfahren –Drehen, Bohren, Fräsen”, de Prof.Dr.-Ing. Dr. h.c.mult. Wilfried König e Prof. Dr.-Ing. Fritz Klocke. Florianópolis, 2002.

SECHI, Y.; TSUMURA, T.; NAKATA, K. **Dissimilar laser brazing of boron nitride and tungsten carbide**. Materials and Design Journal. n. 31, p. 2071–2077, 2012.

SECO. **Technical Guide PCBN application**. Disponível em <<http://www.secotools.com>>. Acesso em 06 de maio de 2015.

SRIVASTAVA, A. K.; FINN, M. E. **Machinability of Cast Iron**. Techsolve – The Manufacturing Solutions Center, Cincinnati, Ohio, 2003.

STAHL, J. **Metal cutting, theories and models**. Sweden: Seco tools, 2012.

STEMMER, C. E. **Ferramentas de corte II: brocas, alargadores, ferramentas de roscar, fresas, brochas, rebolos, abrasivos**. 2 e.d. Florianópolis: Editora da UFSC, 1995.

STOETERAU, R. L. **Processo de Furação**, Apresentação de aulas, UFSC, Disponível em: <<http://www.lmp.ufsc.br/disciplinas/emc5240/Aula-17-U-2007-1-furacao.pdf>>. Acesso em: Abril de 2015.

TAYLAN, F.; ÇOLAK, O.; KAYACAN, M. C. **Investigation of TiN Coated CBN and CBN Cutting Tool Performance in Hard Milling Application**. Journal of Mechanical Engineering. n.57, p. 417-424, 2011.

TÖNSHOFF, H. K.; KÖNIG, W.; NEISES, A. **Machining of holes: development in drilling technology**. CIRP Annals - Manufacturing Technology. v. 43, p. 551-561, 1994.

TUPY, site da empresa Tupy S/A. Disponível em: <<http://www.tupy.com.br/portugues/produtos/automotivos.php>> Acesso em: 06 de janeiro de 2016.

TURINO, C. E. **Redução de estoque de ferramenta de corte sem comprometimento da produtividade do chão-de-fábrica**. 2002. 143 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção) – Programa de Pós-graduação em Engenharia de Produção, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2002.

UHLMANN, E.; BRÄUER, G.; WIEMANN, E.; KEUNECKE, M. **CBN coatings on cutting tools**. Annals of the German Academic Society for Production Engineering. n.1, p. 45-48, 2004.

VENTURA, C. E. H.; KÖHLER, J.; DENKENA, B. **Cutting edge preparation of PCBN inserts by means of grinding and its application in hard turning**. CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology n. 6, p. 246–253, 2013.

YALLESE, M. A.; CHAOU, K.; ZEGHIB, N.; BOULANOUAR, L.; RIGAL, J. F. **Hard Machining of Hardened Bearing Steel Using Cubic Boron Nitride Tool**. Journal of Materials Processing Technology. v. 209, n. 2, p. 1092- 1104, 2009.

APÊNDICE A – Composição química do material dos corpos de prova

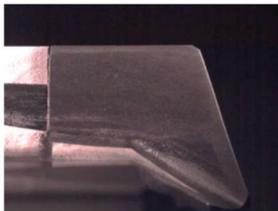
Composição química - Espectrômetro de emissão ótica

	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ti	B	Sn	Cu	Pb
Média	3,42	2,11	0,61	0,04	0,12	0,28	0,01	0,00	0,13	0,28	0,00
Desvio Padrão	0,02	0,02	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	Bi	Al	Mo	Mg	Sb	Ni	Nb	Zn	V	As	N
Média	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,02	0,00	0,02	0,01	0,00	0,01
Desvio Padrão	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00

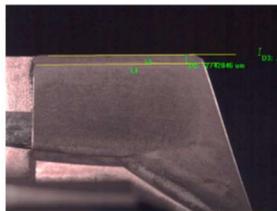
Fonte: AUTOR

APÊNDICE B – Acompanhamento da broca nova

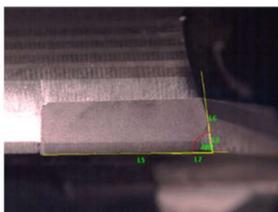
Broca da Prova 1 – Afição Mapal



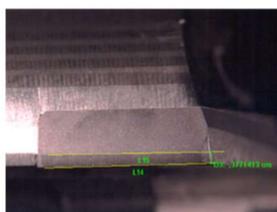
a)



b)

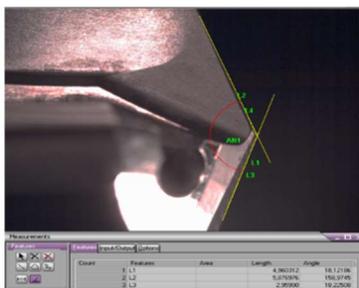
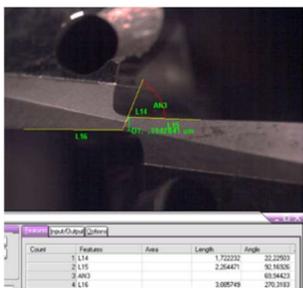


c)



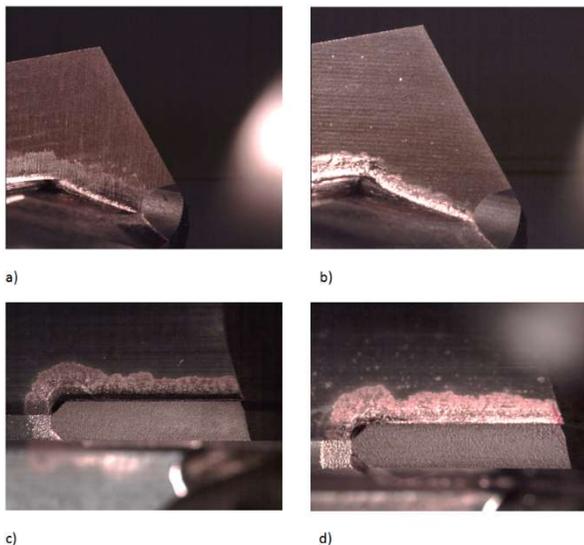
d)

a) e b) Gume. c) e d) guia

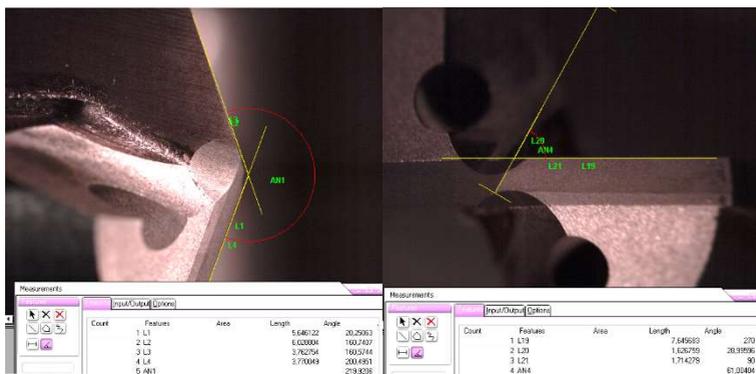


Medição do ângulo de posição do gume transversal (esquerda) e ângulo de ponta (direita)

Broca da Prova 2 – Afiação Brandt

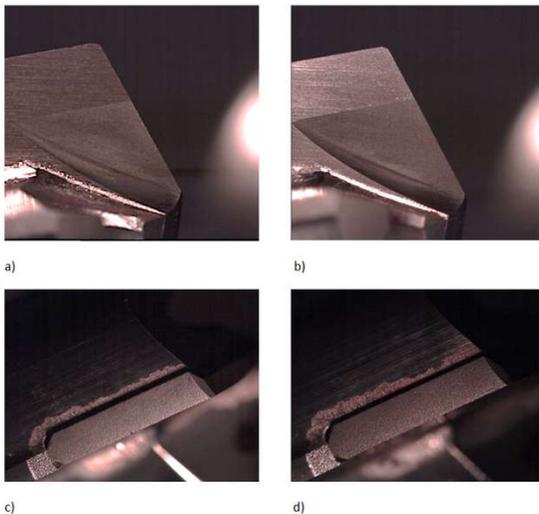


a) e b) Gume. c) e d) guia

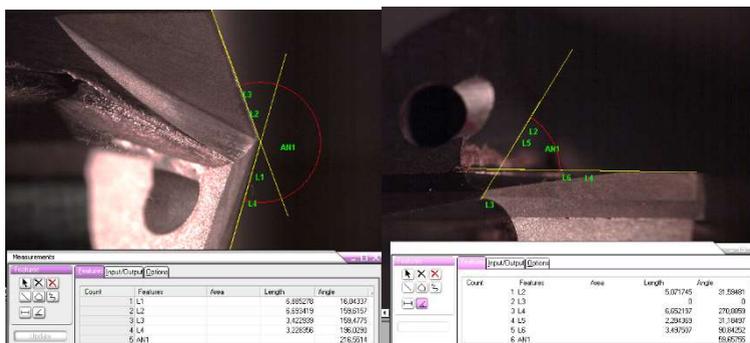


Medição de ângulo de ponta (esquerda) e ângulo de posição do gume transversal (direita).

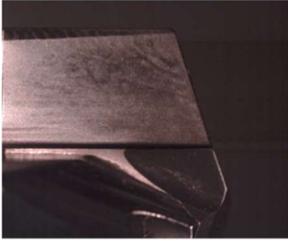
Broca da Prova 3 – Afição Mapal



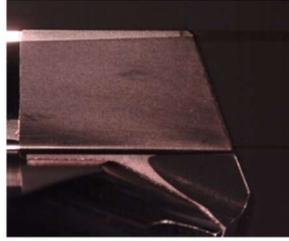
a) e b) Gume. c) e d) guia



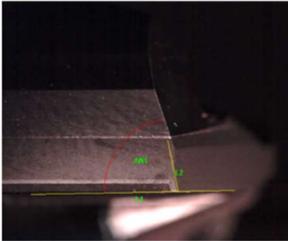
Medição de ângulo de ponta (esquerda) e ângulo de posição do gume transversal (direita).

Broca da Prova 1 – Afição Brandt

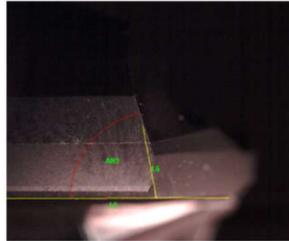
a)



b)

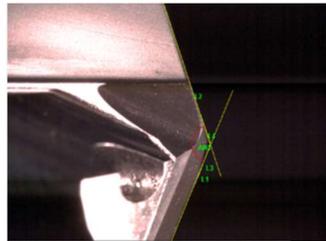
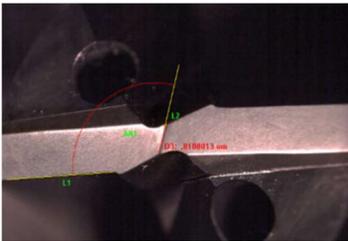


c)



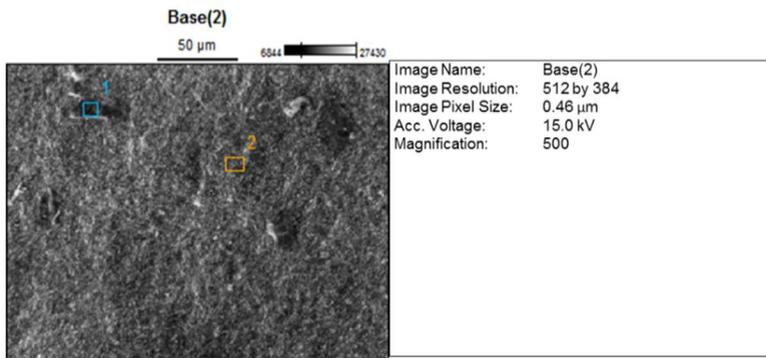
d)

a) e b) Gume. c) e d) guia



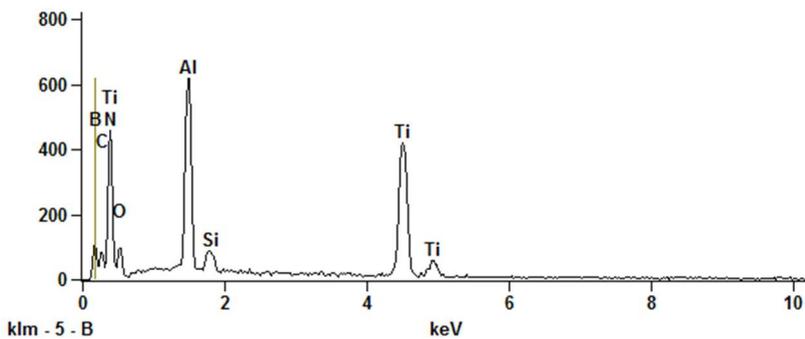
Medição de ângulo posição do gume transversal (esquerda) e ângulo de ponta (direita).

APÊNDICE C - Composição química PCBN por MEV



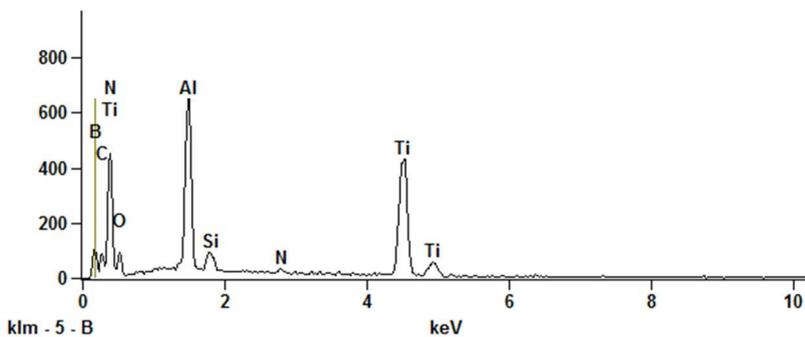
Full scale counts: 618

Base(2)_pt1



Full scale counts: 649

Base(2)_pt2



Composição química do inserto classe FU820

Elemento	Peso [%]			Número de átomos [%]		
	1º Ponto	2º Ponto	Média	1º Ponto	2º Ponto	Média
B	9,86	10,11	9,99	17,18	17,64	17,41
C	3,89	4,12	4,01	6,10	6,48	6,29
N	28,98	29,31	29,15	38,98	39,48	39,23
O	14,71	13,18	13,95	17,32	15,54	16,43
Al	10,99	11,39	11,19	7,67	7,97	7,82
Si	1,18	1,14	1,16	0,79	0,77	0,78
Ti	30,39	30,75	30,57	11,95	12,11	12,03

APÊNDICE D – Rugosidades medidas nos furos

		Rugosidade Teste A [μm]				
		1	2	3	4	Média
Placa 1	Ra	0,3	0,3	0,2	0,4	0,3
	Rz	3,0	3,1	1,8	3,1	2,7
		1	2	3	4	Média
Placa 2	Ra	0,986	0,662	0,7	0,552	0,725
	Rz	6,35	4,1	5,39	3,12	4,740
		Rugosidade Teste B [μm]				
		1	2	3	4	Média
Placa 1	Ra	0,3	0,3	0,2	0,4	0,3
	Rz	3,0	3,1	1,8	3,1	2,7
		1	2	3	4	Média
Placa 2	Ra	1,0	0,7	0,7	0,6	0,7
	Rz	6,4	4,1	5,4	3,1	4,7
		1	2	3	4	Média
Placa 3	Ra	1,3	1,0	0,6	1,1	1,0
	Rz	6,6	5,8	5,8	6,9	6,3
		1	2	3	4	Média
Placa 4	Ra	1,1	1,6	0,7	1,1	1,1
	Rz	6,4	11,4	5,3	5,5	7,1
		Rugosidade Teste C [μm]				
		1	2	3	4	Média
Placa 1 (1ª linha)	Ra	1,0	1,1	0,7	0,8	0,9
	Rz	6,2	8,7	5,1	4,2	6,1
Placa 1 (2ª linha)	Ra	0,4	0,8	0,4	0,8	0,6
	Rz	2,9	6,8	3,5	6,2	4,8
		Rugosidade Teste D [μm]				
		1	2	3	4	Média
Placa 1	Ra	0,9	1,0	0,9	1,0	1,0
	Rz	5,5	6,1	5,3	4,7	5,4
Placa 2	Ra	0,5	0,8	0,5	0,8	0,7
	Rz	3,1	7,0	3,8	3,6	4,4
		Rugosidade Teste E [μm]				
		1	2	3	4	Média
Placa 1	Ra	0,5	0,5	0,6	0,7	0,6
	Rz	3,1	5,0	4,1	3,2	3,9
		1	2	3	4	Média
Placa 2	Ra	0,6	1,3	0,7	0,5	0,8
	Rz	4,4	6,6	4,0	3,1	4,5
		1	2	3	4	Média
Placa 3	Ra	0,5	0,6	0,7	0,6	0,6
	Rz	3,8	4,8	4,9	4,4	4,5

		Rugosidade Prova 4 [μm]				
		1	2	3	4	Média
Placa 1 (1ª linha)	Ra	0,3	0,3	0,2	0,3	0,3
	Rz	3,0	3,1	1,9	3,1	2,8
Placa 1 (7ª linha)	Ra	0,9	0,7	0,6	0,6	0,7
	Rz	6,1	5,1	4,8	3,2	4,8

		Rugosidade Teste - Broca dupla [μm]				
		1	2	3	4	Média
Placa 1 (1ª linha)	Ra	0,3	0,2	0,2	0,3	0,2
	Rz	2,3	1,7	2,8	2,8	2,4
Placa 1 (2ª linha)	Ra	0,3	0,2	0,3	0,3	0,3
	Rz	3,6	2,3	3,5	3,0	3,1

		Rugosidade Metal Duro [μm]				
		1	2	3	4	Média
Placa 1	Ra	1,2	1,2	1,7	1,8	1,5
	Rz	8,5	8,5	12,9	13,1	10,8
		1	2	3	4	Média
Placa 2	Ra	2,0	2,2	2,2	2,6	2,3
	Rz	12,1	14,5	14,0	14,4	13,8
		1	2	3	4	Média
Placa 3	Ra	1,9	2,8	2,1	1,3	2,0
	Rz	11,7	15,1	11,7	9,9	12,1
		1	2	3	4	Média
Placa 4	Ra	2,4	2,4	1,8	2,2	2,2
	Rz	13,2	15,4	11,5	12,2	13,1
		1	2	3	4	Média
Placa 5	Ra	1,6	1,6	1,2	2,1	1,6
	Rz	10,4	9,2	12,0	10,8	10,6
		1	2	3	4	Média
Placa 6	Ra	1,7	1,1	1,6	1,5	1,5
	Rz	11,5	8,9	8,6	12,5	10,4
		1	2	3	4	Média
Placa 7	Ra	2,5	2,4	2,7	1,7	2,3
	Rz	15,4	13,4	11,7	11,0	12,9

APÊNDICE E – Controle da qualidade do fluido de corte

	Temperatura	pH	Concentração refratômetro	Concentração Real
Faixa de controle	20 a 25°C	8 a 10		7 a 9 %
16/05/2016	23	9,09	6,6	7,5
17/05/2016	23	9,11	6,9	7,8
18/05/2016	23	9,11	6,9	7,8
19/05/2016	23	9,12	6,8	7,7
20/05/2016	23	9,11	6,3	7,1
11/01/2016	24	8,87	6,8	7,7
12/01/2016	24	8,85	6,8	7,7
13/01/2016	24	8,89	6,5	7,3
14/01/2016	24	8,98	6,5	7,3
15/01/2016	24	8,95	7	7,9
14/12/2015	22	8,96	6,3	7,1
15/12/2015	25	9,02	6,3	7,1
16/12/2015	23	8,93	6,4	7,2
17/12/2015	23	8,99	6,5	7,3
18/12/2015	22	8,95	6,5	7,3
Média	23,3	9,0	6,6	7,5

Obs.: a concentração real é dada pela multiplicação do valor medido em refratômetro pelo índice de refração. No fluido utilizado, o índice de refração é 1,13

APÊNDICE F – Medições de diâmetro, posição, perpendicularidade e cilindricidade

Teste	Grandeza	Diâmetro [mm]	Erro de posição [mm]	Perpendicularidade [mm]	Cilindricidade [mm]
PCBN integral	Média	11,8623	0,0600	0,0094	0,0260
	Desv. Padrão	0,0304	0,0159	0,0056	0,0068
	Amplitude	0,0841	0,0797	0,0169	0,0383
Teste A	Média	11,9934	0,0632	0,0439	0,0406
	Desv. Padrão	0,0115	0,0145	0,0144	0,0184
	Amplitude	0,0346	0,0875	0,0648	0,0780
Teste B	Média	11,9896	0,1038	0,0358	0,0326
	Desv. Padrão	0,0074	0,0288	0,0108	0,0134
	Amplitude	0,0240	0,1422	0,0564	0,0640
Teste C	Média	11,9994	0,0878	0,0211	0,0308
	Desv. Padrão	0,0082	0,0208	0,0039	0,0034
	Amplitude	0,0217	0,1293	0,0286	0,0356
Teste D	Média	12,0322	0,0887	0,0421	0,0220
	Desv. Padrão	0,0008	0,0670	0,0024	0,0026
	Amplitude	0,0019	0,1690	0,0454	0,0244
Teste E	Média	12,0079	0,1223	0,0330	0,0987
	Desv. Padrão	0,0251	0,0749	0,0212	0,0624
	Amplitude	0,0695	0,2665	0,0827	0,2574
Teste MD	Média	12,4466	0,0902	0,0488	0,0760
	Desv. Padrão	0,0286	0,0482	0,0234	0,0754
	Amplitude	0,1125	0,2136	0,0997	0,3523
Teste "broca dupla"	Média	13,5512	0,1105	0,0054	0,0536
	Desv. Padrão	0,1745	0,0510	0,0013	0,0520
	Amplitude	0,4043	0,1985	0,0073	0,1436

ANEXO A – Propriedades mecânicas de diferentes materiais de ferramentas de corte

Propriedades do material da ferramenta	Aço rápido (M2)	Carboneto de tungstênio (M20)	Alumina branca	Alumina mista	Alumina reforçada com whisker	Cerâmica à base de nitreto de silício	PCBN	Diamante natural	PCD
Composição básica*	0,85%pC 4%pCr 5%pMo 6,5%pW 2%pV	80,5%pWC 10%pCo 9,5%pOutros	90-95% Al ₂ O ₃ 5-10% ZrO ₂	Al ₂ O ₃ 30% TiC 5-10% ZrO ₂	75% Al ₂ O ₃ 25% SiC	77% Si ₃ N ₄ 13% Al ₂ O ₃ 10% Y ₂ O ₃	98%CBN 2%AIB ₂ AlN		PCD 2-8% Co
Densidade (g/cm ³)	7,85	14,5	3,8-4,0	4,3	3,7	3,2	3,1	3,5	3,4
Dureza à TA (HV)	850	1600	1700	1900	2000	1600	4000	10000	8000-10000
Dureza à 1000°C (HV)	n.a.	≈400	650	800	900	900	≈1800	n.a.	n.a.
Resistência à fratura (MPa·m ^{1/2})	17	13	1,9	2	8	6	10	3,4	7,9
Condutividade e térmica (W/m °C)	37	85	8-10	12-18	32	23	100	900	560
Módulo de Young (kN/mm ²)	250	580	380	420	390	300	680	964	841
Coefficiente de expansão térmica (x10 ⁻⁶ /K)	12	5,5	8,5	8	6,4	3,2	4,9	1,5-4,8	3,8
Custo aproximado por barra** (US\$)	72,54 (barra 25x25x200 mm)	0,61	0,83	1,08	4,5	2,25	72-108	225-252	54-90

*por volume a menos que indicado.

**custo referente à ISO SNGN 120416

Fonte: Abrão *apud* Machado, Silva (2004)

ANEXO B – Análise do centro de usinagem

Segue análise utilizada no teste de usinagem. Foram analisadas as folgas nos eixos principais, além de pressão de fixação e batimento do eixo árvore. A coluna “medição” apresenta o valor real do equipamento e a coluna “limites” os valores de referência.

A análise foi feita pelo setor de Manutenção da empresa parceira.

EQUIP: 1006328		TAG: CU0223	
VERIFICAR FOLGA X Y Z	MEDIÇÃO	LIMITES	
FOLGA X:	0,002 mm	0,005 mm	
FOLGA Y:	0,002 mm	0,005 mm	
FOLGA Z:	0,015 mm	0,05 mm	
ANÁLISE DO EIXO-ÁRVORE			
PRESSÃO DE FIXAÇÃO:	810 Kgf	700 Kgf (mín)	
BATIMENTO:	0,008 mm	0,02mm	

ANEXO C- Afiação da broca de PCBN full face

CHAMFRO
0,2x45°
±0,05 ±2°

TOPO FACETADO
1ª SAIDA: 0,8x10°
2ª SAIDA: 25°

20°
20°
0,7 ±0,05
0,7 ±0,05
0,7 ±0,05
11,4 ±0,1

Este Desenho é propriedade da AFIATOOLS e não pode ser copiado ou transferido para 3ªs

LIBERADO DEFINITIVO		Vai Usinar: FOFO		Item: 20002596T	
<input type="checkbox"/> AF. / /	<input type="checkbox"/> EXCLUSIVO	Folha 1/1	Nº	Modificação	Data
<input type="checkbox"/> ASS. / /		Exatidão			
<input type="checkbox"/> FAB. / /					
<input type="checkbox"/> ASS. / /					
<input checked="" type="checkbox"/> REGISTRADO 15 / 02 / 16 FELIPE					
GRAVAR Código da Afiatools: Código do Cliente: Nº da OP:		Revestimento: sem Trat. Térmico: sem Dureza: sem		Descrição: BROCA MU+CBN Ø12X70X120 2CANAIS RETOS C/ R.L. Class. Fiscal:	
		MP DELES		Nº Des. Cliente	
				Des. 15 / 02 / 16 Aprov. / / Contato: Cliente Nº 329 Nº Des. AFIATOOLS:	

