

ALCIONE DOS REIS

**ESTUDO DO EMPREGO DE BROCA ESPECIAL EM
SUBSTITUIÇÃO AO ALARGADOR NA PRODUÇÃO
DE FUROS EM FERRO FUNDIDO VERMICULAR**



UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA

FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA

2014

ALCIONE DOS REIS

**ESTUDO DO EMPREGO DE BROCA ESPECIAL EM
SUBSTITUIÇÃO AO ALARGADOR NA PRODUÇÃO
DE FUROS EM FERRO FUNDIDO VERMICULAR**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Uberlândia, como parte dos requisitos para a obtenção do título de **MESTRE EM ENGENHARIA MECÂNICA**.

Área de Concentração: Materiais e Processos de Fabricação.

Orientador: Prof. Dr. Rosemar Batista da Silva

UBERLANDIA – MG

2014

“A vida nem sempre é como sonhamos, mas nem
sempre sonhamos o que queremos viver”

Alan Kardec

DEDICATÓRIA

*À minha querida esposa Fernanda,
e aos meus filhos Ítalo Bruno, Mariana e Maria Eduarda
pelo carinho e compreensão nos momentos mais
difíceis para realização deste trabalho.*

AGRADECIMENTOS

A Deus primeiramente, por sempre estar à frente de tudo e de todos os meus passos, me direcionando em todos os momentos difíceis desta caminhada, agradecendo-lhe esta oportunidade, na qual o Senhor sempre me concedeu a perseverança e o discernimento necessário para concretizar e vencer mais esta etapa da minha vida.

À Universidade Federal de Uberlândia e à Faculdade de Engenharia Mecânica, pela oportunidade de realizar este curso.

A CAPES, pela concessão da bolsa de mestrado e pelo apoio financeiro na realização deste projeto.

Ao Prof. Dr. Rosemar Batista da Silva, pela orientação, incentivo, compreensão, estímulo e principalmente paciência em transmitir a mim seus valiosos conhecimentos e por estar sempre à disposição no auxílio e direcionamento para realização deste trabalho, objetivando sempre o meu sucesso.

Aos Professores Dr. Alisson Rocha Machado, Dr. Marcio Bacci da Silva e ao Dr. Éder Silva Costa que ao longo desta caminhada me auxiliaram com seus conhecimentos e por estarem sempre prontos a transmitir o auxílio necessário para a realização deste trabalho.

Aos técnicos e colegas do Laboratório de Ensino e Pesquisa em Usinagem, pelo apoio e contribuição para desenvolvimento deste trabalho, e aos amigos Vanessa Rosa Aparecida, Armando Marques, Cleudes Guimarães, Douglas Scharff, Jairo Montalvão; e também ao aluno de iniciação científica Lucas Gonçalves pelo auxílio na medição e análise dos resultados dos desvios dimensionais e de cilindricidade.

Ao senhor Walgaranás Carneiro de Albuquerque pelo incentivo e apoio incondicional.

À minha família que sempre me apoiou nos momentos difíceis ao longo desta jornada, estando sempre presente em todos os momentos da minha vida e por sempre acreditar em mim: em especial a minha esposa Fernanda; aos meus filhos Ítalo Bruno, Mariana e Maria Eduarda, pelo amor incondicional; aos meus pais, Alci e Cleusa, pelo grande amor a mim dedicado e em especial a dona Celeste que sempre me apoiou e acreditou em mim.

REIS, A. **Estudo do Emprego de Broca Especial em Substituição ao Alargador na Produção de Furos em Ferro Fundido Vermicular**. 2014. 135 f. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia.

Resumo

Em muitas aplicações da indústria metal-mecânica exige-se a fabricação de peças com furos que apresentem acabamento e exatidão geométrica necessária para a montagem de precisão, normalmente com qualidade de trabalho variando entre ISO IT5-IT7. Mas para a produção destes furos de tolerâncias mais estreitas e com menores erros geométricos, as brocas helicoidais convencionais não são suficientes, de forma que são necessários processos subsequentes, como o alargamento, por exemplo. Antes de qualquer operação de alargamento vem à operação de furação, chamada de pré-furação, e assim para um furo alargado são necessárias no mínimo duas ferramentas diferentes, duas parcelas no tempo de usinagem, que por sua vez afeta a produtividade e competitividade. Portanto, qualquer investimento na produção de ferramentas e técnicas que permitam reduzir o tempo de usinagem de furos de tolerância estreita, sem afetar a integridade da superfície e de preferência com menor custo, receberá especial atenção da comunidade de usinagem. Neste contexto, este trabalho apresenta um estudo técnico e econômico do emprego de broca especial em substituição ao alargador, na produção de furos cilíndricos, de 10 mm de diâmetro, em peças de ferro fundido vermicular, em termos de acabamento, cilindricidade e desvio dimensional. Investigou-se também a influência do sobremetal na qualidade final do furo usinado pelo alargador. As paredes dos furos e a microdureza dos furos usinados foram também analisados e o desgaste das ferramentas foi monitorado. Por último, foi realizada a análise econômica das ferramentas empregadas. Os resultados mostraram que a broca especial resultou em acabamento e desvio dimensionais tão bons quanto aqueles produzidos pelo alargador. IT6 foi a qualidade obtida pelo alargador após furação com sobremetal de 0,5 mm, enquanto que a broca especial

produziu qualidade IT8. O desgaste da broca especial foi menor que aquele dos alargadores, sendo que para estes últimos ocorreu lascamento. Cerca de 29% de redução no tempo de usinagem foram obtidos com a broca especial, o que resultou em um custo de produção 33% menor. Em contrapartida os valores dos desvios de cilindridade foram superiores aqueles obtidos com os alargadores nas condições investigadas. A microdureza não foi afetada pelos processos empregados.

Palavras-chave: *Furação, Alargamento, Broca especial, Rugosidade, Cilindridade, Qualidade IT.*

REIS, A. **Study on the Use of Special Designed Drill in replacement by Reamer in the Production of Holes in Compacted Graphite Cast Iron.** 2014. 135 f. M.Sc. Dissertation, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, MG.

Abstract

In many applications of metalworking industry it is required mass production of parts containing holes with finish and tolerances typically from precision assembling, with working quality, ISO IT grade, ranging from IT7- IT5. But to produce these holes with tighter tolerances and with low geometrical errors, conventional twist drills may be not enough, so further processes are required, like reaming for example. Before any reaming process comes the drilling process, resulting in two different tools, two parts on necessary machining time, which in turn affects productivity and competitiveness. Therefore , any investment in the production of tools and techniques to reduce the machining time of close tolerance holes without affecting the integrity of the surface and preferably at a lower cost , will receive special attention from the machining community. In this context, this paper presents a technical and economic study of the use of special designed drill in replacement by a reamer the production of cylindrical holes of 10 mm diameter pieces of compacted graphite cast iron in terms of finish, roundness and dimensional deviation. It was also investigated the influence of the allowance in the final quality of the machined hole reamer. The surface of the holes and the microhardness of the machined holes were also analyzed and the tool wear was monitored. Finally, the economic analysis of the tools employed was performed. The results showed that special drill resulted in finish and dimensional deviation as good as those produced by the reamer. IT6 was the working quality obtained after reaming with reaming allowance of 0.5mm, while IT8 quality was obtained by using the special designed drill. Wear on special drill was lower than that observed in the reamer, and for the latter chipping occurred. Up to 29% of reduction in machining time was achieved by using the special drill, which resulted in a reduction of 33% cost as well. In contrast the values of cylindricity deviations were higher than those obtained with the reamers under the conditions investigated. The hardness was not affected by the processes employed.

Keywords: drilling, reaming, special designed drill, roughness, cylindricity, IT grade, reaming allowance.

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 - Processos de usinagem para fabricação de furos (Adaptado de Stoeterau, 2008).....	6
Figura 2.2 - Diferentes tipos de brocas para furação (Adaptado de Stemmer, 2005).....	7
Figura 2.3 - Nomenclatura da broca helicoidal (NBR ISO 3002-1: 2013).....	8
Figura 2.4 - Representação das condições cinemáticas na furação (Adaptado de Stoeterau, 2008).....	9
Figura 2.5 - Terminologia das brocas helicoidais (Mitsubishi Materials, 2013).....	9
Figura 2.6 - Ângulos de uma broca helicoidal: (a) Ângulo Hélice; (b) Ângulo Incidência; (c) Ângulo de Ponta (Stemmer, 2005).....	10
Figura 2.7 - Brocas de metal duro com quatro arestas de corte (Agapiou, 1993).....	12
Figura 2.8 - Tipos de geometrias das pontas de brocas de metal duro; (a) Ponta cônica; b) Ponta com ângulo axial (Tonshoff et al., 1994).....	13
Figura 2.9 - A influência da geometria e da ferramenta sobre Circularidade e qualidade IT (Tonshoff et al., 1994).....	13
Figura 2.10 - Broca especial de metal duro R840 1000 A1A com refrigeração interna (Bagci, 2004).....	14
Figura 2.11 - Brocas escalonadas de metal duro de diferentes diâmetros: (a) $\varnothing = 6$ mm; (b) $\varnothing = 10$ mm; (c) $\varnothing = 14$ mm utilizadas no trabalho de Xia (2004).....	14
Figura 2.12 - Brocas especiais com diferentes tipos de revestimentos (Noauri, 2005).....	15
Figura 2.13 – Broca com alívio da ponta e superfície modificada (adaptada de Wang, 2008).....	16
Figura 2.14 - Brocas com diferentes tipos de geometria - a) geometria com afiação em “S”; b) geometria com afiação em cruz e chanfro de proteção; c) geometria com ponta em raio (Oliveira, 2008).....	16

Figura 2.15 - Modelos de brocas helicoidais de metal duro utilizado - a) broca helicoidal sem alívio na aresta de corte transversal “Standard”; b) broca helicoidal com alívio na aresta de corte transversal “Tipo A”; c) broca helicoidal com alívio na aresta de corte transversal “Tipo C” (Boeira, 2010).....	17
Figura 2.16 - Detalhes e fotos da geometria das brocas de metal duro utilizadas por Machado (2011) para usinar ferro fundido cinzento GG25: a) broca de ponta cônica normal; b) broca de ponta esférica.....	18
Figura 2.17 – Exemplos de ferramentas com geometrias especiais dedicadas a produção de furos (Ferramentas MAPAL, 2014).....	19
Figura 2.18 - Broca especial modelo RT 100 P (Gühring do Brasil, 2013).....	19
Figura 2.19 - Broca RT 100 R (Gühring do Brasil, 2013).....	20
Figura 2.20 - Aspectos construtivos das brocas alargadoras (Ferramentas MAPAL, 2014).....	21
Figura 2.21 - Alargador de desbaste helicoidal com haste cônica (Stemmer 2005).....	22
Figura 2.22 - Divisão de passo em alargadores de acabamento (Adaptado de Stemmer, 2005).....	24
Figura 2.23 - Alargadores manuais e alargadores para máquina (Adaptado de Stemmer, 2005).....	24
Figura 2.24 - Sistema de referência para alargadores de acabamento. (Adaptado de Stemmer, 2005).....	25
Figura 2.25 - Erros comuns na geometria de furos (Konig, 1997 e SME, 1983 apud Yamada et al. 2010).....	28
Figura 2.26 - Tipos de brocas especiais (Sandvik, 2012).....	29
Figura 2.27 - Tipos de brocas especiais para furação profunda – relação L/D em função do diâmetro do furo (Sandvik, 2012).....	30
Figura 2.28 - Perfil efetivo de uma superfície (Agostinho, 1977).....	31
Figura 2.29 - Afastamento superior e inferior de tolerância t para eixo e furo (Sistemas de Tolerâncias e Ajustes, UFPR, 2012).....	32
Figura 2.30 - Definição de desvio de cilindridade (Adaptado de Lima Junior, 2009).....	34
Figura 2.31 - Exemplos de desvios de cilindridade: (a) Concavidade; (b) Convexidade; (c) Conicidade (Adaptado - Agostinho, 1977; Lima Junior, 2009).....	35
Figura 2.32 - Definição de Rugosidade R_a (Agostinho, 1977).....	36
Figura 2.33 - Definição de Rugosidade R_y (Agostinho, 1977).....	37

Figura 2.34 - Definição de Rugosidade R_z (Agostinho, 1977).....	37
Figura 2.35 - Principais áreas de desgaste de uma ferramenta de corte (Trent, 1982).....	39
Figura 2.36 - Formas desgaste de uma broca helicoidal (Costa et al., 2004).....	40
Figura 2.37 (a) - Comportamento da força de avanço, com a ferramenta em estado novo e em fim de vida, sem pré-furo; (b) - Comportamento da força de avanço, com ferramenta em estado novo e em fim de vida, com pré-furo (Bordim, 2008).....	41
Figura 2.38 - (a) Desgaste de flanco da broca na usinagem com aplicação de fluido em abundância; (b) Desgaste de flanco da broca na usinagem com aplicação de MQF. (c) Desgaste de flanco da broca na usinagem com aplicação de ar comprimido (Calza, 2005).....	42
Figura 2.39 - Desgaste de flanco em brocas de HSS: (a) com revestimento de TiN/TiCN e (b) com revestimento de TiN (Fávaro, 2007).....	43
Figura 2.40 - Broca de HSS com microlascamento na aresta de corte (Fávaro, 2007).....	43
Figura 2.41 - (a) desgaste de flanco; (b) desgaste de cratera em alargadores (Lugscheider, 1999).....	44
Figura 2.42 - Imagens do desgaste nas quinas da broca de Co-HSS com o revestimento do $Ti_{0.21} Al_{0.14} Cr_{0.65} N$: (a) estágio I (após 1 furo), (b) estágio II (após 20 furos) e (c) o estágio III (falha) (Harris, 2003).....	44
Figura 2.43 – Microestruturas dos principais tipos de ferros fundidos: a) ferro fundido cinzento x 500; b) ferro fundido nodular x 200; c) ferro fundido branco x 400; d) ferro fundido maleável x 150; (e) ferro fundido vermicular, com 95% grafita em forma de vermes e 5% grafita nodular; (f) e (g) Micrografias do ferro fundido vermicular (Adaptado de Callister Jr, 2000; Mocellin, 2002).....	48
Fig. 3.1- Fluxograma das etapas do procedimento experimental.....	53
Figura 3.2 - Vista dos Corpos de prova de ferro fundido vermicular (CGI).....	54
Figura 3.3 - Centro de usinagem vertical CNC Discovery 760.....	55
Figura 3.4 - Ferramentas de metal duro integral utilizado nos experimentos: (a) Broca de Ø9, 5 mm; (b) Broca de Ø9, 7 mm; (c) Alargador de Ø 10 mm; (d) Broca especial de Ø10 mm.....	56
Figura 3.5 - Desenho esquemático brocas helicoidais convencionais que foram utilizadas antes do processo de alargamento (utilizadas para abrir pré-furo); (a) Ø 9,7 mm, (b) Ø 9,5 mm (Iscar do Brasil, 2013) – reprodução autorizada.....	58

Figura 3.6 - Geometria do alargador cilíndrico de 10 mm de diâmetro: a) vista frontal, b) vista de topo, c) detalhes da aresta de corte (Iscar do Brasil, 2013) – reprodução autorizada.....	59
Figura 3.7 - Geometria e detalhes de fabricação da broca especial: a) vista frontal do projeto da broca de metal duro especial, b) Vista de topo e detalhe da geometria, c) detalhes das guias de corte (Iscar do Brasil, 2013) – reprodução autorizada.....	60
Figura 3.8 - Micrografia com detalhe para granulometria do material da ferramenta; (a) alargador cilíndrico de Ø10 mm; (b) broca especial de metal duro com Ø10 mm.....	61
Figura 3.9 - Sistema de fixação das ferramentas para o processo de usinagem com mandril hidromecânico.....	62
Figura 3.10 - Medição do batimento radial da broca especial com relógio comparador.	62
Figura 3.11 - Montagem de corpo de prova e mandril com ferramentas prontas para a usinagem; (a) processo de alargamento cilíndrico (b) processo de furação broca especial.....	64
Figura 3.12 - Estereomicroscópio SZ6145TR – OLYMPUS.....	65
Figura 3.13 - MEV de bancada modelo TM 3000, utilizado para visualização dos desgastes das ferramentas e identificação dos mecanismos de desgaste.....	66
Figura 3.14 - Máquina de Medir a Três Coordenadas, utilizada na medição do diâmetro dos furos.....	67
Figura 3.15 - a) Montagem do equipamento para medição da rugosidade; b) Medição da rugosidade do furo a 180° um do outro em relação ao diâmetro do furo.....	68
Figura 3.16 - Vistas da amostra no equipamento micro durômetro SHIMADZU HMV-2 Series.....	70
Figura 3.17 - Desenho esquemático dos pontos de endentação para medição de microdureza (HV).....	70
Figura 4.1 - Valores de rugosidade superficial R_a em função do número do furo.....	73
Figura 4.2 - Valores de rugosidade superficial R_y em função do número do furo.....	74
Figura 4.3 - Imagens da parede interna dos furos após os testes; a) alargamento do furo com sobremetal 0,5 mm; b) alargamento do furo com sobremetal 0,3 mm; c) furo com a broca de geometria especial.....	76
Figura 4.4 - Erro de forma (cilindricidade) dos furos após alargamento em função do diâmetro deixado pelas brocas de diâmetro 9,5 mm (sobremetal 0,5mm) e diâmetro 9,7mm (sobremetal igual a 0,3mm) e broca especial.....	78

Figura 4.5 - Desvio dimensional dos furos após processo alargamento cilíndrico em função do diâmetro deixado pelas brocas de diâmetro 9,5 mm (sobremetal 0,5mm) e diâmetro 9,7mm (sobremetal igual a 0,3mm) e broca especial de diâmetro 10 mm.....	80
Figura 4.6 – Valores da incerteza expandida U (mm), com uma probabilidade de abrangência de (95,45%).....	85
Figura 4.7 - Valores de desgaste de flanco máximo $VB_{Bmáx}$ em função do número de furos.....	87
Figura 4.8 - Arestas da broca de 9,5mm: (a) aresta 1, (b) aresta 2.....	88
Figura 4.9 - Aresta transversal de corte broca Ø 9,5 mm.....	88
Figura 4.10 - Arestas da broca de 9,7 mm: (a) aresta 1, (b) aresta 2.....	89
Figura 4.11 - Aresta transversal de corte broca Ø 9,7 mm.....	89
Figura 4.12 - Imagens das arestas de corte dos alargadores: a) superfície de folga-sobremetal= 0,5mm; b) superfície de folga sobremetal = 0,3mm; c) superfície de saída - sobremetal = 0,5mm; d) superfície de saída - sobremetal = 0,3mm.....	90
Figura 4.13 - Arestas da broca de Ø 10 mm: (a) aresta 1, (b) aresta 2.....	91
Figura 4.14 - Aresta transversal de corte broca especial Ø 10 mm.....	92
Figura 4.15 - Imagens obtidas no Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV) das superfícies das ferramentas desgastadas: a) vista da superfície de folga alargador após usinagem com broca de 9,5mm b) vista geral aresta de corte de alargador após usinagem com broca de 9,7 mm; c) vista da superfície de saída do alargador após usinagem com broca de 9,5mm; d) vista de aresta de corte da broca de 9,7mm; e) Aresta de corte 1 da broca especial; f) Aresta de corte 2 da broca especial.....	95
Figura 4.16 - Imagens das ferramentas desgastadas obtidas no Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV) para os alargadores cilíndricos (a) e (b) e da aresta principal de corte da broca com geometria especial (c).....	97
Figura 4.17 - Pontos de endentação para medição da microdureza (HV) após processo de alargamento cilíndrico utilizando sobremetal de 0,5 mm.....	98
Figura 4.18 - Valores de microdureza (HV) em ferro fundido vermicular em relação a distancia dos pontos de endentação após usinagem com diferentes ferramentas em diferentes condições de corte.....	100

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1- Fatores a serem considerados para escolha e, ou melhor, seleção da broca (Costa, 2004).....	30
Tabela 2.2 - Dicas práticas para soluções de problemas no processo de furação com brocas convencionais (Sandvik, 2012).....	46
Tabela 2.3 - Comparação das propriedades do ferro fundido vermicular e do ferro fundido cinzento (Adaptado de Mocellin, 2002).....	49
Tabela 3.1 - Características do ferro fundido vermicular (CGI) (fonte: Adaptado Viana, 2004).....	54
Tabela 3.2 - Composições químicas do ferro fundido vermicular e do ferro fundido cinzento (Adaptado de Mocellin, 2002).....	55
Tabela 3.3 - Descrição das ferramentas de corte utilizadas.....	57
Tabela 3.4 - Propriedades das ferramentas utilizadas nos testes.....	61
Tabela. 3.5 - Valores de batimento radial medidos para as ferramentas	63
Tabela 3.6 - Parâmetros de corte utilizados.....	64
Tabela 4.1 - Valores médios de rugosidades R_a e R_y	73
Tabela 4.2 - Resultados dos desvios de diâmetros obtidos após os ensaios.....	79
Tabela 4.3 - Análise de variância da distribuição t de Student.....	82
Tabela 4.4 - Avaliação da incerteza do diâmetro quando se empregou o alargador com pré-furo de sobremetal 0,5 mm.....	83
Tabela 4.5 - Avaliação da incerteza do diâmetro quando se empregou o alargador com pré-furo de sobremetal 0,3 mm.....	83
Tabela 4.6 - Avaliação da incerteza do diâmetro gerado pela broca especial.....	84
Tabela 4.7 - Valores de desgaste de flanco $VB_{Bmáx}$ para as diferentes ferramentas.....	86

Tabela 4.8 - Valores de microdureza (HV) medidos na superfície de entrada do furo em função das diferentes ferramentas empregadas.....	99
Tabela 4.9 - Avaliação do custo das ferramentas comparado com a qualidade de trabalho proporcionada.....	104

LISTA DE SÍMBOLOS E ABREVEVIATURAS

$\varnothing$	- Diâmetro
α_0	- Ângulo de folga (graus)
α	- Ângulo de incidência (graus)
σ	- Ângulo de ponta (graus)
γ_0	- Ângulo de saída (graus)
δ	- Ângulo de hélice (graus)
ψ	- Ângulo da aresta transversal (graus)
p	- Probabilidade de significância
χ	- Ângulo do chanfro de entrada
χ_r	- Ângulo de direção da aresta
APC	- Aresta postiça de corte
a_p	- Profundidade de corte (mm)
DP	- Desvio padrão
Cl	- Desvio de cilindricidade (μm)
CS	- Coeficiente de sensibilidade
CVD	- Deposição química de vapor
D	- Diâmetro externo (mm)
d	- Diâmetro interno (mm)
f	- Avanço (mm/rot)
Fe_3C	- Carboneto de ferro
GL	- Grau de liberdade
HB	- Dureza Brinell
H_a	- hipótese alternativa
H_0	- hipótese nula
HSS	- Aço rápido (High Speed Steel)
HV	- Dureza Vickers
i	- Unidade de tolerância

IT - Intervalo de tolerância de trabalho

V_f - Movimento de avanço

K_p = Custo de produção por peça

K_{pa} = Custo de produção por peça (Alargador)

K_{pbe} = Custo de produção por peça (Broca especial)

K_{us} = Custo de mão de obra de usinagem

K_{uf} = Custo das ferramentas (depreciação, troca, afiação)

K_{um} = Custo da máquina

lm - Comprimento de medição total (mm)

MGV - Média geométrica dos valores extremos de dimensões nominais (mm).

PCBN - Nitreto cúbico de boro policristalino

PCD - Diamante Policristalino

PVD - Deposição física de vapor

R_a - Rugosidade média aritmética (μm)

R_y - Rugosidade máxima (μm)

R_z - Valor médio de rugosidade máxima em cinco pontos (μm)

TiN - Nitreto de titânio

TiAlN - Nitreto de titânio e alumínio

TI - Tipo de incerteza

t_t : Tempo total de fabricação por peça, (min/pç)

t_c : Tempo de corte da ferramenta, (min/pç)

t_s : Tempos secundários de usinagem, (min/pç)

t_a : Tempo de aproximação e afastamento da ferramenta, (min/pç)

t_p : Tempo de preparação da máquina, (min)

t_{ft} : Tempo de ajuste e troca da ferramenta (min/pç)

U - Incerteza expandida em (mm)

$VB_{Bm\acute{a}x}$ - Desgaste de flanko (mm)

V_C - Velocidade de corte [m/min]

V_e - Movimento resultante de corte

V_f - Movimento de avanço

Z: tamanho do lote, (N° de peças ou N° furos)

SUMÁRIO

RESUMO.....	vi
ABSTRACT.....	vii
LISTA DE FIGURAS.....	iv
LISTA DE TABELAS.....	xiv
LISTA DE SÍMBOLOS E ABREVIATURAS.....	xvi
CAPITULO I – INTRODUÇÃO.....	1
CAPITULO II – REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	5
2.1 - Processo de Furação.....	5
2.1.1-Tipos de Brocas.....	6
2.1.1.1 - Brocas Especiais.....	11
2.2. - Processo de Alargamento.....	21
2.2.1- Alargadores Helicoidais de Desbaste.....	22
2.2.2 - Alargadores de Acabamento.....	23
2.2.3 - Alargadores de Acabamento – Sistema de Referência, Geometria e Condições de Trabalho.....	24
2.2.4 - Recomendações para o Uso de Alargadores.....	25
2.3 - Furos com Tolerância Dimensional mais Estreita.....	26
2.3.1 - Desvios Dimensionais.....	28

2.3.2 - Diâmetro do Furo.....	28
2.3.3 - Relação Comprimento / Diâmetro do Furo (L/D).....	29
2.4 - Qualidades de Superfícies Usinadas.....	31
2.5 - Desvios de forma.....	33
2.6 - Desvio de Cilindricidade.....	34
2.7 - Desvios Microgeométricos.....	35
2.8 - Desgastes em Ferramentas de Corte - ênfase em Brocas e Alargadores.....	39
2.8.1 Desgaste em Broca Helicoidal.....	40
2.9 - Recomendações para soluções de problemas na furação com brocas convencionais.....	45
2.10 - Ferros Fundidos.....	47
2.10.1 - Tipos de ferros fundidos.....	47
2.10.1.1 - Ferro Fundido Vermicular.....	48
CAPITULO III – PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL.....	52
3.1 - Material da peça.....	54
3.2 - Máquina Ferramenta.....	55
3.3 - Ferramentas de corte.....	56
3.4 - Sistemas de fixação das ferramentas.....	61
3.5 - Ensaio de usinagem.....	63
3.5.1 - Parâmetros de corte.....	63
3.6 - Medição do desgaste das ferramentas.....	65
3.7 - Medição de desvio de cilindricidade.....	66
3.8 - Medição da rugosidade.....	67

3.9 - Medição do diâmetro do furo.....	68
3.9.1- Cálculo de afastamento dimensional dos furos.....	68
3.9.2 - Medição da microdureza dos furos.....	69
3.10 - Cálculo e análise de variabilidade entre os valores de diâmetros produzidos pelas ferramentas através do teste de hipótese utilizando a distribuição t de Student.....	71
CAPITULO IV – RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	72
4.1- Considerações iniciais.....	72
4.2- Parâmetros de Rugosidade R_a e R_y	72
4.2.1- Análise das texturas de superfícies obtidas na parede interna dos furos.....	75
4.3 - Cálculo da incerteza de medição do diâmetro.....	79
4.3.1- Análise de variabilidade entre as ferramentas através da distribuição t de Student.....	81
4.4 - Influencia do sobremetal.....	85
4.5- Desgaste das ferramentas.....	86
4.6 - Analise de medição da microdureza (HV).....	98
4.7 - Aspectos econômicos de usinagem	98
4.7.1 - Tempo de fabricação	101
4.7.2 - Custos de fabricação	102
CAPITULO V– CONCLUSÕES.....	106
CAPITULO VI – SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	108
CAPITULO VII– REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	109

CAPITULO I

INTRODUÇÃO

A furação convencional é o processo de usinagem mais utilizado para a produção de furos. Este processo representa 33% do número em operações de usinagem e aproximadamente 25% do tempo total na usinagem (Tonshoff, 1994). A importância deste processo de usinagem pode ser constatada, por exemplo, quando se observa a quantidade de furos que devem ser usinados durante a fabricação de blocos para motores de veículos automotivos: são cerca de 75 furos para os motores de 4 cilindros e um valor muito maior quando o motor possui 8 cilindros (Da Silva et al., 1997).

Em muitas aplicações da indústria metal-mecânica exige-se a fabricação de peças com furos que apresentem acabamento e exatidão geométrica necessária para a montagem de precisão, normalmente com qualidade de trabalho variando entre ISO IT5-IT7. Os furos em geral cilíndricos são elementos muito comuns e importantes em conjuntos mecânicos e são empregados em várias peças e produtos que desempenham importantes funções, como: condutores de fluidos, alojamento de rolamentos, interiores de roscas, acoplamento de eixos, buchas entre outras. A grande maioria das peças de qualquer tipo ou formato produzido nas indústrias tem pelo menos um furo, e somente uma parte muito pequena já vem com o furo pronto do processo de obtenção da peça em bruto (fundição ou forjamento, por exemplo) (Diniz et al., 2006). Na indústria metal-mecânica, são várias opções para realizá-los, dependendo das formas e condições em que eles se encontram nas peças. Em muitas aplicações é necessária a produção em massa de peças com furos que apresentem ótimo acabamento e baixos desvios dimensionais e macrogeométricos (circularidade e cilindricidade) necessários para a montagem de precisão. Mas para a produção destes furos de tolerâncias mais estreitas, as brocas helicoidais convencionais são limitadas em função da geometria, de forma que são necessários processos subsequentes, como o alargamento, por exemplo. Para que um furo seja alargado, ele deve ser inicialmente furado com brocas, processo conhecido como pré-furação. Isso implica na aquisição de no mínimo duas ferramentas diferentes, que resultam na adição de no mínimo duas parcelas no tempo de usinagem, que por sua vez afeta a produtividade e competitividade. Portanto,

qualquer investimento na produção de ferramentas e técnicas que permitam reduzir o tempo de usinagem de furos de tolerância estreita, sem afetar a integridade da superfície e de preferência com menor custo, receberá especial atenção da comunidade de usinagem.

Normalmente os furos cilíndricos e cônicos podem ser usinados tanto em máquinas convencionais quanto em máquinas equipadas com comando numérico (CNC), sendo que estas últimas garantem furos com menores desvios dimensionais e geométricos, desvios estes que serão abordados no decorrer deste trabalho. E como já comentando previamente, para diminuir os campos das tolerâncias, reduzir os desvios, empregam-se após a furação o processo de alargamento, que é um processo que resulta em pequena remoção de material (Bezerra, 1998). Os alargadores possuem geometria diferente das brocas e assim os parâmetros de corte devem ser ajustados.

Devido ao vasto campo de aplicação do processo de furação, são cada vez mais crescentes os investimentos em pesquisas que proporcionem melhorias que possam ser implantadas, principalmente, na indústria metal-mecânica. Como em alguns processos o tempo de usinagem e a produtividade são fatores prioritários, os furos são produzidos na sua forma final apenas pela furação. Entretanto, muitas vezes em aplicações mecânicas onde é requerida elevada exatidão, as tolerâncias dimensionais nem sempre são suficientes para garantir os requisitos de funcionalidade das peças (Da Silva et al., 2001). As medidas do diâmetro, por exemplo, não são suficientes para assegurar que um furo seja totalmente cilíndrico. Para estes casos normalmente se emprega a furação seguida do processo de alargamento.

Mas com a crescente competitividade atual na indústria metal-mecânica, as empresas de manufatura e os grandes fabricantes de ferramentas do setor tem buscado produzir ferramentas cada vez mais resistentes, que impliquem em vida mais longa, que permitam utilizar velocidades de corte mais elevadas, com garantida de qualidade e segurança de componentes da indústria, a fim de aperfeiçoar a fabricação e atender as demandas do mercado, evitando assim operações subsequentes em seus produtos. Em se tratando de ferramentas de furação, a escolha adequada de uma broca para determinada aplicação, passa por diversos fatores, sendo eles, o material a usinar, geometria de corte, material da broca, dimensão do furo, tipo de furo (cego ou passante), características da entrada e saída da broca na peça a furar, qualidade do furo desejada, características da máquina e sistema de aperto, utilização de fluido de corte e pelos parâmetros processuais velocidade de corte e avanço (MAPAL, 2014).

Apesar dos diversos fabricantes apresentarem produtos muito similares entre si, estes apresentam pequenas diferenças, as quais influenciam fortemente a vida útil da ferramenta e

qualidade final do furo. Levando-se em consideração o material a ser usinado, e já com praticamente tendo sido esgotados materiais de revestimentos de ferramentas para as mais diversas aplicações, os fabricantes de ferramentas tem mantido investimento em pesquisas para explorar a potencialidade das geometrias das brocas, com o objetivo de melhorar os aspectos relacionados com a qualidade final dos furos usinados, o desempenho da broca, a rigidez e vida útil da ferramenta. Quando uma broca tem sua geometria diferente daquela das brocas helicoidais convencionais, normalmente é chamada de broca especial. E é nesta possibilidade de se encontrar uma geometria de broca adequada que possa produzir furos com qualidade no mínimo compatível com aqueles produzidos por alargadores que este trabalho foi desenvolvido.

Neste contexto, este trabalho apresenta o estudo técnico e econômico do emprego de broca especial em substituição ao alargador na produção de furos cilíndricos de 10 mm de diâmetro em peças de ferro fundido vermicular. As variáveis de entrada investigadas foram: diferentes tipos de sobremetal (0,3 e 0,5 mm) que antecede o processo de alargamento cilíndrico, comparadas com a furação com broca de geometria especial com diâmetro 10 mm. Os parâmetros de saída avaliados foram o acabamento, os desvios de cilindridade e dimensional. Investigou-se também a influência do sobremetal na qualidade final do furo usinado pelo alargador. Tanto as amostras das peças quanto das ferramentas foram cortadas e preparadas para análise metalográfica. As paredes dos furos e a microdureza dos furos usinados foram analisados. O desgaste das ferramentas foi monitorado e amostras destas foram levadas ao microscópio eletrônico de varredura para observação e discussão dos mecanismos de desgaste envolvidos. Por último, foi realizada a análise das condições econômicas de corte.

Este trabalho está dividido em seis capítulos: Este capítulo 1 que apresenta a introdução, o capítulo 2 denotado por revisão bibliográfica, que contempla os tópicos relacionados com o processo de furação, processo de alargamento cilíndrico, considerações sobre a seleção de parâmetros de corte e influência nos desvios geométricos, problemas típicos nos processos de furação e alargamento, alguns trabalhos que empregaram brocas especiais, qualidade de superfícies usinadas, desgaste e mecanismos de desgaste de brocas, desvios geométricos e por fim as principais características do ferro fundido vermicular. O capítulo 3 descreve o procedimento experimental empregado para condução dos ensaios de usinagem, análise metalográfica das peças e ferramentas, medições dos desvios geométricos e dimensionais, da microdureza e os diversos cálculos para determinação da qualidade de trabalho. No capítulo 4 são apresentados e discutidos os resultados obtidos, incluindo os cálculos de hipóteses t Student

e condições econômicas de usinagem. O capítulo 5 apresenta as conclusões retiradas deste trabalho e o capítulo 6, as sugestões para trabalhos futuros.

CAPITULO II

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo será apresentada a revisão bibliográfica que abordará os processos de furação e alargamento, desvios dimensionais, qualidade de superfícies usinadas, os desgastes ocorridos nas ferramentas com ênfase em (brocas e alargadores) e Ferro Fundido Vermicular.

2.1 - Processo de Furação

Por furação entende-se como sendo um processo de usinagem que visa à produção de furos, na maioria das vezes cilíndricos, em uma peça, através do movimento relativo de rotação entre a peça e a ferramenta, denominada broca. A continuidade da retirada de material é garantida pelo movimento relativo de avanço entre a peça e a ferramenta, que ocorre segundo uma trajetória coincidente ou paralela ao eixo longitudinal da ferramenta (Ferraresi, 2006). A furação é, geralmente, o método de usinagem mais eficiente e econômico para se executar um furo em um metal sólido e, frequentemente, é realizada em conjunto com outros processos de usinagem.

Segundo Haber-Haber et al. (2007) a furação continua sendo um dos processos de usinagem mais rápido, para obtenção de furos cilíndricos ou cônicos, sendo esta a mais comum na indústria de transformação. Em alguns países o processo de furação tem sido responsável por quase 50% de todas as operações de usinagem. Melhoria no desempenho do processo furação pode ter repercussões positivas na usinagem, em geral na qualidade, produtividade e custos.

Sabe-se que a maioria das peças de metal possui algum tipo de orifício ou uma sequencia de linhas perfuradas, que foram em geral feitos por furação, seguindo recomendações sobre geometria da ferramenta e parâmetros de corte (Czampaa et al., 2013).

Na produção de furos normalmente são necessários operações subsequentes como o processo de alargamento, mandrilamento, brochamento e roletamento que proporcionam ao furo algumas características funcionais como desvios geométricos e ou de posição menores,

dependendo do caso (Stemmer, 2005). O emprego de outros processos é justificável, caso o processo apresente características que não podem ser atingidas pelo processo tradicional de furação.

Diferentes processos também podem ser empregados na obtenção de furos, cada um na sua característica e importância dentro do processo de fabricação, dentre os quais merece destaque: processo de furação convencional (com brocas helicoidais), conformação mecânica, usinagem química, eletroerosão, usinagem por feixe de elétrons Fig.2.1. A aplicação de um ou outro processo dependerá da geometria da peça, dureza, tamanho, acabamento e tolerâncias requeridas. Por exemplo, quando um furo cilíndrico deve ser realizado em uma peça metálica de elevada dureza ($> 60\text{HRC}$) o processo de usinagem por eletroerosão pode ser a melhor alternativa.

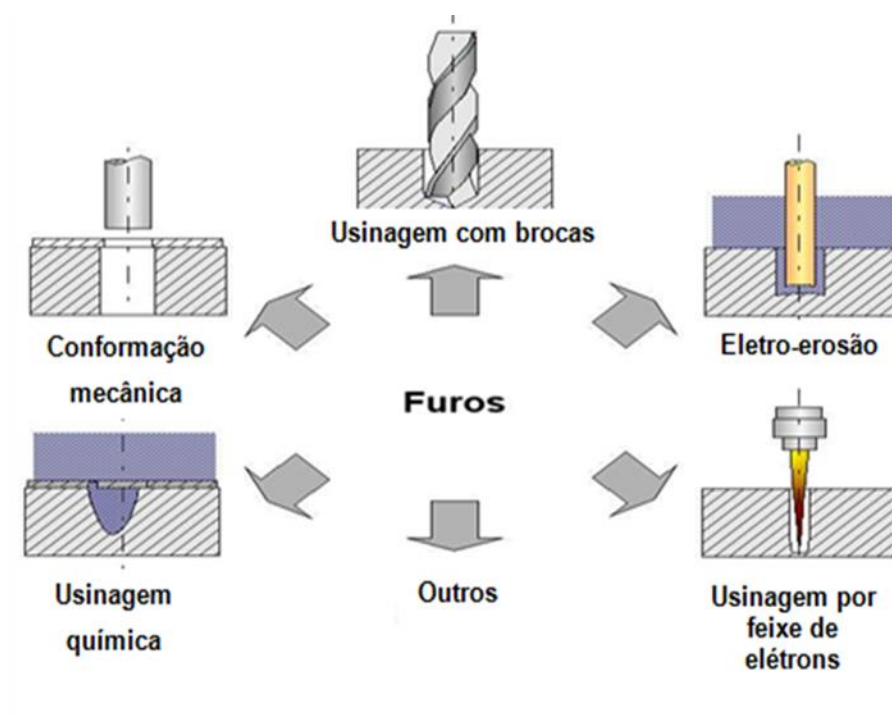


Figura 2.1 – Processos de usinagem para fabricação de furos (Adaptado de Stoeterau, 2008).

2.1.1 -Tipos de Brocas

O processo de furação convencional com brocas helicoidais dependerá de várias características do processo tais como a dimensão, o tipo de furo (cego ou passante), a relação entre o diâmetro e a profundidade do furo (L/D), a qualidade do furo (tolerâncias dimensionais e geométricas e o acabamento), a quantidade de furos a serem realizados e as características do material a ser usinados, entre outras (Sandvik, 2012).

As brocas helicoidais são utilizadas na maioria das aplicações na produção das mais diversas formas de furos, e são produzidas numa ampla variedade e em diferentes dimensões, diferindo basicamente pelo tipo de haste, canal, geometria da ponta e material. A broca mais comum utilizada no processo de furação é a chamada broca helicoidal, mas existe uma grande diversidade de modelo e tipos de brocas para as mais peculiares formas de aplicações. Similares às brocas helicoidais, podem ser citadas como exemplo as brocas com pastilhas intercambiáveis, largamente utilizadas em altas produções e em máquinas equipadas com comando numérico computadorizado (CNC), que normalmente garantem produtividade e fácil substituição das arestas. Em certos casos, para um mesmo tipo de furo, podem ser utilizados vários tipos de brocas, conforme mostradas na Fig.2.2.



Figura 2.2 – Diferentes tipos de brocas para furação (Adaptado de Stemmer, 2005).

Mas são vários os tipos de brocas disponíveis no mercado atualmente, e a faixa de aplicação dependerá de fabricante. Algumas destas brocas são listadas a seguir:

- Brocas helicoidais escalonadas de múltiplas guias
- Brocas-canhão
- Brocas BTA
- Brocas ocas
- Brocas Ejetoras

A típica broca helicoidal foi desenvolvida na década de 1820 pela “Moses Twist Drill and Machine Company”. O tipo de afiação original, conhecido como afiação cônica, é até hoje utilizado em operações simples. Sua forma construtiva é composta de uma haste cilíndrica e uma parte cortante que pode ser afiada de maneiras distintas conforme o material a ser usinado. Uma broca normalmente é composta de duas arestas de cortes principais, ligados através da aresta transversal, conforme mostra a Fig.2.3, contudo podem ter três ou mais arestas cortantes, a fim de reduzir os erros de posicionamento, melhorar o fluxo de cavacos e reduzir as forças de corte e avanço (Diniz et al., 2006).

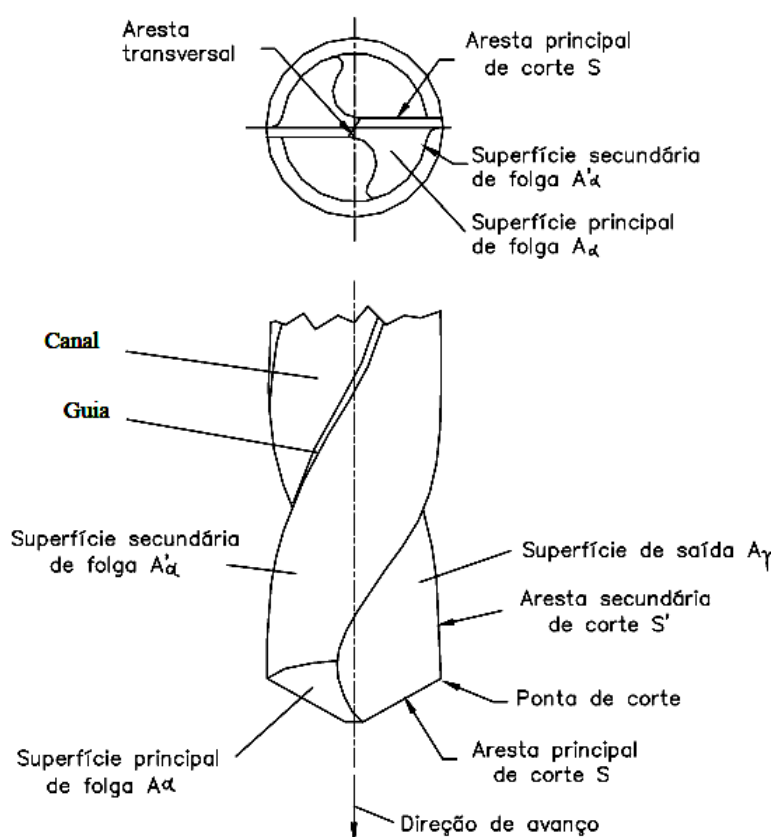


Figura 2.3 - Nomenclatura da broca helicoidal (NBR ISO 3002-1: 2013).

Em relação à cinemática do processo de furação, na Fig.2.4 são mostrados os vetores que definem os movimentos de corte na furação. Pela definição, tem-se o movimento de avanço v_f , no qual a ferramenta penetra na peça, o movimento de corte v_c , sendo N o sentido do movimento de rotação da ferramenta, e o movimento resultante de corte v_e que é a simultaneidade do movimento de corte com o movimento de avanço.

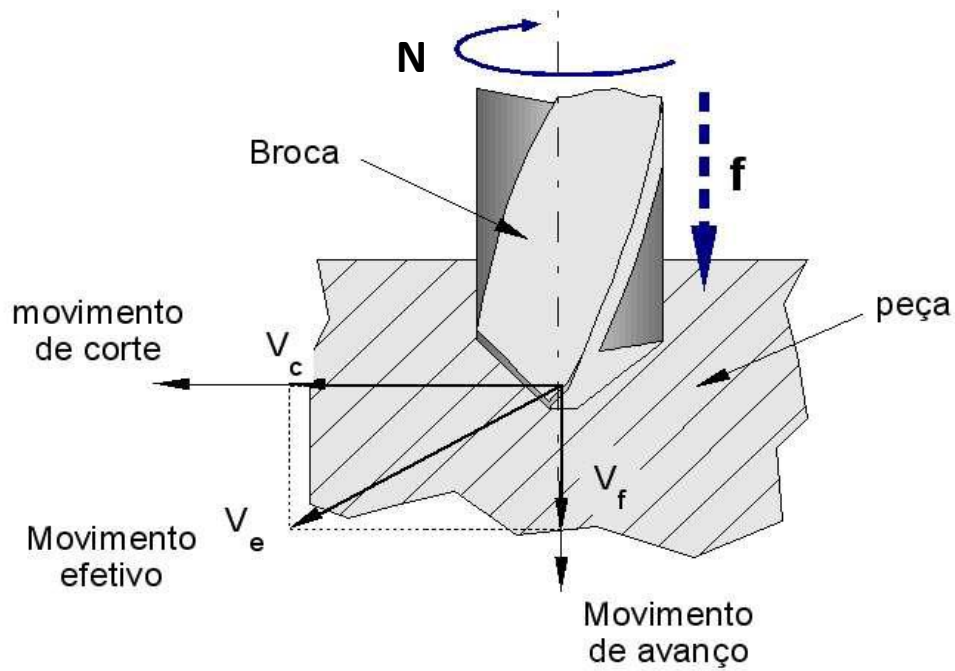


Figura 2.4 – Representação das condições cinemáticas na furacão (Adaptado de Stoeterau, 2008).

Na Fig.2.5 é apresentada a ilustração de uma broca helicoidal e sua terminologia.

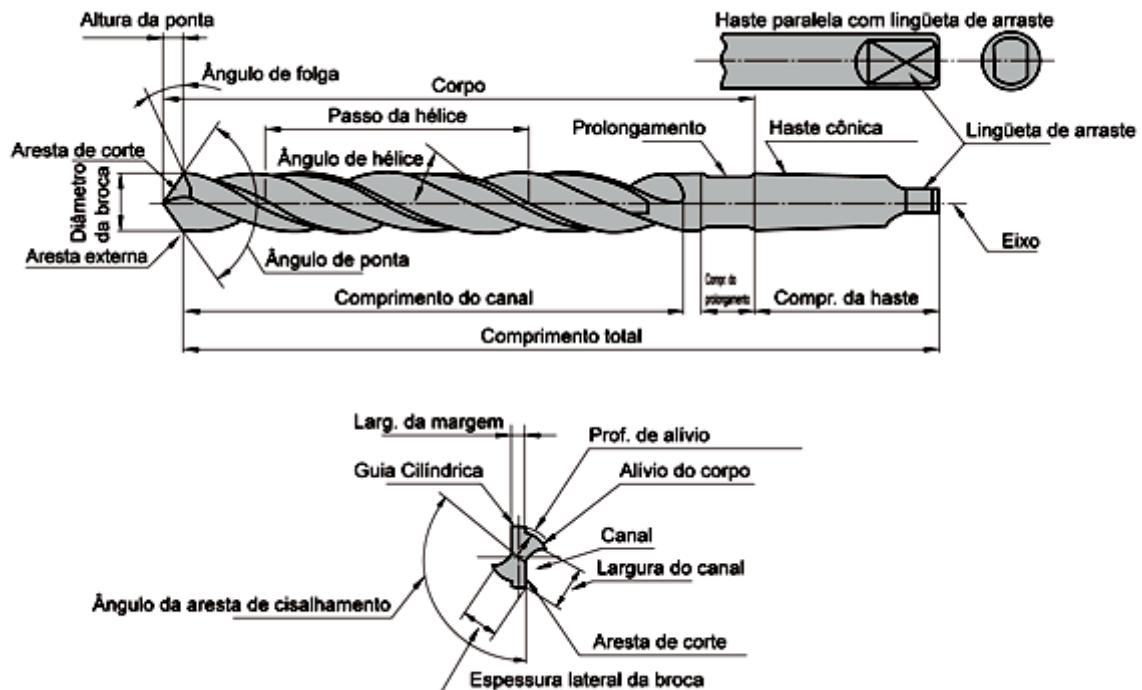


Figura 2.5 – Terminologia das brocas helicoidais (Mitsubishi Materials, 2013).

As características de uma broca, além de sua forma, são: dimensão, material e a geometria caracterizada principalmente pelos ângulos de hélice, de folga e de ponta, conforme observado nas Fig. 2.6 (a) a (c). O ângulo de hélice (δ) vista na Fig.2.6 (a) auxilia no desprendimento do cavaco. O ângulo da ponta deve ser determinado de acordo com o material a ser usinado. Quanto mais duro o material menor deve ser o ângulo, que pode ser observado pela Fig.2.6 (c) (Stemmer, 2005).

O ângulo de incidência ou ângulo de folga (α) visto na Fig.2.6(b) tem a função de reduzir o atrito entre a broca e a peça e facilitar sua penetração no material, variando entre 9° e 15° . Este ângulo também deve ser determinado de acordo com o material da peça a ser furada. Quanto mais duro o material menor deve ser o ângulo de incidência (Oliveira et al., 2008).

O ângulo de ponta (σ) corresponde ao ângulo formado pelas arestas de corte da broca, que devem ter o mesmo comprimento. Este ângulo também é determinado pela dureza do material que será usinado, e pode ser observado na Fig.2.6(c).

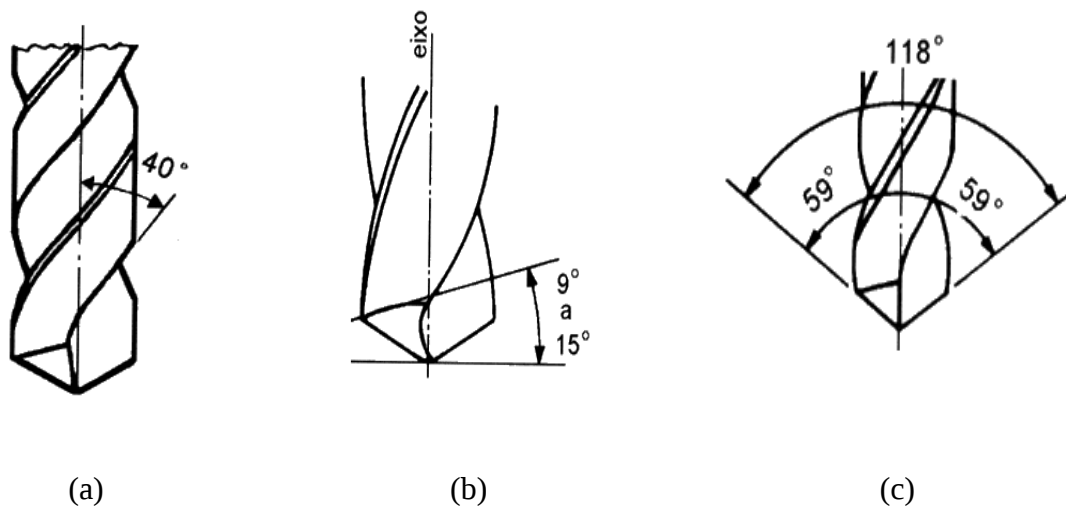


Figura 2.6 – Ângulos de uma broca helicoidal: (a) Ângulo de Hélice; (b) Ângulo de Incidência; (c) Ângulo de Ponta (Stemmer, 2005).

De uma maneira geral as brocas, como as fresas, são classificadas pela norma NBR ISO 5419, como H, N e W. Sendo as brocas do tipo H, indicadas para materiais duros, e/ou que produzem cavaco curto (descontínuo). Segundo Diniz et al., (2006), quando uma broca comum não proporciona um rendimento satisfatório em um trabalho específico e a quantidade de furos não justifica a aquisição de uma broca de geometria especial, e assim algumas modificações nas

brocas do tipo N serão uma alternativa a fim de obter resultados mais satisfatórios. Dentre elas, pode-se modificar o ângulo da ponta, tornando-o mais obtuso e melhorando os resultados na furação de materiais duros, como aços de alto carbono. As brocas tipo W, são indicadas para materiais macios e/ou que produzem cavaco longo.

2.1.1.1 – Brocas Especiais

Apesar da grande importância do processo de furação, poucos avanços em termos de brocas com novas geometrias e novos materiais foram observados na literatura até o fim do século XX, enquanto outros processos (como torneamento e fresamento) progrediram mais rapidamente com a introdução de novos materiais para ferramentas. A melhoria no desempenho de materiais das ferramentas de corte puxada pelas exigências de aumento de produtividade, que por sua vez demanda o emprego de elevadas velocidades de corte, tem visado o prolongamento da vida útil da ferramenta e a eficiência econômica do processo de furação.

No entanto, nos últimos anos com a crescente aquisição e uso cada vez mais comum de centros de usinagem e centros de torneamento CNC o processo de furação tem sido realizado nestas máquinas e com velocidades cada vez maiores. Com isso, têm ocorrido vários avanços no aprimoramento dos materiais utilizados na fabricação das ferramentas utilizadas nos processos de furação. Dentre os principais avanços podem ser destacados a estrutura com grãos menores que tornam as ferramentas mais compactas, desenvolvimento de novos materiais para revestimentos e em multicamadas, melhoria da superfície para ancoramento do revestimento no substrato e também em projetos de brocas com geometria modificada, que incluem desde a aresta transversal, aresta principal de corte, guias, ponta de corte, dentre outros. Para estas brocas que apresentam geometria modificada atribui-se o nome “broca de geometria especial”, ou broca especial, cuja geometria foge dos padrões de geometria das brocas helicoidais convencionais. Elas são fabricadas de acordo com as necessidades de cada cliente e são projetadas para gerar um melhor resultado seja ele em termos de rugosidade, tolerâncias e/ou integridade dos furos usinados, sempre almejando a melhor relação benefício/custo. A seguir serão apresentados alguns dos trabalhos realizados com brocas especiais encontrados na literatura.

Agapiou (1993) utilizou brocas com quatro arestas de corte de metal duro conforme mostra a Fig.2.7, no qual ao final dos testes constatou que este modelo de broca com quatro arestas, obteve um excelente desempenho quando comparado com brocas comuns com duas arestas de corte, principalmente reduzindo o valor da vibração no corte.

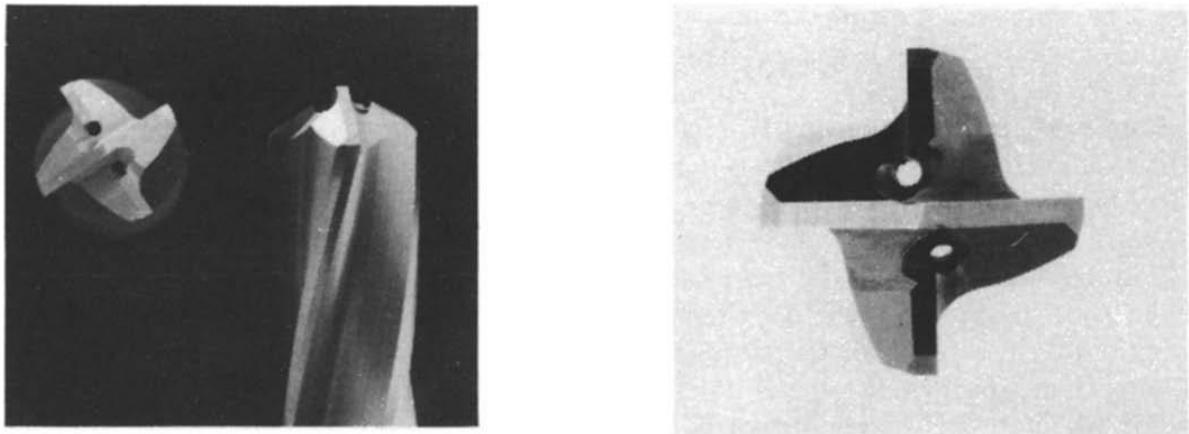


Figura 2.7 – Brocas de metal duro com quatro arestas de corte (Agapiou, 1993).

Para reduzir as tensões ocorridas nas brocas de metal duro, elas são projetadas com a geometria de corte positiva. A maneira como a forma do cavaco se difere dos mecanismos convencionais, onde as arestas de corte são exclusivamente positivas, devido ao primeiro corte ser mais favorável no comportamento destas ferramentas, isto faz com que as forças de corte venham a ser reduzidas tornando sua centralização mais fácil. Além da usinagem de vários tipos de aços, as brocas de metal duro são usadas para a produção de furos de precisão em metais não ferrosos, como titânio, níquel e outros, onde se empregam brocas com geometria modificada.

Tonshoff et al. (1994) relataram que as brocas de HSS possuem menor dureza que as brocas de metal duro, além de também suportarem menores tensões em durante o processo de furação. Por este motivo, as pontas das brocas de metal duro devem ser projetadas de maneira a alcançar condição conhecida como auto-centrante na face de corte, buscando assim a redução das tensões ocorridas durante o processo de furação. Algumas delas passam por alteração na geometria, conforme mostrado nas Fig.2.8 (a) e (b). Estes mesmos autores, realizaram estudo da comparação da qualidade de trabalho entre estas diferentes brocas, e observaram que as brocas HSS convencional proporcionaram uma qualidade de trabalho IT12 dos furos usinados, enquanto que com as brocas de metal duro com duas arestas de corte resultaram em qualidade de trabalho IT8. Já com as brocas com geometria de três arestas de corte e com auto-centralização, resultaram em qualidade do furo ainda melhor, e alcançou valores de IT 7. Estes resultados são ilustrados esquematicamente na Fig. 2.9.

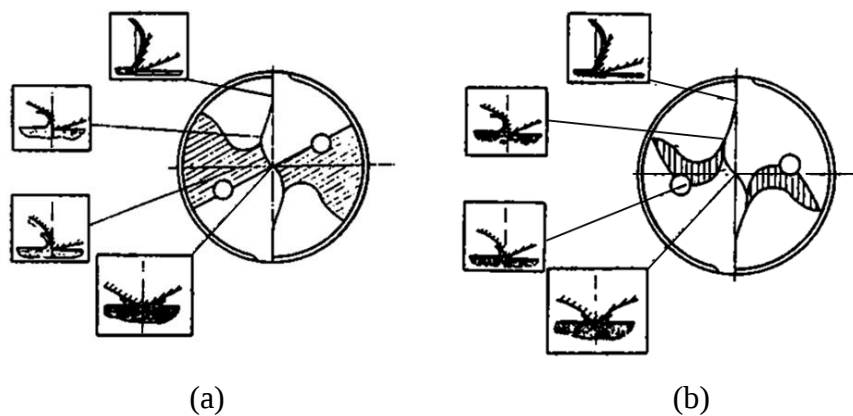


Figura 2.8 - Tipos de geometrias das pontas de brocas de metal duro; (a) Ponta cônica; b) Ponta com ângulo axial (Tonshoff et al., 1994).

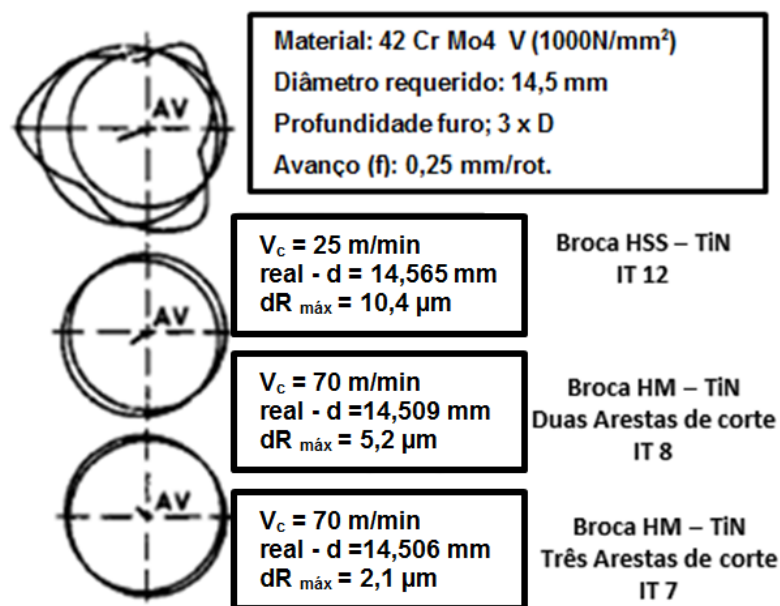


Figura 2.9 - A influência da geometria e da ferramenta sobre Circularidade e qualidade IT (Tonshoff et al., 1994).

Bagci (2004) empregou o que ele chamou de broca especial na furação de aço AISI 1040 e da liga Al 7075-T651. As brocas eram de metal duro revestidas com TiN / TiAlN, especificação R840 1000 A1A, com refrigeração interna, conforme mostra a Fig. 2.10.



Figura 2.10 – Broca especial de metal duro R840 1000 A1A com refrigeração interna (Bagci, 2004).

Xia (2004) utilizou brocas escalonadas de metal duro de diferentes diâmetros (6, 10 e 14 mm) que são consideradas especiais, conforme mostra a Fig. 2.11, para experimentos que foram confrontados com modelos empíricos para calcular a força de avanço e o torque. O material usinado foi o aço de corte-fácil (S1214) com dureza de 155-165 HBN. Foi estudada a influência do diâmetro da broca, avanço e velocidade de corte sobre o desempenho de brocas escalonadas.

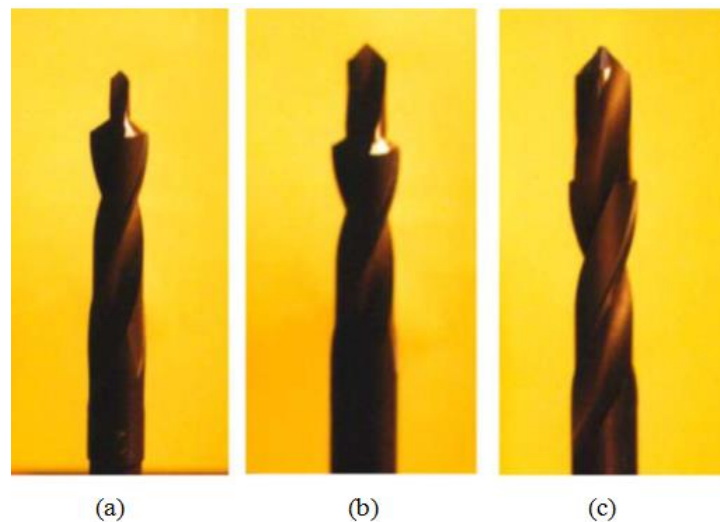


Figura 2.11 – Brocas escalonadas de metal duro: (a) $\varnothing = 6$ mm; (b) $\varnothing = 10$ mm; (c) $\varnothing = 14$ mm utilizadas no trabalho de Xia (2004).

Noauri (2005) estudou o efeito dos parâmetros de usinagem e do revestimento de diferentes brocas (Fig.2.12) sobre os mecanismos de desgaste no processo de furação a seco de ligas de alumínio AA2024. Segundo o autor, ao final dos testes, a brocas de metal duro revestida com nitreto de titânio-alumínio mais carboneto de tungstênio ao carbono ($\text{TiAlN}+\text{WC/C}$) apresentou desempenho superior em altas velocidades. Ele afirmou ainda que as brocas HSS sem revestimento, não são adequadas para o processo de furação a seco das ligas de alumínio AA2024, independente da velocidade de corte empregada.



Figura 2.12 – Brocas especiais com diferentes tipos de revestimentos (Noauri, 2005).

Wang (2008) realizou um estudo sobre a geometria de brocas e propôs alteração na geometria da broca que ele chamou de “Superfície de saída plana” ou “Brocas modificadas”, conforme mostra a Fig. 2.13. Ele utilizou brocas helicoidais convencionais de HSS, revestidas com TiN e de diferentes diâmetros (7, 9, 10, 11 e 13 mm) com duas arestas e gerou uma superfície plana na própria superfície de saída de cada uma das arestas de corte destas brocas. Elas foram confrontadas com brocas convencionais na usinagem de aço AISI 4340. Ele utilizou as forças de corte e desgaste, dentre outros, para verificar o desempenho destas brocas. O autor observou que as brocas com geometria modificada resultaram em menores forças de corte e torque, mas em contrapartida elas proporcionaram um menor tempo de usinagem.

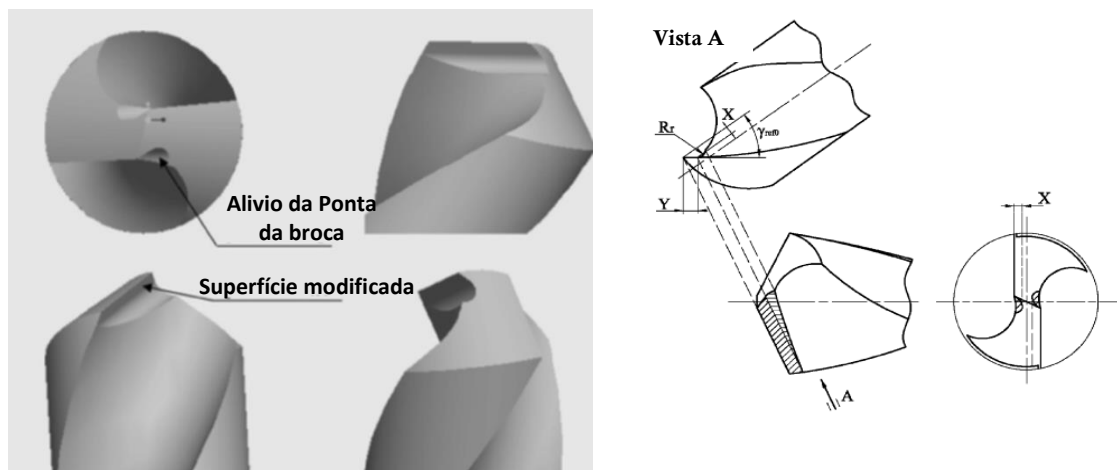


Figura 2.13 – Broca com alívio da ponta e superfície modificada (adaptada de Wang, 2008).

Oliveira (2008) estudou a influência de três geometrias de afiação da ponta em brocas helicoidais (afiação em S, afiação em cruz e a geometria com ponta em raio) de Ø6 mm sem os canais de refrigeração, revestidas por nitreto de titânio-alumínio (TiAlN) de camada única, fornecida pela empresa Gühring do Brasil, usinando ferro fundido vermicular, conforme mostra a Fig.2.14. Foi observada a influência da geometria na qualidade do furo obtendo-se tolerâncias de classe até IT9 e rugosidades da ordem de $1,2 \mu\text{m}$ (R_a).

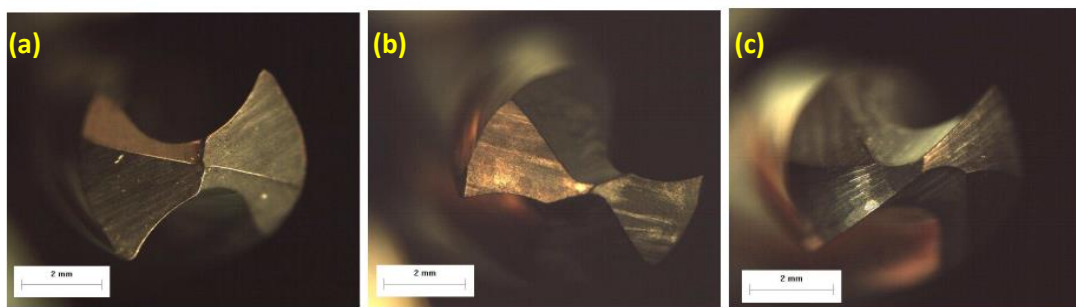


Figura 2.14 – Brocas com diferentes tipos de geometria - a) geometria com afiação em “S”; b) geometria com afiação em cruz e chanfro de proteção; c) geometria com ponta em raio (Oliveira, 2008).

Boeira (2010) em seus ensaios de furação do aço Ck45 (ABNT1045, DIN 1.1191) utilizou brocas helicoidais de metal-duro com estrutura micro-grão e revestimento do tipo nitreto de cromo-alumínio (AlCrN), conhecido comercialmente como BALINIT® HELICA com os

diâmetros de 7, 10 e 13 mm, com dois tipos de alívio na aresta transversal de corte e com geometria da ponta da broca Standard (sem alívio do gume transversal) (Fig.2.15).

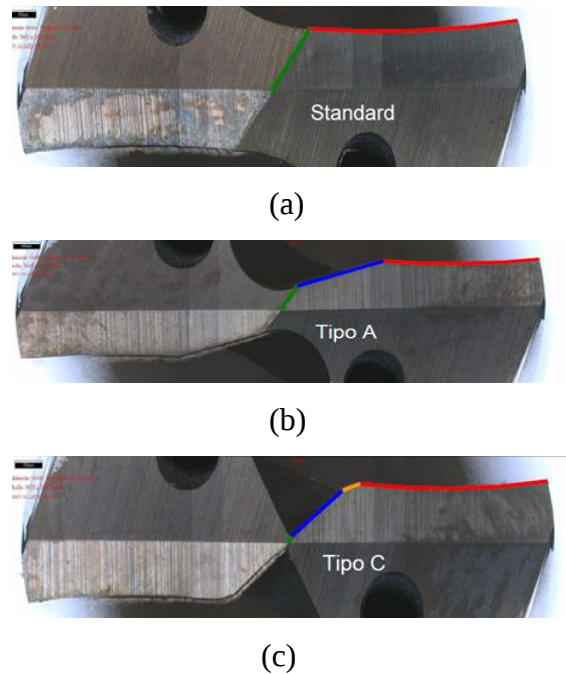


Figura 2.15 – Modelos de brocas helicoidais de metal duro utilizado - a) broca helicoidal sem alívio na aresta de corte transversal “Standard”; b) broca helicoidal com alívio na aresta de corte transversal “Tipo A”; c) broca helicoidal com alívio na aresta de corte transversal “Tipo C” (Boeira, 2010).

Machado (2011) investigou duas geometrias de brocas escalonadas (ponta normal e ponta esférica) com diâmetro de 10,5/18 mm (sem revestimento, classe K10) (Fig.2.16) na usinagem de ferro fundido cinzento ABNT FC25 (GG25), material empregado na fabricação de cabeçotes do motor Diesel NGD3 e obteve uma qualidade de trabalho IT8 á IT9.

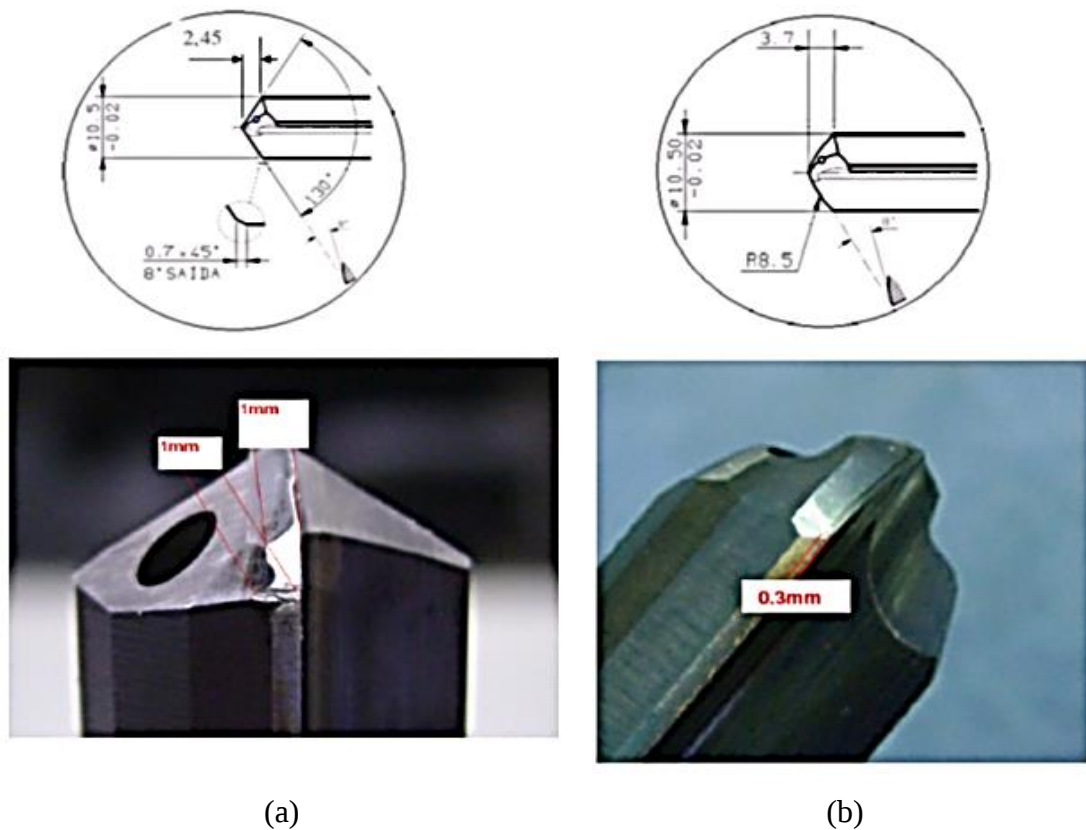


Figura 2.16 – Detalhes e fotos da geometria das brocas de metal duro utilizadas por Machado (2011) para usinar ferro fundido cinzento GG25: a) broca de ponta cônica normal; b) broca de ponta esférica.

Normalmente os fabricantes de ferramentas desenvolvem soluções em brocas com geometria especial sobre medida, ou seja, para cada processo de usinagem, utilizando a melhor matéria-prima e melhores técnicas e fabricação, visando na maioria das vezes melhor relação benefício-custo da produção. Em se tratando de brocas com geometria especial para furação, o mercado atual oferece uma gama bastante abrangente de ferramentas de diferentes tipos e formato para furação. As necessidades individuais dos clientes em exigir um modelo personalizado em que as soluções especificamente são adaptadas para as tarefas de usinagem onde este, tem sido o grande propulsor deste seguimento. São vários os exemplos de ferramentas especiais para furação na literatura. Algumas delas são conhecidas como brocas helicoidais caneladas e retas, bem como brocas em brocas maciças de metal duro ou ainda com pontas de insertos de diamante policristalino (PCD) ou nitreto de boro cúbico (CBN), conforme mostra a Fig.2.17.



Figura 2.17 – Exemplos de ferramentas com geometrias especiais dedicadas a produção de furos (Ferramentas MAPAL, 2014).

Um outro exemplo de ferramentas especiais para produção de furos é a broca piloto modelo RT 100P, conhecida como broca especial (Fig.2.18), confeccionada em metal duro integral com revestimento de nitreto de titânio em alumínio (TiAlN) que pode propiciar qualidade de trabalho em torno de IT9 (Gühring do Brasil, 2013). Ela possui, dentre outras características, um núcleo reforçado que, segundo o fabricante, confere máxima rigidez para um melhor controle em situações adversas de usinagem. Ela ainda dispensa o uso de mais uma ferramenta para deixar a superfície do fundo do furo plana, já que possui um ângulo de ponta de 180° (semelhante à geometria de uma fresa de topo). Ressalta-se que para furos cegos, as brocas convencionais conferem à base dos furos um aspecto cônico.

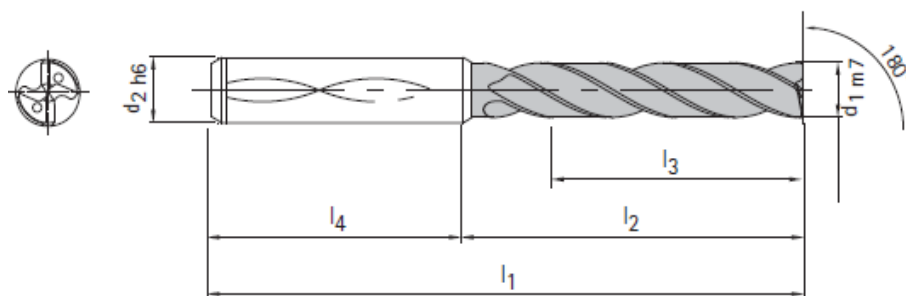


Figura 2.18 – Broca especial modelo RT 100 P (Gühring do Brasil, 2013).

Em se tratando de furação em ferro fundido vermicular, este mesmo fabricante disponibilizou no mercado a broca de metal duro integral de especificação RT100R (Fig. 2.19), revestida com FIRE (nitrato de titânio-alumínio), que visa conferir maior resistência ao calor e abrasão e assim prolongar a vida da ferramenta durante a usinagem de materiais fundidos. Ela também possui aresta de corte em raio que visa eliminar rebarbas nas saídas dos furos.



Figura 2.19 - Broca RT 100 R (Gühring do Brasil, 2013).

Outra empresa fabricante de ferramentas, MAPAL, também disponibilizou no mercado as chamadas “brocas alargadoras” de metal duro, modelo MEGA-Drill-Reamers, que normalmente atende o mercado para a demanda de ferramentas sob encomenda ou para fins específicos. Esta ferramenta combina duas operações em uma única ferramenta: broca e alargador (Fig.2.20). Segundo o fabricante, esta broca pode aumentar a produtividade na produção de furos, e propiciar qualidade de trabalho IT7. Segundo o fabricante, esta ferramenta oferece vantagens quando utilizada em centros de usinagem CNC, pois parcelas dos tempos de troca de ferramentas e tempos de usinagem são reduzidos. Já nas máquinas que empregam linhas *transfer*, poderá ser reduzida até uma estação de trabalho com a utilização desta ferramenta. Conforme a necessidade da aplicação, a opção de quatro ou seis arestas de corte poderão promover um melhor acabamento dos furos e garantir estabilidade dimensional e menor desvio de concentricidade do furo (Ferramentas MAPAL, 2014).

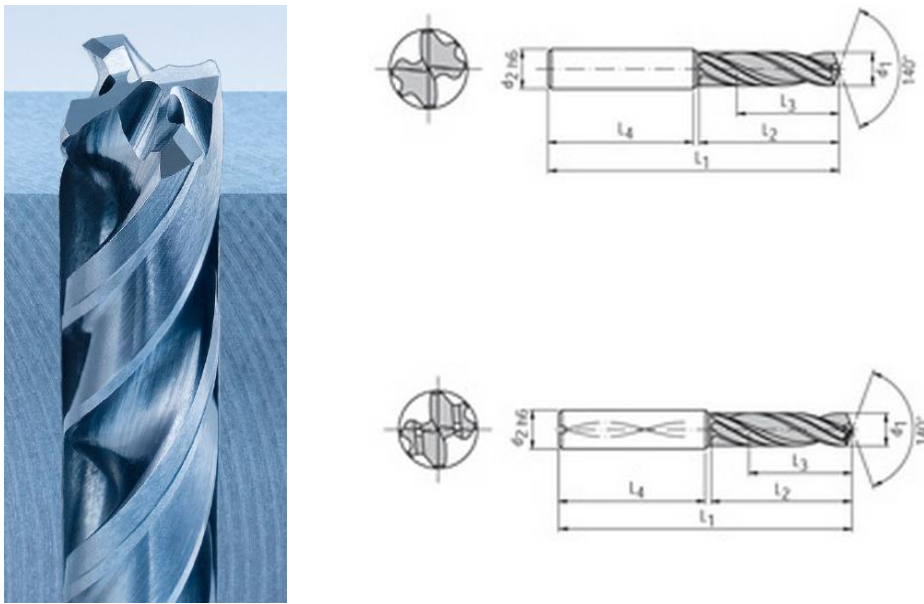


Figura 2.20 – Aspectos construtivos das brocas alargadoras (Ferramentas MAPAL, 2014).

2.2 – Processo de Alargamento

Segundo Metals Handbook (1989) o alargamento é um processo de usinagem onde uma ferramenta rotativa com geometria especial faz um leve corte nos furos cilíndricos ou cônicos, a fim de reduzir a rugosidade superficial e melhorar acabamento dos mesmos. Este processo também pode ser definido, de acordo com a norma DIN 8589-2, como um tipo de furação que utiliza uma ferramenta de alargar (alargadores) para produzir pequenas espessuras de cavacos e criar superfícies com alta qualidade dimensional e de forma (Da Silva, 2001).

Considerado como um processo de usinagem fina, o processo de alargamento é um processo no qual se deseja calibrar o furo ou melhorar o acabamento da superfície originada pela furação com broca helicoidal, que em geral produz tolerâncias de fabricação que normalmente variam entre ISO IT8 a IT10 (Stemmer, 2005).

O emprego de alargadores em geral promove furos com tolerância dimensional mais apertada que aqueles gerados pelas brocas, além de melhor qualidade superficial dos furos (menores desvios geométricos – rugosidade, circularidade e cilindridade), desde que os vários fatores do processo sejam levados em consideração, como condições iniciais do furo (tipo de pré-furação), fixação da peça e estabilidade da máquina-ferramenta sejam considerados (Schroeter, 1989).

2.2.1 Alargadores Helicoidais de Desbaste

Os alargadores helicoidais de desbaste são empregados para aumentar o diâmetro de furos provenientes de processos de fundição ou forjamento, ou ainda de furos anteriormente produzidos por brocas convencionais. Os alargadores de desbastes distinguem-se das brocas helicoidais comuns pelo fato de possuir no mínimo 3 arestas de corte (com respectivos canais e guias). Alargadores de haste cilíndrica são padronizados pela ABNT – NBR 7079:2010, em diâmetros que variam de 5 a 30 mm.

Os alargadores de haste com cone morse (NBR 7079:2010) podem variar de 9 a 50 mm. Para diâmetros maiores, usam-se alargadores tipo bucha (postiços), padronizados pela norma DIN 222 de 25 a 100 mm. Segundo o fabricante (SKF, 1987 apud Bezerra, 1998), a terminologia usada para os alargadores é detalhada conforme Fig.2.21.

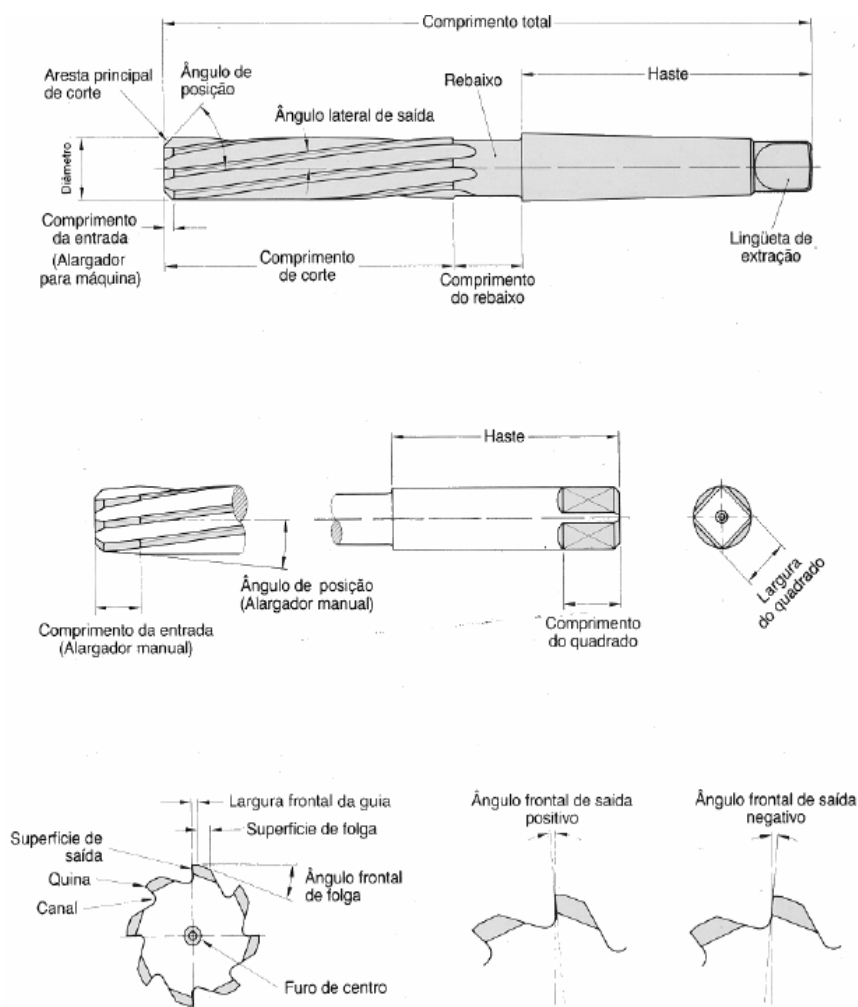


Figura 2.21 – Alargador de desbaste helicoidal com haste cônica (Stemmer 2005).

A escolha do alargador de desbaste deve ser feita com base na precisão e no acabamento dos furos exigidos. Se no processo de alargamento for utilizado o alargador de desbaste como sendo a última operação, seu diâmetro deve ser igual ao diâmetro do furo desejado. Se um alargador de acabamento for usado no passe final, o de desbaste deve ser usado com submedida, ou sobremetal, igual a 0,2-0,4mm, dependendo do diâmetro do furo (Dormer, 2007).

De acordo com Bezerra (1998), recomenda-se que para o processo de alargamento como ideal é se trabalhar com velocidades de corte entre 60 e 70% menores que na furação, e utilizar avanço cerca de 2 a 3 vezes maiores.

Segundo o Metals Handbook (1989) como a maioria dos alargadores são mais facilmente danificados que as brocas, devido a sua geometria, no alargamento recomendam-se utilizar velocidades de corte cerca de 66% daquelas utilizadas na furação. Já para furos com rasgos de chaveta, por exemplo, sugere que se utilizem baixos valores de avanço. Quanto aos valores de avanços usados no processo de alargamento de desbaste, devem ser calculados de forma diferente para faixas de diâmetro diferentes. Para furos de diâmetros menores que 50 mm, o avanço (f) deve estar em torno de 1% do diâmetro do furo para a maioria dos materiais, reduzindo-se para 0,5% do diâmetro para furos de diâmetro maior que 50 mm (Stemmer, 2005).

2.2.2 - Alargadores de Acabamento

Estes alargadores são empregados na obtenção de furos de bom acabamento e de tolerâncias dimensionais estreitas que equivalem, dependendo do diâmetro do furo, a qualidade de trabalho variando entre ISO IT6 a IT7. Eles em geral possuem entre 4 a 20 dentes distribuídos no perímetro do alargador. O número de dentes geralmente é par (facilita a medição do alargador) e os canais são normalmente retos.

Contudo para usinagem de furos com rasgos ou interrupções na parede, deve ser evitado o uso de alargadores de dentes retos (Bezerra, 1998). Neste caso, recomendam-se os alargadores de canais helicoidais, com hélice esquerda para corte à direita (ou vice-versa). A direção da hélice discorda da direção de corte para que o cavaco seja empurrado para frente, evitando que este prejudique a superfície usinada (Stemmer, 2005). Isto também gera uma componente de força axial que faz com que a ferramenta se fixe melhor no cone e compensa as possíveis folgas da máquina-ferramenta. O uso de uma ferramenta com hélice e corte à direita faz com que o cavaco seja puxado para cima, podendo provocar arranhões. Além disso, a força resultante “puxa” a ferramenta do cone ou mandril. Desse modo, este tipo de hélice só é usado para o

alargamento de furos cegos, onde o cavaco não tem espaço para se alojar caso seja empurrado para frente. Para evitar vibrações, os dentes ou canais dos alargadores costumam ser dispostos com divisão de passos diferente entre os dentes conforme mostrado na Fig.2.22, pares opostos devem possuir divisão igual, a fim de facilitar a edição da ferramenta.

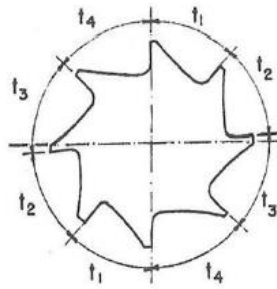


Figura 2.22 – Divisão de passo em alargadores de acabamento (Adaptado de Stemmer, 2005).

Alargadores de acabamento podem ser manuais ou de máquina conforme mostrado na Fig.2.23, em alargadores manuais, os chanfros de 45° servem apenas de guia, não executando o corte. Neste caso, o corte é feito por um chanfro secundário, que ocupa 1/4 do comprimento do alargador. O diâmetro de entrada, neste caso, varia de 93 a 98% do diâmetro final.

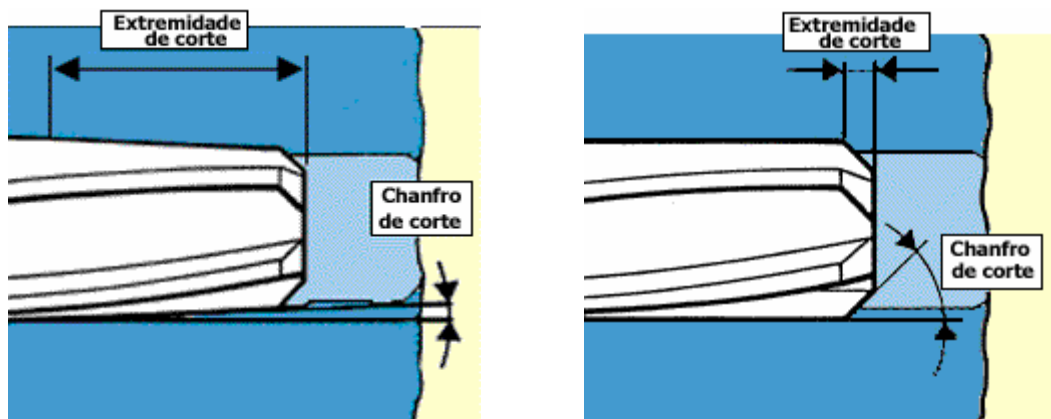


Figura 2.23 – Alargadores manuais e alargadores para máquina (Adaptado de Stemmer, 2005).

2.2.3 - Alargadores de Acabamento – Sistema de Referência, Geometria e Condições de Trabalho.

Tanto o sistema de referência quanto à geometria de alargadores de acabamento são bastante similares aos relativos a brocas helicoidais, à exceção, quando for o caso de alargadores

- Para o alargamento de furos com elevada precisão e bom acabamento, utilize inicialmente um alargador de desbaste e em seguida um alargador de acabamento;
- Melhores acabamentos são obtidos com avanço uniforme;
- O uso de lubrificante gera melhores resultados para alguns materiais e;
- Melhor acabamento das arestas de corte implica prolongamento da vida do alargador.

A seguir estão apresentadas as peculiaridades para obtenção de furos com tolerâncias dimensionais mais estreitas, considerados de qualidade de trabalho inferiores a IT8, em relação a furos considerados comuns.

2.3 - Furos com Tolerância Dimensional mais Estreita

Vários processos de usinagem como torneamento, fresamento e furação são amplamente utilizados na indústria para produzir formas, dimensões, acabamento e/ou combinação destes nos mais variados tipos de componentes mecânicos. Na montagem de um conjunto mecânico têm-se como resultado uma cadeia de dimensões que provoca um acúmulo de tolerâncias na cota resultante. Assim, existe a necessidade de uma análise deste acúmulo de tolerâncias a fim de que o mesmo não comprometa a intercambiabilidade (Bulba, 2007). No conceito de intercambiabilidade e funcionalidade nos sistemas de fabricação, deve-se levar em consideração de que cada peça ou conjunto de um produto final seja feito de acordo com as especificações definidas quanto à dimensão, forma e acabamento da superfície (Agostinho et al., 1977).

No caso da avaliação da qualidade de furos usinados, além da exatidão do diâmetro, os critérios mais comumente usados são os desvios de forma de circularidade e cilindridade, e a rugosidade superficial (Rosa, 2012). A furação é um processo utilizado para a obtenção de furos cilíndricos ou cônicos. Diante do exposto este processo torna-se de suma importância porque ela representa uma parte essencial dos processos de usinagem em geral. Problemas de furação podem resultar em perdas de produção, uma vez que, geralmente, este é um dos últimos processos envolvidos na produção de determinada peça. Segundo Tonshoff (1994), os furos devem ser executados ou aumentados pelo processo de furação este processo, em geral é feito como um dos últimos a ser executado nas peças, quando uma grande quantidade de tempo e dinheiro já foi gasta na execução das mesmas, devendo, portanto oferecer grande confiabilidade.

Embora os trabalhos na literatura sejam em número menor que aqueles de outros processos

como torneamento e fresamento, o processo de furação é responsável pela remoção de 25% de todo o material removido em processos industriais (Tonshoff, 1994).

De acordo com Dangerfield (2000), como a aresta de corte da broca não é vista durante a furação, o único meio de se determinar seu desempenho é aplicar alguma forma de detecção, como, por exemplo, monitorar a força de avanço, o torque ou a potência. Se o monitoramento não for possível, outra solução é inspecionar a broca no fim do ciclo, mas aí o processo já se completou, de maneira que se o furo não atende às especificações, nada ou muito pouco pode ser feito para que a peça não seja rejeitada pelo controle da qualidade.

Ainda no contexto do cenário atual, as indústrias de manufatura têm procurado ajustar suas linhas de produção, visando o baixo custo e qualidade cada vez mais superior dos componentes fabricados, com altos níveis de exigências, a fim de se manterem competitivas. Por exemplo, não basta apenas produzir um furo com boa relação benefício/custo sob o aspecto rapidez e com baixo custo de produção, mas ao mesmo tempo deve-se procurar atingir reduzir os desvios geométricos ou de forma dos furos (circularidade, cilindridade e rugosidade) como também furos com tolerância dimensional mais estreita, quando solicitado. Em sua condição balanceada, a broca pode ser precisamente ajustada para que sejam obtidas tolerâncias dimensionais mais estreitas e um melhor acabamento superficial (Dangerfield, 2000).

Outro fator que merece atenção no processo de furação são as forças de corte que estão intimamente relacionadas com a qualidade da aresta cortante e dureza do material. As forças de corte no processo de furação dependem da geometria da broca, das condições de corte (incluindo a atmosfera de usinagem e forma de aplicação do fluido) e as propriedades dos materiais (dureza). Assim, encontrar parâmetros que controlem estas forças significa alcançar a qualidade desejada no processo de furação, o que depende também da presença de menores erros geométricos e dimensões, inexistência de rebarbas, e boa integridade da superfície da peça de trabalho usinada (Dangerfield, 2000). Os principais parâmetros relacionados com a formação de cavaco no processo de furação e que por sua vez influenciam o acabamento dos furos usinados são o avanço da ferramenta e torque. O desgaste da ferramenta exerce um expressivo efeito sobre a qualidade de furos e de precisão do diâmetro durante a furação, e está associada a elevadas forças de corte que podem danificar a peça de trabalho ou mesmo a própria máquina ferramenta (Dangerfield, 2000).

Segundo Pangrácio (2003), o processo de furação pode ser aplicado em materiais com dureza de até 60 HRC. Essa faixa de dureza engloba a grande maioria dos materiais metálicos de engenharia e de construção mecânica, inclusive alguns aços para ferramentas. Os aços especiais,

como os aços-rápidos, alguns aços ferramenta para trabalho a frio e a quente e para moldes de injeção de plásticos, possuem dureza superior à indicada para a furação, o que obriga a adoção de outras técnicas para obtenção de furos nesses materiais.

2.3.1 - Desvios Dimensionais

Entende-se por desvios dimensionais todo desvio de uma medida prescrita anteriormente indicada como valor em um desenho. Estes desvios não conduzem necessariamente ao fato de que a peça não será utilizada, ela pode ser corrigida através de trabalhos posteriores (Novaski, 1996). A Fig. 2.25 apresenta erros e imperfeições que podem ocorrer, devido às condições do processo de furação.

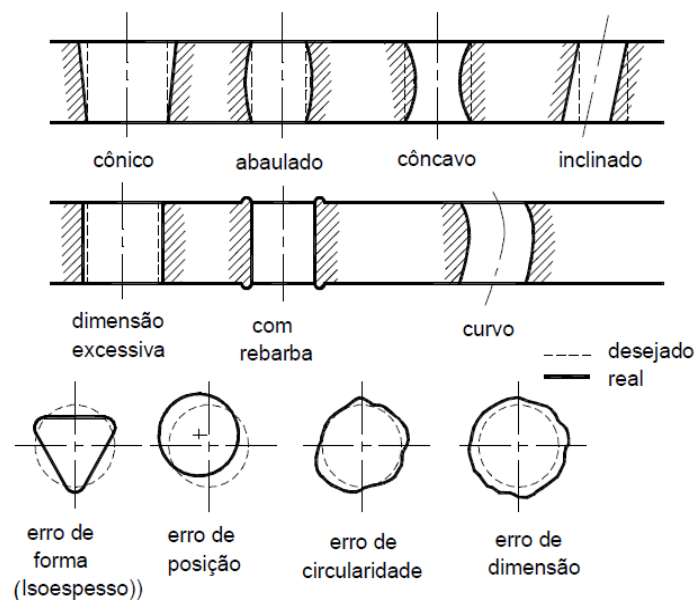


Figura 2.25 - Erros comuns na geometria de furos (Konig, 1997 e SME, 1983 apud Yamada et al., 2010).

2.3.2 - Diâmetro do Furo

As brocas mais empregadas no processo de furação possuem diâmetros que variam de 3,2 a 38 mm (1/8 a 1 1/2 polegadas). Sendo uma das principais, as brocas inteiriças de metal duro da linha Coro Drill Delta-C, segundo o fabricante a Coro Drill Delta-C possui o diâmetro retificado para tolerância m (mais-mais) de acordo com a DIN 6537, são utilizadas quando se deseja furos com tolerâncias mais estreitas e de diâmetros menores, estas brocas possuem canais polidos o

que facilita o melhor escoamento do cavaco, geometria de fácil reafiação e melhor resistência ao desgaste na usinagem de ferro fundido, e por isso são denominadas como brocas especiais. As brocas especiais permitem a execução de furos com tolerâncias dimensionais mais estreitas, como é o caso das brocas de metal duro, especificação CoroDrill Delta-C, do fabricante Sandvik (Fig.2.26), e também a obtenção de furos de até 152 mm de diâmetro.

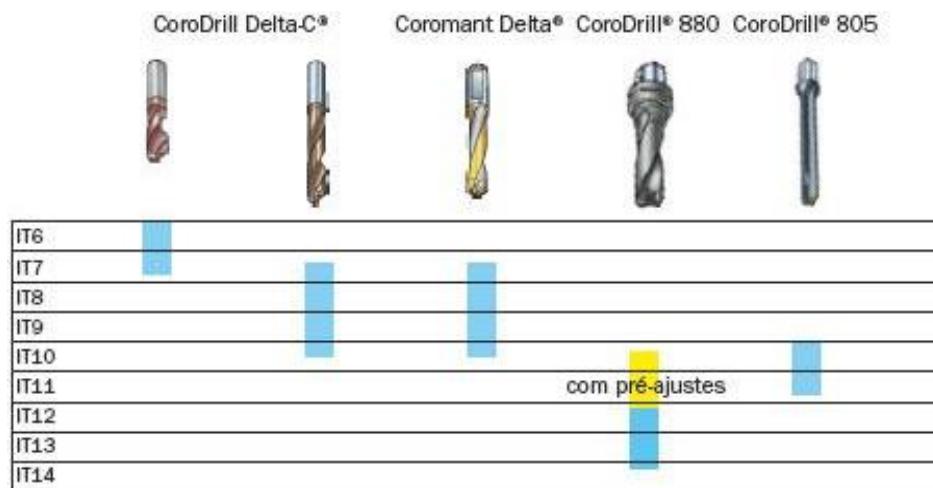


Figura 2.26 – Tipos de brocas especiais (Sandvik, 2012).

2.3.3 - Relação Comprimento / Diâmetro do Furo (L/D).

A relação entre o comprimento e o diâmetro do furo, L/D (do Inglês “Length /Diameter”), é um importante parâmetro que implica na seleção de ferramentas especiais quando esta relação é muito alta e que depende também do desvio de linearidade requerido. A maioria dos furos está na faixa de L/D entre 2 e 3,5. A utilização de ferramentas, técnicas e equipamentos especiais permitem a elevação desta relação em 8 vezes ou mais, conforme mostra a Fig.2.27. Sistemas especiais de furação, conhecidos como trepanação, e com a utilização de broca canhão, permitem a execução de furos com relação comprimento/diâmetro (L/D) superior a 100 em uma faixa de diâmetros de 6 a 750 mm (Stoeterau, 2004).

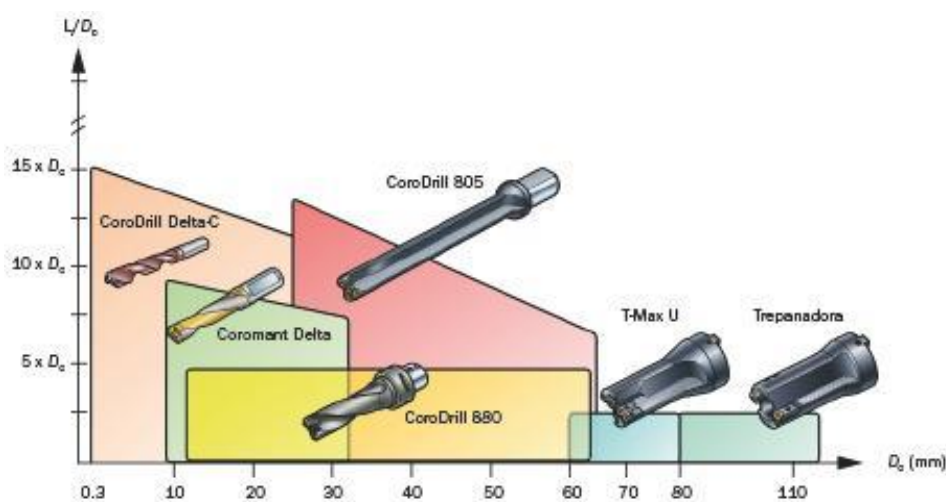


Figura 2.27 – Tipos de brocas especiais para furação profunda – relação L/D em função do diâmetro do furo (Sandvik, 2012).

A escolha adequada de uma broca para um determinado processo dependerá de vários fatores que estão listados na Tab.2.1. Segundo o Metals Handbook (1989), os principais fatores a serem considerados no processo de seleção de ferramentas são descritos na tabela 2.1.

Tabela 2.1- Fatores a serem considerados para escolha ou seleção da broca (Costa, 2004).

Composição e dureza do material	Dimensões do furo a ser executado
Rigidez do mandril	Máquina-ferramenta utilizada
Presença ou não de pré-furo	Tolerância requerida para furo
Número de operações	Custo

Para um melhor aproveitamento em relação à capacidade das brocas na produção de furos com melhor qualidade dimensional e com elevados valores de velocidade de corte, deve-se certificar de que haja estabilidade máxima e fixação segura em todo o sistema, do fuso, passando pela ferramenta até a peça. As vibrações provocam um efeito negativo sobre a segurança da produção, na vida útil da ferramenta e na qualidade dimensional do furo. Uma centralização inadequada de uma broca é a causa mais comum de fraco desempenho de uma broca que gera por sua vez resultados insatisfatórios. O batimento radial mínimo é essencial em um processo de furação, e normalmente deve ser o menor possível (CNI, 2012). Mas quando isso não for

possível ou não existir referência de projeto, recomenda-se não exceder o batimento máximo da ferramenta de 0,02 / 0,03 mm para broca e o mandril (CNI, 2012).

2.4 - Qualidades de Superfícies Usinadas

Assim como a rugosidade de uma superfície, o perfil é bastante importante para determinar a qualidade de uma superfície usinada. Com a crescente demanda na indústria mecânica, o perfil da superfície é considerado um parâmetro decisivo para a análise do desempenho e das propriedades mecânicas das peças fabricadas. Isso é devido à maior necessidade de segurança e confiabilidade (Machado e Da silva, 2000).

A Figura 2.28 apresenta um perfil efetivo de uma superfície, e servirá de exemplo para salientar os elementos que compõem a textura superficial, decompondo o perfil.

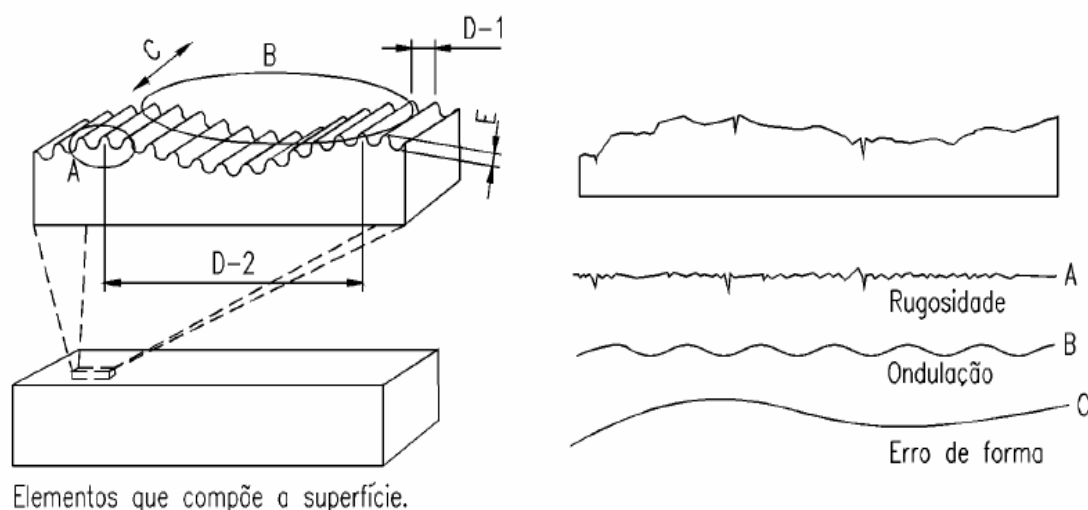


Figura 2.28 – Perfil efetivo de uma superfície (Agostinho, 1977).

O perfil de uma superfície usinada representa o efeito combinado da rugosidade (devido ao processo), ondulação (devido à deflexão e vibração da peça, etc.), marcas de avanço e forma devido à falta de rigidez na máquina (Machado e Da silva, 2000). Porém a rugosidade é o parâmetro mais importante para ser analisado. O valor teórico do perfil é o negativo da ferramenta.

Segundo Ferraresi (2006), este valor leva em consideração somente a influência geométrica do avanço e do raio de ponta da ferramenta. A microestrutura e composição química

de material da peça, a existência de atrito, vibração, aresta postiça de corte, deformação plástica e recuperação elástica do material e da ferramenta, desgaste da ferramenta, entre outros, contribuiu para que o perfil de uma superfície usinada seja bem diferente do valor teórico. A forma do perfil real pode ser então considerada como sendo a somatória do perfil teórico e o efeito combinado dos parâmetros listado anteriormente.

O conceito de tolerância é definido da seguinte forma: quando se mede as dimensões de diferentes peças, cujo funcionamento foi experimentado e considerado adequado, verifica-se que essas dimensões podem oscilar dentro de certos limites, mantendo-se as condições de funcionamento anteriormente previstas. Segundo Agostinho (1977), a diferença entre as duas medidas limites admissíveis, ou seja, entre os valores máximo e mínimo, chama-se tolerância, este conceito pode ser visto na Fig.2.29.

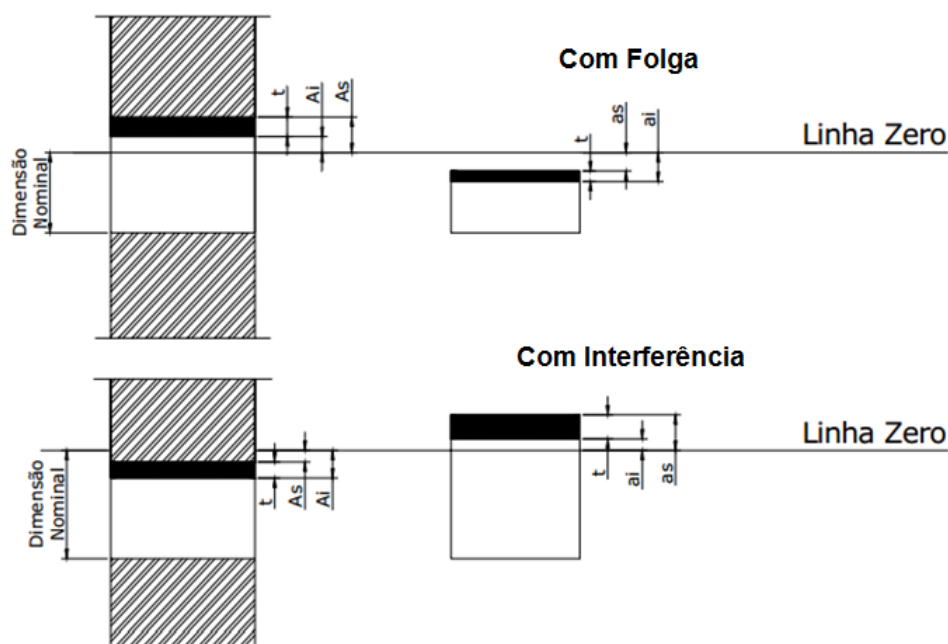


Figura 2.29 – Afastamento superior e inferior de tolerância t para eixo e furo (Sistemas de Tolerâncias e Ajustes, UFPR, 2012).

Por qualidade de trabalho entende-se cada grau de tolerância definido entre peças que se encaixam umas nas outras. O sistema de tolerâncias estabeleceu 18 graus de tolerâncias para cada zona de medida nominal, denominadas como tolerâncias fundamentais (Sistemas de Tolerâncias e Ajustes, UFPR, 2012).

Já a unidade de tolerância (i), é um valor numérico calculado em relação às médias geométricas das dimensões limites de cada grupo. Ela é empregada como referência para o estudo do desenvolvimento do sistema de tolerâncias e determina a ordem de grandeza dos afastamentos onde é dada pela Eq. (1), em μm .

(1)

$$i = 0,45 \sqrt[3]{MGV} + 0,001MGV$$

Onde MGV é a média geométrica dos valores extremos de cada grupo de dimensões nominais (mm).

As tolerâncias geométricas são geralmente enquadradas na categoria das tolerâncias específicas e, juntamente com as tolerâncias dimensionais garantem o cumprimento dos requisitos de funcionabilidade e intercambialidade da peça. Quando mal indicadas, tanto as tolerâncias geométricas quanto as tolerâncias dimensionais elevam demasiada e desnecessariamente os custos de produção, principalmente no que se refere ao controle de qualidade. Tolerâncias de 0,025 a 0,075 mm no diâmetro são comuns nas operações de alargamento para produção em larga escala. Tolerâncias menores que 0,025 mm podem ser alcançadas, mas isto requer um controle muito mais exato das dimensões do alargador, da velocidade de corte, do avanço e de todas as outras variáveis do processo de alargamento. Para o processo de alargamento onde são exigidas tolerâncias muito estreitas, recomenda-se reduzir levemente a conicidade do alargador e alinhar a bucha guia com o alargador, de modo que uma folga mínima possa ser obtida (Metals Handbook, 1989).

2.5 – Desvios de forma

Os desvios de forma são definidos como o grau de variação das superfícies reais com relação aos sólidos geométricos que os definem, e podem ser classificados em:

- Desvios macrogeométricos: retilineidade, circularidade, cilindricidade, planicidade, etc;
- Desvio micro geométrico: rugosidade da superfície (Desvios e Tolerâncias Geométricas, UFMG, 2012).

A seguir será dada uma ênfase nos desvios de forma e em especial no que se refere à cilindridade (CI) e nos desvios de rugosidade, parâmetros estes utilizados na avaliação deste trabalho.

2.6 - Desvio de Cilindricidade

De acordo com a NBR 6409 (ABNT, 1997), a cilindridade é definida como a metade da diferença entre cilindros concêntricos que contêm o perfil adquirido, ou seja, metade da diferença entre o maior diâmetro (D) e menor (d), conforme mostrado na Fig.2.30.

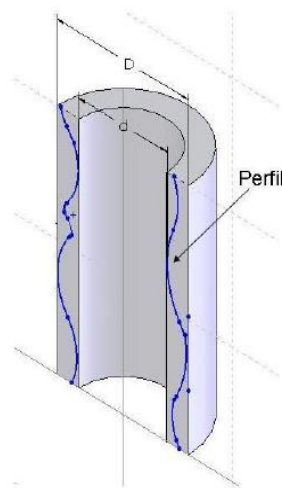


Figura 2.30 - Definição de desvio de cilindridade (Adaptado de Lima Junior, 2009).

Os desvios de cilindridade podem ser causados por diversos desvios de forma no furo, como mostrado na Fig.2.31.

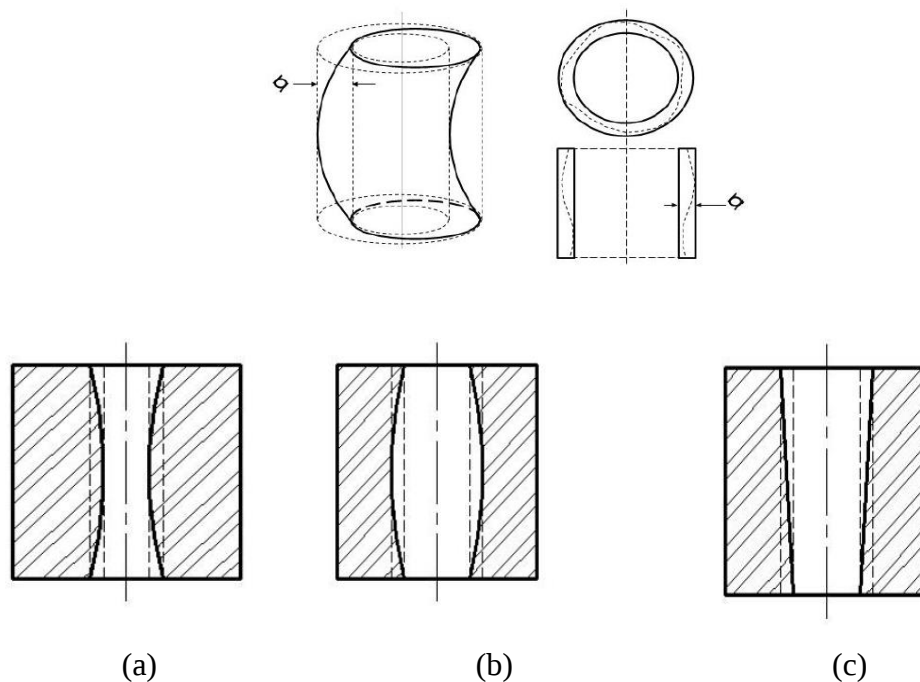


Figura 2.31 - Exemplos de desvios de cilindridade: (a) Concavidade; (b) Convexidade; (c) Conicidade (Adaptado - Agostinho, 1977; Lima Junior, 2009).

Segundo Bezerra (1998), existem alguns desses desvios de forma na produção de furos, para tanto devem ser considerados os erros de circularidade e cilindridade, como os principais obstáculos quando se almeja alta precisão e alta qualidade dos furos.

Zeilmann (2003) realizou estudos sobre furação da liga de titânio Ti6Al4V com diferentes ferramentas (brocas com geometria de corte modificada e brocas com comerciais) na presença de fluido aplicado pela técnica MQF. O autor a qualidade dimensional e os desvios macrogeométricos dos furos: circularidade e cilindridade, além da integridade superficial. Ele verificou que as brocas com geometria modificada proporcionaram os melhores resultados e eles foram satisfatórios para quase todos os ensaios situando-se dentro da tolerância H8 exigida.

2.7 - Desvios Microgeométricos

Quando se refere a requisitos de um ótimo acabamento da superfície, deseja-se que o chamado desvio microgeométrico seja o menor possível. Este desvio microgeométrico é quantificado pela rugosidade da superfície (Bezerra, 1998).

Segundo a NBR-ISO 4287, a rugosidade é o conjunto de irregularidades, isto é, pequenas saliências e reentrâncias que caracterizam uma superfície. Essas irregularidades podem ser avaliadas com aparelhos eletrônicos, a exemplo do rugosímetro. A rugosidade desempenha um papel importante no comportamento dos componentes mecânicos. Ela afeta os seguintes aspectos: qualidade de deslizamento; resistência ao desgaste; possibilidade de ajuste do acoplamento forçado; resistência oferecida pela superfície ao escoamento de fluidos e lubrificantes; qualidade de aderência que a estrutura oferece às camadas protetoras; resistência à corrosão e à fadiga; vedação e a aparência.

A grandeza, a orientação e o grau de irregularidade da rugosidade podem indicar suas causas que, entre outras são: imperfeições nos mecanismos das máquinas-ferramenta; vibrações no sistema peça-ferramenta; desgaste das ferramentas; o próprio método de conformação da peça. Essas diferenças de forma (ranhuras ou sulcos) são provenientes de marcas de avanço e ocorrem devido ao contato entre a ferramenta e a peça durante o movimento de avanço, ou posicionamento da ferramenta no processo de usinagem. A altura ou profundidade média das irregularidades é medida em um pequeno comprimento chamado de “*cut-off*” (comprimento de rugosidade da amostra). A norma NBR ISO 4287:2002 define R_a (da literatura Inglesa *roughness average*) rugosidade média, como vista na Fig.2.32, como a média aritmética dos valores absolutos das ordenadas de afastamento, dos pontos do perfil de rugosidade em relação à linha média, dentro do percurso de medição.

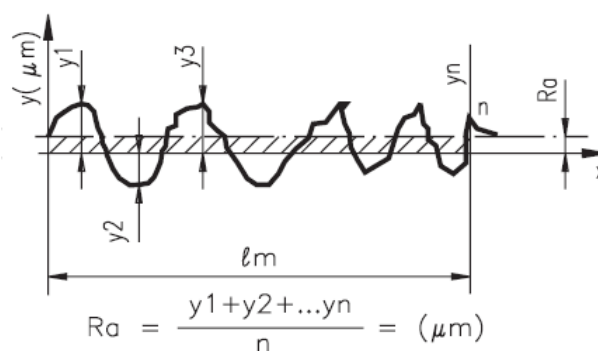
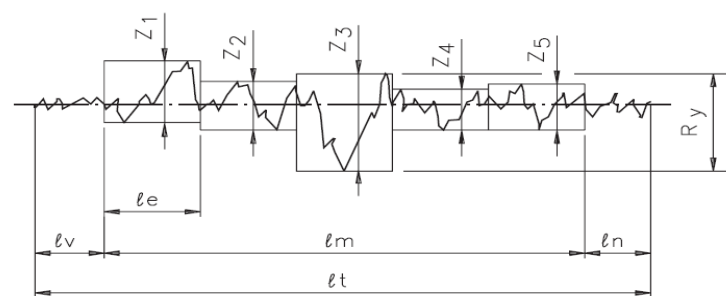


Figura 2.32 - Definição de Rugosidade R_a (Agostinho, 1977).

Essa grandeza pode corresponder à altura de um retângulo, cuja área é igual à soma absoluta das áreas delimitadas pelo perfil de rugosidade e pela linha média, tendo por comprimento o percurso de medição (l_m). Sendo que a rugosidade média R_a é o parâmetro mais

empregado no estudo da rugosidade superficial dos materiais e é comumente o mais utilizado no controle da qualidade de superfícies usinadas destinadas à indústria

Yamada (2010) define a rugosidade R_y como o maior valor das rugosidades parciais que se apresenta no percurso de medição (ℓ_m) podendo ser empregado nos seguintes casos: superfícies de vedação, assentos de anéis de vedação, superfícies dinamicamente carregadas, tampões em geral, parafusos altamente carregados; superfícies de deslizamento em que o perfil efetivo é periódico, como ilustra a Fig. 2.33.



Rugosidade R_y definida pela rugosidade parcial (neste caso Z_3)

Figura 2.33 - Definição de Rugosidade R_y (Agostinho, 1977).

Quanto à rugosidade média R_z , esta é definida como à média aritmética dos cinco valores de rugosidade parcial como ilustra a Fig. 2.34.

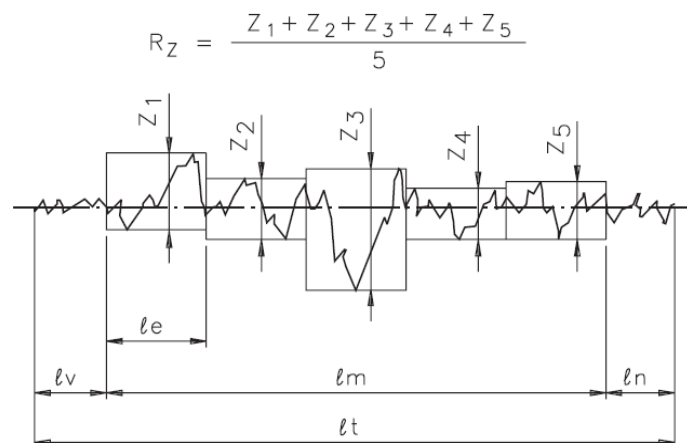


Figura 2.34 - Definição de Rugosidade R_z (Agostinho, 1977).

Por rugosidade parcial entende-se como sendo a soma dos valores absolutos das ordenadas dos pontos de maior afastamento, acima e abaixo da linha média, existentes no comprimento de

amostragem (*cut off*). Além da forte influência da velocidade de corte e do avanço, a rugosidade das peças é influenciada pela condição da ferramenta (nova ou desgastada). Dependendo do valor de desgaste de flanco, ou se já houve falha catastrófica da ferramenta, a rugosidade poderá aumentar consideravelmente. Portanto, a medição da rugosidade pode ser utilizada para monitorar o acabamento da superfície da peça e, indiretamente, a condição da ferramenta (Sistemas de Tolerâncias e Ajustes, UFPR, 2012).

A seguir são apresentados alguns trabalhos da literatura que estudaram o processo de furação que analisaram, dentre outros parâmetros, os desvios geométricos e dimensionais.

Harris (2003) investigou diferentes tipos de revestimentos (TiN, TiAlN e TiAlCrN) em brocas de aço rápido (M35) de diâmetro 6,8 mm na usinagem de Ferro Fundido cinzento. Fixou a velocidade de corte em 51,3 m/min, $f = 21$ mm/rot e profundidade do furo: 20,4mm ($L/D = 3 \times D$) e informou ter obtido furos com qualidade IT8.

Oliveira (2008) estudou a influência de 3 geometrias de afiação da ponta em brocas helicoidais revestidas por TiAlN do fabricante Gühring do Brasil (afiação em S, em cruz e a geometria com ponta em raio) de Ø6 mm, sem os canais de refrigeração, na usinabilidade do ferro fundido vermicular. A autora observou que a geometria influenciou na qualidade do furo, e foram obtidas tolerâncias IT9 e rugosidades da ordem de $1,2\mu\text{m}$.

Reddy (2009) avaliou o desenvolvimento de um sistema de lubrificação eletroestática para furação de uma liga de aço SCM 440 com brocas modelo futura nano (cobertura de TiAlN) com diâmetro igual a 8 mm. Foi investigado o desgaste da ferramenta, diâmetro do furo, a força de avanço e acabamento superficial. O autor informou ter conseguido uma qualidade de trabalho na faixa de IT8-IT9.

Machado (2011) estudou o desempenho de diferentes tipos de geometrias de pontas de broca escalonada (ponta normal e ponta esférica) com diâmetro de 10,5/18 mm (sem revestimento, classe K10) usinando ferro fundido cinzento ABNT FC25 (GG25). Considerou como variáveis de saída a cilindricidade, a rugosidade e o desgaste ocorrido nas ferramentas ao final do processo de furação. Observou-se que a broca com geometria de ponta esférica obteve os melhores resultados em termos de tolerâncias dimensionais. A broca com geometria de ponta normal gerou uma qualidade de trabalho IT9-IT10 com desvio de circularidade (C_r) de 0,080 a 0,085 mm e a broca com geometria de ponta esférica obteve uma qualidade de trabalho IT7-IT8 e (C_r) = 0,009 mm. Em relação ao desgaste, houve uma redução em 85% com $VB_B = 0,3$ mm e cerca 90% de redução com o desgaste em torno de 1,1mm para um tempo de corte de 185 min quando utilizada as brocas com geometria de ponta esférica.

2.8 - Desgastes em Ferramentas de Corte - ênfase em Brocas e Alargadores

Durante a usinagem dos metais a ação de cortar muda a forma e, portanto, a geometria original da ferramenta de corte. Verifica-se um desgaste progressivo tanto na superfície de folga como na superfície de saída da ferramenta. A Fig.2.35 apresenta as principais áreas de desgaste de uma ferramenta de geometria definida, que pode ser de insertos, brocas, alargadores e fresas.

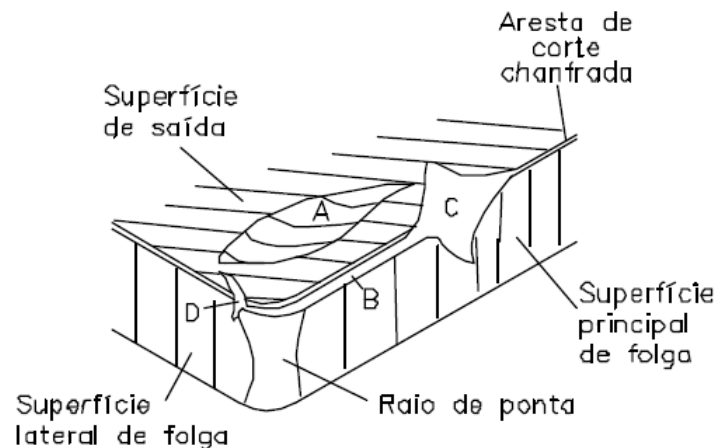


Figura 2.35 - Principais áreas de desgaste de uma ferramenta de corte (Trent, 1982).

Da Fig.2.35 são observadas pelo menos três formas de desgaste (Sandvik, 2012):

- i) Desgaste de cratera (área A): é encontrado na superfície de saída da ferramenta como consequência do atrito entre a ferramenta e o cavaco. O desenvolvimento deste tipo de desgaste está diretamente ligado à temperatura e à pressão de corte. Este tipo de desgaste não influencia diretamente na rugosidade ou na tolerância da peça, mas sim na geometria do ângulo de saída e no comprimento de contato cavaco-peça. O crescimento do desgaste de cratera pode gerar a quebra da ferramenta, quando tal desgaste se encontra com o desgaste de flanco (Sandvik, 2012).
- ii) Desgaste de flanco (área B): ocorre na superfície de folga da ferramenta, causado pelo contato entre a ferramenta e a peça. É o tipo mais comum de desgaste. Ele leva à deterioração do acabamento superficial da peça, pois modifica totalmente a aresta de corte original. Faz com que a peça mude de dimensão (Sandvik, 2012).
- iii) Desgaste de entalhe (áreas C e D): ocorre nos dois extremos de contato entre a superfície de folga da ferramenta e a peça (Sandvik, 2012).

2.8.1 Desgaste em Broca Helicoidal

Como a geometria de brocas e alargadores é diferente das ferramentas de torneamento e fresamento, como por exemplo, pela presença de canais e da aresta transversal, existem algumas peculiaridades na ocorrência do desgaste para estas ferramentas. A Figura 2.36 ilustra as principais formas de desgastes que são encontrados em brocas helicoidais:

- Desgaste de flanco $VB_{B \text{ máx}}$ (baixa qualidade, imprecisões e aumento do atrito);
- Desgaste nas guias - não gera aumento no momento;
- Desgaste do gume transversal - arredondamento e possível lascamento das zonas de transição;
- Desgaste de cratera - remoção de material por abrasão e difusão;
- Fratura - falha catastrófica

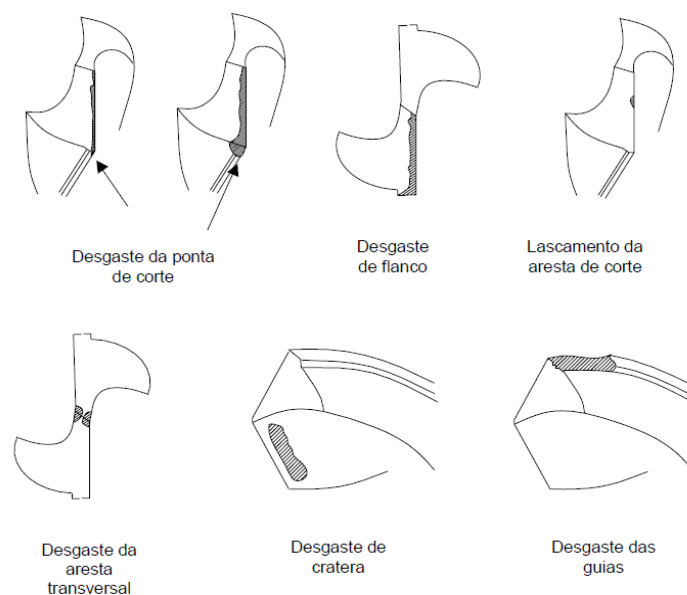


Figura 2.36 - Formas desgaste de uma broca helicoidal (Costa et al., 2004).

Antes que um desses desgastes atinja grandes proporções, de maneira a colocar o processo de corte em risco, a ferramenta deverá ser substituída.

Os fatores mais importantes que influenciam os diversos tipos de desgaste são as propriedades mecânicas e químicas dos materiais em contato, as condições de trabalho, e principalmente a velocidade de corte e a temperatura. Em baixas velocidades, o desgaste por abrasão e aderência é mais importante, enquanto em altas velocidades é a deformação plástica e a difusão (Dormer, 2007).

Bordim (2008) em seus estudos sobre a relação entre o desgaste e a força de avanço na determinação do fim de vida efetivo de uma broca helicoidal, na usinagem aço AISI P20 endurecido, com brocas helicoidais de aço-rápido, não revestidas, com diâmetro de 6 mm, e $L/D = 2$, na condição a seco, verificou que o mecanismo de desgaste abrasivo resultou no desgaste acelerado, tanto nas arestas principais quanto na aresta transversal da ferramenta, o que resultou na elevação da força de avanço para a ferramenta na condição em fim de vida, conforme mostram as Figuras 2.37(a) e (b).

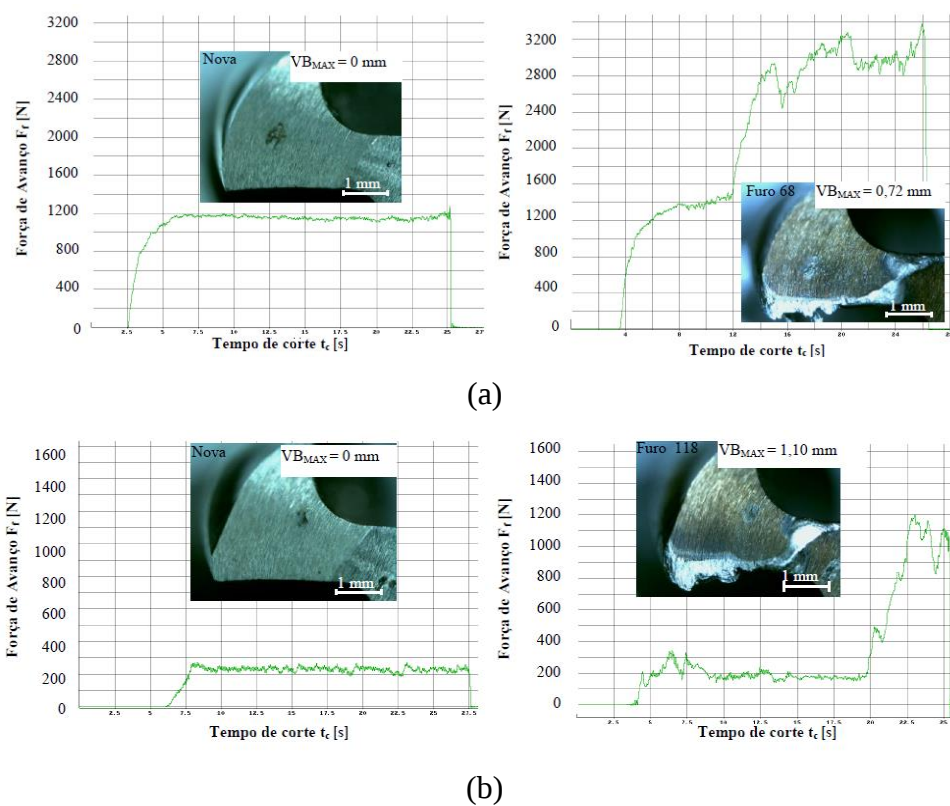


Figura 2.37 (a) - Comportamento da força de avanço, com a ferramenta em estado novo e em fim de vida, sem pré-furo; (b) - Comportamento da força de avanço, com ferramenta em estado novo e em fim de vida, com pré-furo (Bordim, 2008).

Calza (2005) em seus ensaios de furação em cheio de aço DIN 1.2711 (38 - 43 HRC), com brocas helicoidais de HSS, de diâmetro de 8 mm, investigou os tipos e mecanismos de desgaste em função do sistema de lubri-refrigeração (em abundância, MQF e ar comprimido). Os testes foram com avanço intermitente (ciclo pica-pau) para facilitar a saída do cavaco, com profundidade do furo igual a 40 mm ($L/D = 5$ - considerados como furos profundos), Figuras 2.38 (a) a (c).

Segundo o autor, quando utilizado o sistema de lubri-refrigeração em abundancia conforme mostra a Fig. 2.38 (a) observa-se uma pequena quantidade de aderência de material da peça sobre a aresta de corte e sobre a quina das brocas, que ele atribuiu este fato à ação refrigerante e lubrificante da emulsão, que mantém reduzida a temperatura da peça.

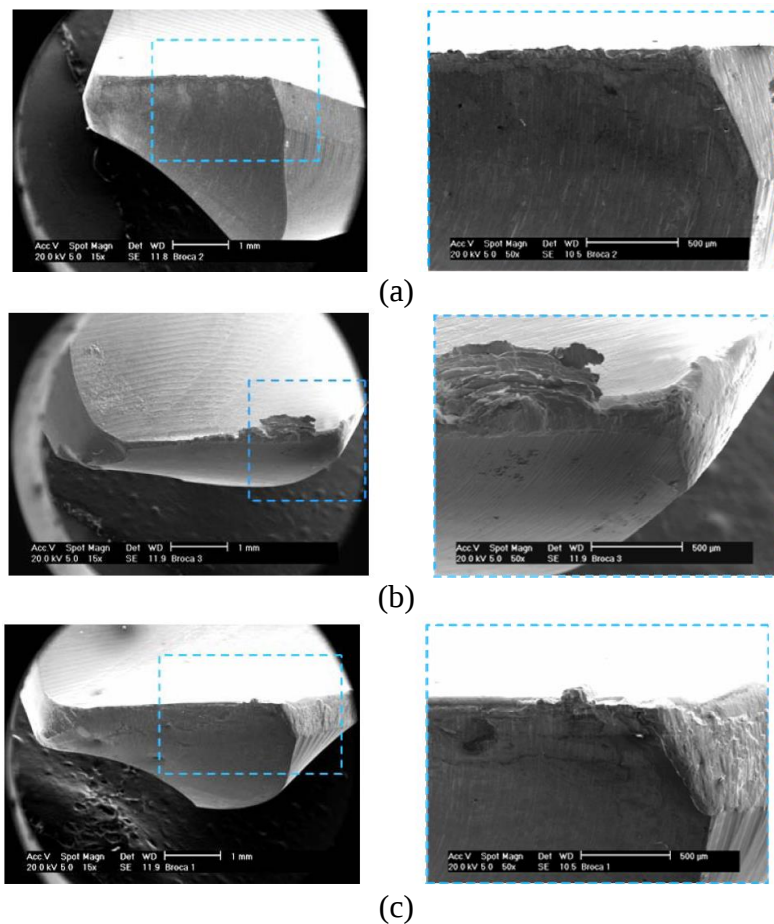


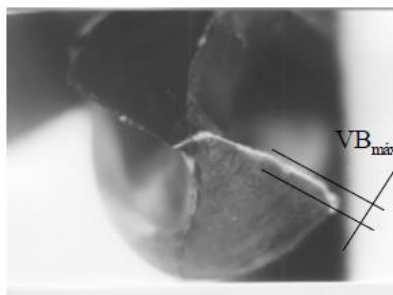
Figura 2.38 - (a) Desgaste de flanco da broca na usinagem com aplicação de fluido em abundância; (b) Desgaste de flanco da broca na usinagem com aplicação de MQF. (c) Desgaste de flanco da broca na usinagem com aplicação de ar comprimido (Calza, 2005).

A Fig.2.38 (b) ilustra o desgaste de flanco a empregar a técnica MQF. Observa-se que há grande quantidade de material aderido à aresta de corte e que o autor informou ter dificultado a medição do desgaste para esta condição. Segundo o autor, o processo de furação foi interrompido neste estágio devido ao intenso ruído e ao arredondamento excessivo das arestas.

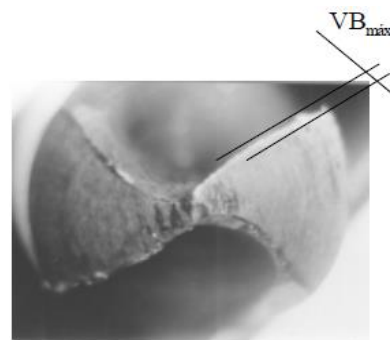
Na Fig.2.38 (c) é possível visualizar a aderência de material no flanco e na guia da ferramenta, após a aplicação de ar comprimido onde se tem uma condição de corte mais severa

na furação, devido a maior temperatura ocasionada pelo atrito cavaco/ferramenta e guia/parede do furo. Dessa forma, as solicitações mecânicas e térmicas as quais à aresta de corte da broca é submetida são mais acentuadas, sendo os mecanismos de adesão e abrasão predominantes na formação do desgaste de flanco.

Fávaro (2007) em seus estudos sobre a análise e pré-otimização do processo de furação dos perfis “U” de aço LN24 (NBR6655) utilizado na montagem de chassi, com brocas HSS (DIN341) revestidas com TiN, TiAlN e TiN/TiCN, com diâmetros de 12 e 13 mm, observou desgastes de flanco e micro lascamentos que estão apresentados nas figuras 2.39(a), (b) e Fig. 2.40.



a) Broca B17 - $VB_{Bmáx} = 0,81 \text{ mm}$



b) Broca B15 - $VB_{Bmáx} = 0,62 \text{ mm}$

Figura 2.39 - Desgaste de flanco em brocas de HSS: (a) com revestimento de TiN/TiCN e (b) com revestimento de TiN (Fávaro, 2007).

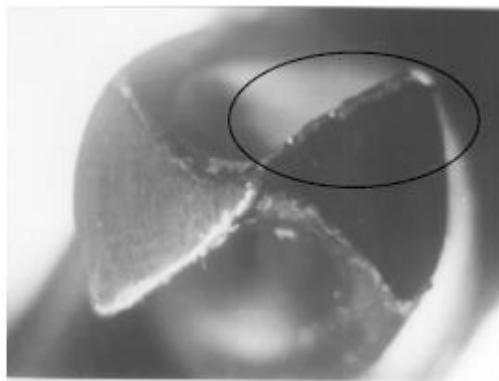


Figura 2.40 – Broca de HSS com microlascamento na aresta de corte (Fávaro, 2007).

Lugscheider (1999) investigou o uso de alargadores rígidos de metal duro utilizando-se pastilhas revestidas pela técnica de deposição física de vapor (PVD) na usinagem de ferro fundido nodular (GG 25) na condição a seco, com velocidade de corte (V_c) = 150 m/min, com um avanço (f) = 0,1mm/rot. O valor empregado de sobremetal no processo de alargamento foi de 0,25 mm onde ao final dos testes verificou-se que o desgaste do tipo cratera foi o mais predominante, conforme mostra a Fig. 2.41.

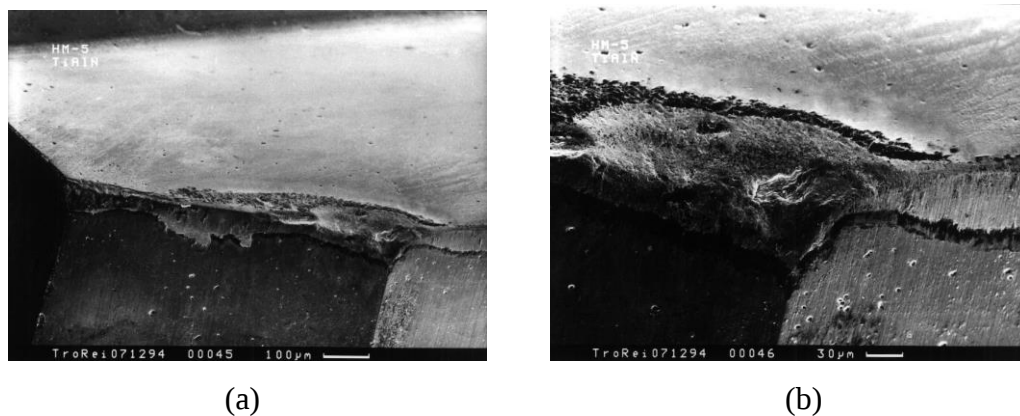


Figura 2.41 – (a) desgaste de flanco; (b) desgaste de cratera em alargadores (Lugscheider, 1999).

Harris (2003) investigou diferentes tipos de revestimentos para brocas de HSS (TiN, TiAlN e TiAlCrN) na usinagem de Ferro Fundido cinzento, e verificou que o desgaste nas brocas foi mais acentuado na quina das brocas utilizadas ao final do furo de número 20. A Fig.2.42 mostra o maior valor de desgaste ocorrido em relação ao revestimento utilizado.

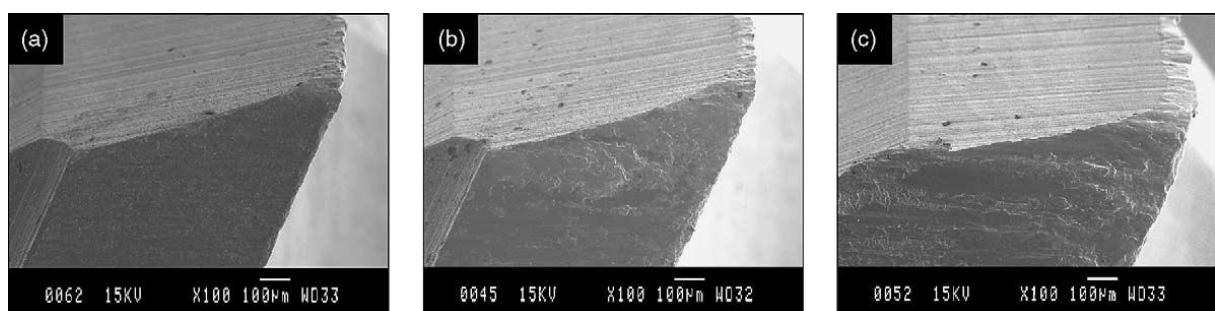


Figura 2.42 – Imagens do desgaste nas quinas da broca de Co-HSS com o revestimento do $Ti_{0.21}Al_{0.14}Cr_{0.65}N$: (a) estágio I (após 1 furo), (b) estágio II (após 05 furos) e (c) o estágio III (falha após 20 furos) (Harris, 2003).

2.9 – Recomendações para soluções de problemas na furação com brocas convencionais

Não existem normas ou consenso na literatura sobre soluções para resolver os problemas que podem surgir durante um processo de furação com brocas helicoidais convencionais, mas um fabricante de ferramentas propôs as seguintes recomendações que podem ser úteis ou pelo menos orientar na busca de soluções para os problemas mais comuns em brocas convencionais e também em brocas com geometria especial. Elas são listadas na Tab. 2.2.

Tabela 2.2 - Dicas práticas para soluções de problemas no processo de furacão com brocas convencionais (Sandvik, 2012).

Problemas	Soluções
Face frontal da broca quebrada	Realinhar a broca
	Selecionar uma classe mais tenaz
	Melhorar a estabilidade, reafixar a peça, diminuir o balanço da broca.
	Verificar as recomendações de v_c e f
Desgaste no diâmetro externo da broca	Realinhamento da broca
	Melhorar a estabilidade, reafixar a peça, diminuir o comprimento em balanço da broca.
	Verificar as recomendações de v_c e f
	Verificar a classe de metal duro
Furo acima ou abaixo do diâmetro	Realinhar a broca no furo
	Reduzir o avanço
	Verificar o fundo do furo ou a dimensão, caso necessário alinhe a broca.
	Verificar as recomendações de v_c e f
Vibrações	Reduzir f
	Melhorar a estabilidade, reafixar a peça, diminuir o comprimento em balanço da broca.
	Verificar as recomendações de v_c e f
Furo não simétrico	Reduza o avanço
	Melhorar a estabilidade, reafixar a peça, diminuir o comprimento em balanço da broca.
	Verificar as recomendações de v_c e f
Vida útil insatisfatória	Aumentar o fluxo de refrigeração
	Melhorar a estabilidade, reafixar a peça, diminuir o comprimento em balanço da broca.
	Verificar a classe de metal duro
	Verificar as recomendações de v_c e f

2.10 – Ferros Fundidos

Segundo Chiaverini, (1988) pode se definir ferro fundido como sendo uma liga de ferro-carbono-silício, de teores de carbono geralmente acima de 2%, em quantidade superior à que pode ser retida em solução sólida na austenita, de modo a resultar carbono parcialmente livre, na forma de veios ou lamelas de grafita. A maioria dos ferros-fundidos contém silício entre 1 e 3% e enxofre, podendo ou não haver outros elementos de liga.

Dentre as ligas de ferro e carbono, os ferros fundidos constituem um grupo de ligas de fundamental importância para as indústrias, não só pelas características do material, mas também pela sua capacidade de alterar suas propriedades em função da presença de outros elementos de liga e por meio de tratamentos térmicos. Esta característica faz com que o ferro fundido seja utilizado em aplicações que outrora eram exclusivamente aos aços.

2.10.1 – Tipos de ferros fundidos

Em relação a sua denominação, os ferros fundidos são classificados em (Chiaverini, 1996):

a) Ferro Fundido Cinzento: Sua estrutura apresenta uma parcela relativamente grande de carbono no estado livre (grafita lamelar) e outra parcela no estado combinado (cementita - Fe_3C) conforme mostra a Fig. 2.43 (a).

b) Ferro Fundido Nodular: Sua estrutura apresenta o carbono livre na forma de nódulos ou esferoidal conforme mostra a Fig. 2.43 (b).

c) Ferro Fundido Branco: Sua estrutura apresenta o carbono quase inteiramente na forma combinada (Fe_3C) conforme mostra a Fig. 2.43 (c).

d) Ferro Fundido maleável: obtido a partir do ferro fundido branco quando submetido a um tratamento térmico denominado maleabilização. Este tratamento prevalece praticamente em todo o ferro combinado em grafita na forma de nódulos, conforme mostra a Fig. 2.43 (d).

e) Ferro Fundido Mescado: Sua estrutura apresenta uma mescla de proporções variáveis de Ferro fundido branco e Ferro fundido cinzento.

f) Ferro Fundido Vermicular: material empregado recentemente em grande escala para fabricação de motores a combustão devido à sua grande resistência mecânica se comparado aos ferros fundidos tradicionais. Apresenta grafitas em forma de “vermes”, ou seja, corpo com característica lamelar com as extremidades arredondadas conforme mostra a Fig. 2.43 (e).

As Figuras 2.43 (a) a (e) mostra as microestruturas dos principais tipos de ferros fundidos; (f) e (g) mostra micrografia do ferro fundido vermicular.

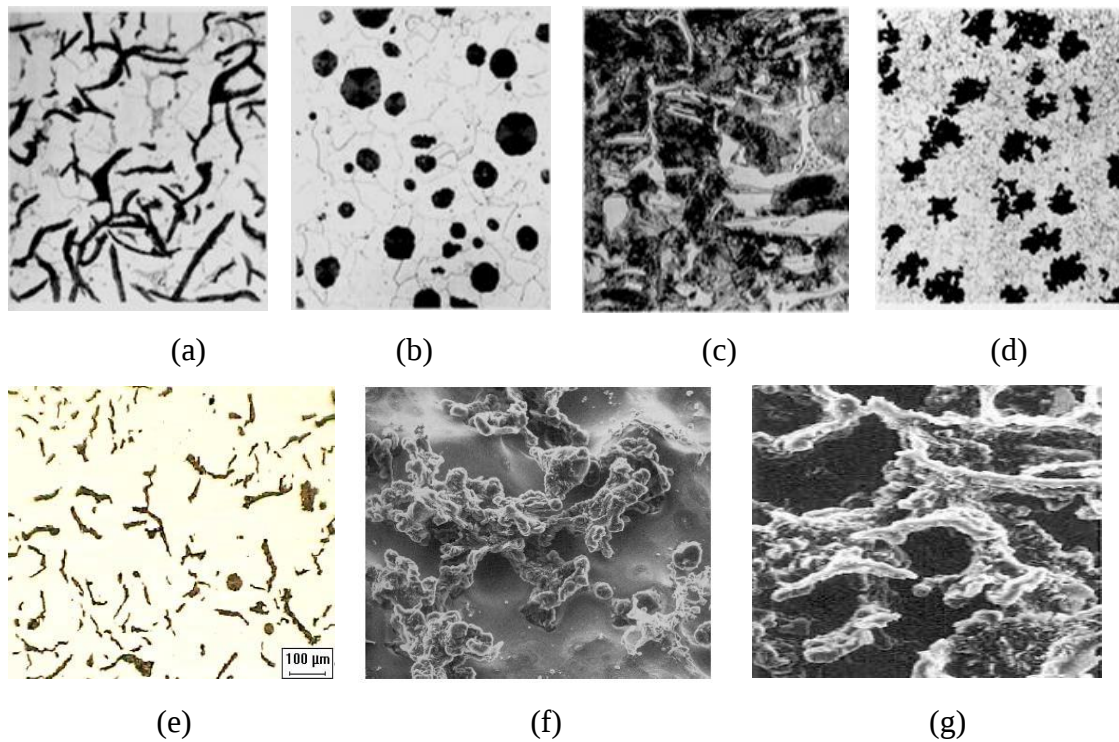


Figura 2.43 – Microestruturas dos principais tipos de ferros fundidos: a) ferro fundido cinzento x 500; b) ferro fundido nodular x 200; c) ferro fundido branco x 400; d) ferro fundido maleável x 150; (e) ferro fundido vermicular, com 95% grafita em forma de vermes e 5% grafita nodular; (f) e (g) Micrografias do ferro fundido vermicular (Adaptado de Callister Jr, 2000; Mocellin, 2002).

Como o ferro fundido vermicular será o material utilizado para os ensaios de furação e alargamento neste trabalho, a seguir serão apresentadas as principais características e propriedades deste material.

2.10.1.1 – Ferro Fundido Vermicular

O ferro fundido vermicular é um material recentemente colocado no mercado, considerado um produto de propriedades intermediárias entre o ferro fundido cinzento e o ferro fundido dúctil ou nodular (Machado et al., 2011). Ele possui melhor resistência mecânica e ductibilidade em relação ao cinzento, além de um melhor acabamento na usinagem. Já em relação ao ferro fundido

vermicular quando comparado com o ferro fundido nodular, o vermicular apresenta uma maior capacidade de amortecimento, condutividade térmica elevada e uma melhor usinabilidade (Chiaverini, 1988). Em comparação com os ferros fundidos cinzentos, aqueles grafíticos compactos possuem maior resistência mecânica, maiores ductilidade e tenacidade e menor oxidação a temperaturas elevadas. Já na comparação com os ferros fundidos dúcteis, possuem menor coeficiente de expansão térmica, maior condutibilidade térmica, maior resistência ao choque térmico, maior capacidade de amortecimento, melhor fundibilidade e melhor usinabilidade.

O ferro vermicular vem encontrando aplicações em blocos de motor, e sua usinabilidade são normalmente comparadas com a do ferro fundido cinzento. Devido às diferenças de formação do cavaco e maiores forças de corte envolvidas é menor a usinabilidade do vermicular; além disso, o vermicular é produzido com baixo teor de enxofre, não estando presentes então as partículas de sulfeto de manganês. Em especial o processo de mandrilamento dos cilindros de bloco de motor é a que apresenta as menores vidas de ferramenta. No ferro fundido vermicular a grafita apresenta-se na forma de vermes (ou grafita compacta), com um pequeno percentual de grafita em nódulos. A matriz pode conter proporções variadas de ferrita e perlita (Machado et al., 2011). A Tabela. 2.3 mostra a composição química do ferro fundido vermicular comparado com o ferro fundido cinzento.

Tabela 2.3 – Comparação entre a composição química do ferro fundido vermicular e do ferro fundido cinzento (Adaptado de Mocellin, 2002).

% em peso								
Elemento Químico		C	Si	Mn	P	S	Mg	Cu _{eq} ⁶
Ferro Fundido	Vermicular	3,1 a	1,7 a	0,1 a	máx	0,007 a	0,08 a	0,6 a
		4,0	3,0	0,6	0,065	0,012	0,14	1,5
	Cinzento	3,4 a	2,3 a	0,50 a	máx	0,05 a	-	0,70 a
		3,6	2,5	60	0,065	0,12		0,90

As principais variáveis que influenciam a usinabilidade do ferro fundido vermicular são (Mocellin, 2002):

- Efeito da forma da grafita;
- Efeito do tipo e proporção de perlita;
- Efeito de elementos químicos (Sb, Mn, Si, S, Ti, Cr);
- Efeito das inclusões.

Sabe-se que a usinabilidade do ferro fundido vermicular é em grande parte influenciada pela sua forma de obtenção. A vermicularização da grafita deve-se à ação do magnésio, que é um elemento nodulizante, e que para a formação da grafita compactada, o teor de magnésio ativo na liga deve ser mantido na faixa de aproximadamente 0,01 e 0,02%. Como este controle de composição é complexo, nos processos normais de fundição, utiliza-se titânio, elemento antinodulizante, em teores de 0,1 a 0,2%, o qual amplia a faixa de obtenção de vermicular para valores mais altos de magnésio. Além disso, é importante atentar-se para a qualidade de limpeza da superfície da peça fundida, pois a presença de residuais de areia de moldagem ou ainda produtos de reação metal/molde podem diminuir significativamente a vida da ferramenta, sendo tão importantes quanto os aspectos microestruturais anteriormente mencionados (Machado et al., 2011).

De um modo geral, a usinabilidade desta classe de ferro fundido decresce à medida que se caminha para classes de maior resistência, devido ao aumento da quantidade de perlita na matriz. Sabe-se que, nos ferros fundidos, a presença de partículas duras de cementita eutética, formadas na solidificação, reduzem consideravelmente a usinabilidade. Um resultado importante é a observação recente de que, tanto em ferro fundidos cinzentos como em nodulares e vermiculares perlíticos, a quantidade de cementita na perlita tem um efeito significativo na usinabilidade. A variação da forma da grafita de lamelar para vermicular faz com que se altere o modo de ruptura do cavaco, passando a ser mais dúctil. O comportamento frágil do ferro fundido cinzento faz com que os contatos do material com o flanco e a face de saída da ferramenta sejam intermitentes, existindo, portanto intervalos de tempo em que não existe contato abrasivo sobre a ferramenta (Mocellin, 2002). Este autor cita ainda que o aumento de quantidade de perlita reduz consideravelmente a vida de brocas, comportamento este mais usualmente observado em ferros fundidos.

A usinabilidade dos ferros fundidos de um modo geral será dependente da resistência e ductilidade, ou seja, de sua fragilidade, uma vez que os ferros fundidos são em sua maioria ferríticos ou perlíticos. A aresta postiça de corte (APC) se forma em baixas velocidades de corte e ela persiste a velocidades de corte maiores que quando comparados na usinagem dos aços. O tipo de desgaste predominante na usinagem dos ferros fundidos é por *attrition*, e em relação à distribuição de temperatura na ferramenta ela se difere daquela utilizada na usinagem dos aços, diante do exposto, como o cavaco não é contínuo na usinagem dos ferros fundidos a máxima temperatura é observada bem próxima à aresta de corte da ferramenta, isto faz com que assim a

velocidade de corte máxima se torne limitada pela deformação plástica (Machado; Da Silva 2004).

Esta classe de ferro fundido abrange uma grande faixa, e os principais são: bloco de motores a diesel, alojamentos de caixas de engrenagens, alojamentos para turbo alimentadores, suportes de rolamentos, rodas dentadas para correntes articuladas, engrenagens excêntricas, moldes para lingotes, coletores de descarga de motores e discos de freio (Machado et al., 2011).

CAPITULO III

PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

Neste capítulo é descrita a metodologia utilizada para a realização dos ensaios de furação/alargamento com brocas e alargadores convencionais e também dos ensaios de furação com broca especial em barras de ferro fundido vermicular.

Inicialmente foram realizados pré-testes de furação para identificar os parâmetros e corte que resultassem em consideráveis valores de desvios de forma em função do número de furos e tempo de usinagem que pudessem ser utilizados como referência para os ensaios de usinagem definitivos com brocas e alargadores convencionais de metal duro e, em seguida, com broca especial.

Conforme ilustrado na Fig. 3.1, o fluxograma apresenta as etapas desenvolvidas no procedimento experimental, desde as informações dos materiais da peça e das ferramentas, dos ensaios de usinagem tanto empregando os processos de furação seguida do processo de alargamento e furação com broca especial, as etapas de análise da qualidade dos furos usinados e também as características que foram observadas das ferramentas de corte.

As variáveis de saída utilizadas para determinar o desempenho das operações de furação/alargamento e furação com broca especial foram a rugosidade da superfície (R_a e R_y), desvio dimensional do furo (qualidade de trabalho, IT), desvio de cilindricidade e medição da microdureza dos furos usinados. Foi também empregada a ferramenta de teste de hipóteses para verificar se houve influência estatística entre os parâmetros de saída avaliados para os furos. Em relação às ferramentas de corte, foi medido o desgaste com a evolução do número de furos. Foi feita uma análise das condições econômicas de corte em função das ferramentas e parâmetros de corte empregados.

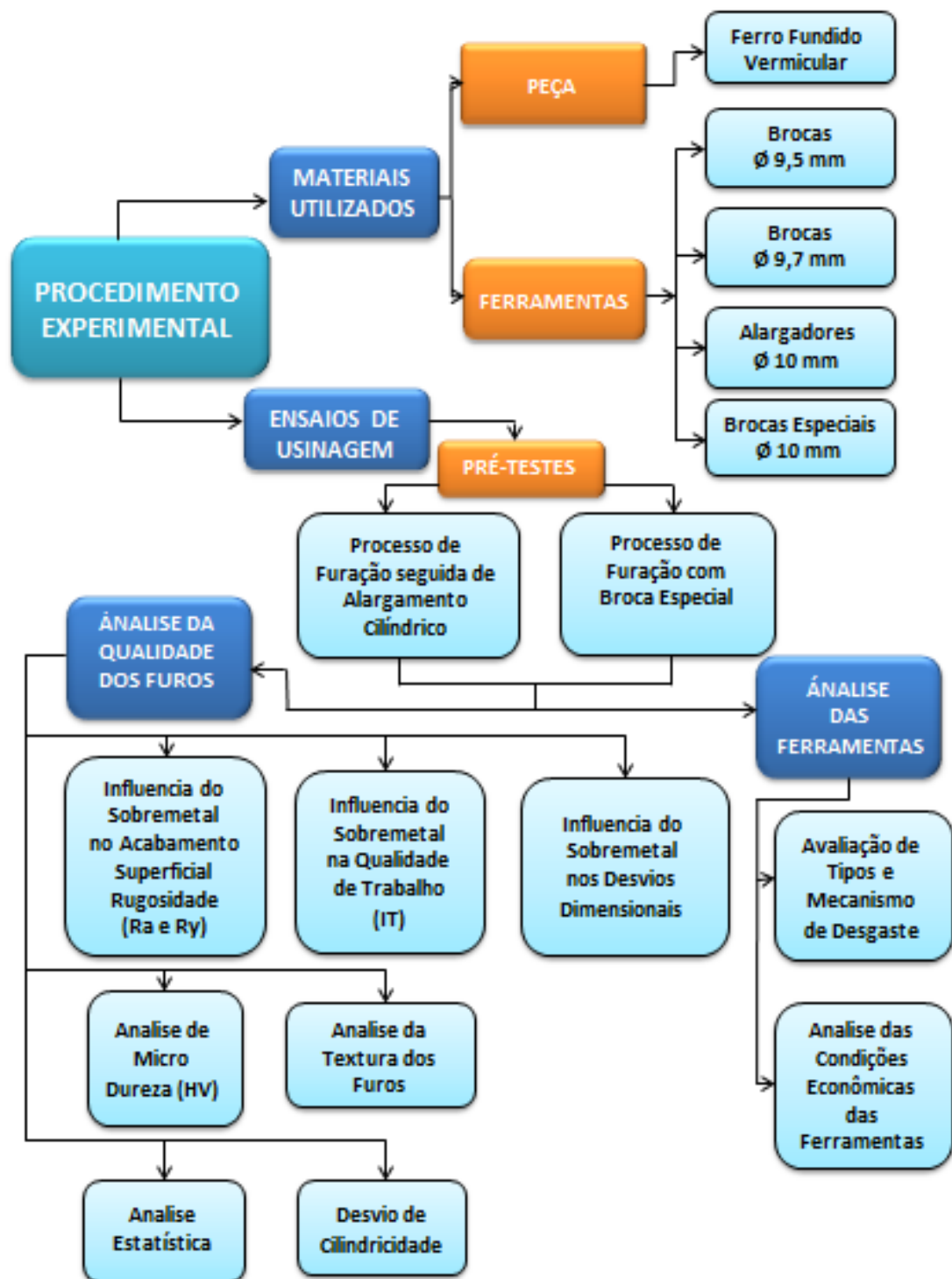


Fig. 3.1- Fluxograma das etapas do procedimento experimental.

3.1 – Material da peça

O material da peça utilizado foi o ferro fundido vermicular (CGI), em forma de blanques retangulares com dimensões de 500 mm x 200 mm x 50 mm (Fig. 3.2).

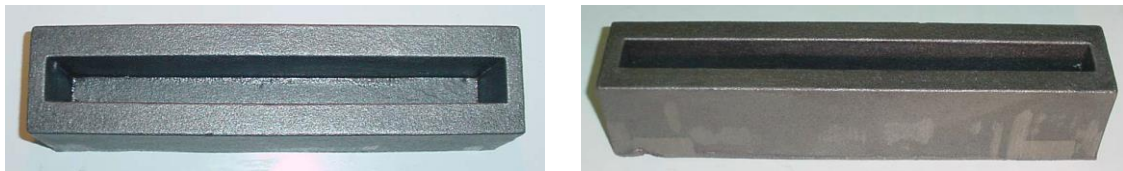


Figura 3.2 - Vista dos corpos de prova de ferro fundido vermicular (CGI).

Na Tab.3.1 estão representadas as características do ferro fundido vermicular (CGI).

Tabela 3.1 - Características do ferro fundido vermicular (CGI) (fonte: Adaptado Viana, 2004).

Matriz	Grafita								Dureza Brinell (HB) (5/750)	Microdureza na Perlita (HV 01)
	Forma	Nodular	Partículas p/mm²	Tamanho (%)						
				8	7	6	5	4		
Perlita com -2% de Ferrita	III-VI	7%	218	22,0	37,0	33,0	7,0	1,0	237	321 a 366

Para melhor entendimento sobre as propriedades do ferro fundido utilizado nos testes de furação, a Tab.3.2 mostra uma comparação das composições químicas entre o ferro fundido vermicular em relação ao ferro fundido cinzento.

Tabela 3.2 – Composições químicas do ferro fundido vermicular e do ferro fundido cinzento (Adaptado de Mocellin, 2002).

		% em peso						
Elemento Químico		C	Si	Mn	P	S	Mg	Cu _{eq} ⁶
Ferro Fundido	Vermicular	3,1 a	1,7 a	0,1 a	máx	0,007 a	0,08 a	0,6 a
		4,0	3,0	0,6	0,065	0,012	0,14	1,5
	Cinzento	3,4 a	2,3 a	0,50 a	máx	0,05 a	-	0,70 a
		3,6	2,5	60	0,065	0,12		0,90

3.2 – Máquina-Ferramenta

A máquina ferramenta utilizada nos ensaios foi o centro de Usinagem Vertical CNC linha Discovery modelo 760 com potência do motor principal de 11 KW, rotação máxima de 10.000 RPM da marca ROMI, conforme vista na Fig. 3.3, do Laboratório de Ensino e Pesquisa em Usinagem (LEPU), da Faculdade de Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Uberlândia. Foi desenvolvido um programa específico para a usinagem dos furos para que ao final de intervalos regulares com 05 furos executados, fosse realizada a inspeção visual dos furos e medição do desgaste da ferramenta de forma gradativa ou também para registrar ocorrência de avaria.



Figura 3.3 - Centro de usinagem vertical CNC Discovery 760.

3.3 – Ferramentas de corte

Antes dos testes definitivos foram realizados ensaios preliminares para identificar parâmetros de corte que resultassem em desgaste das ferramentas e também em desvios de forma dos furos para servirem de referência para os ensaios definitivos, a fim de obter valores de velocidade de corte e avanços como referência para as brocas de metal duro. Para isso foram utilizadas brocas helicoidais de aço-rápido HSS (DIN 338), com ângulo de ponta 118° , com diâmetros de 9,5 e 9,8 mm (classe A 100, com revenimento a vapor, este tipo de revenimento, atua retendo o fluido de lubrificação e evita a aderência do cavaco, impedindo a formação da aresta postiça de corte. O revenido a vapor pode ser aplicado sobre qualquer superfície brilhante, mas é mais utilizada em brocas e machos). Foi feita uma réplica para cada ensaio em que se utilizou uma nova ferramenta. Foram empregados parâmetros de corte constantes nesta etapa com velocidade de corte (V_c) igual a 18 m/min e avanço (f) de 0,19 mm/rot. Selecionou-se o tipo de furação intermitente com corte a seco. Os furos na etapa de pré-testes foram usinados na posição vertical, no sentido descendente.

Os ensaios definitivos foram realizados com ferramentas de metal duro integral (classe K10) conforme mostra a Fig. 3.4. Para assegurar que o material da ferramenta não afetasse os resultados dos ensaios todas as ferramentas foram produzidas pelo mesmo fornecedor, ISCAR. Para o processo de furação foram empregadas brocas de duas entradas, inteiriças de metal duro, revestidas de nitreto de titânio alumínio (TiAlN), sem refrigeração com geometria normal com os respectivos diâmetros 9,5 e de 9,7 mm, utilizadas para o pré-furo do processo de alargamento cilíndrico. Em seguida, o processo de furação com broca especial. Todos os ensaios sofreram uma réplica.



Figura 3.4 – Ferramentas de metal duro inteiriço utilizado nos experimentos: (a) Broca de $\varnothing 9,5$ mm; (b) Broca de $\varnothing 9,7$ mm; (c) Alargador de $\varnothing 10$ mm; (d) Broca especial de $\varnothing 10$ mm.

As ferramentas utilizadas serão informadas a seguir com maiores detalhes e as suas características estão descritas nas Tab. 3.3 e com ilustração esquemática nas Figuras. 3.5 a 3.7.

- Brocas inteiriças standard com 2 entradas, tipo N, com diâmetros de 9,5 e 9,7 mm, revestidas de nitreto de titânio e alumínio (TiAlN), utilizadas para pré – furação Fig. 3.5;
- Alargadores cilíndricos de metal duro sem revestimento de diâmetro igual a 10 mm, 6 canais do tipo reto e 0,5 mm de espessura da guia cilíndrica Fig. 3.6;
- Brocas especiais de metal duro de diâmetro 10 mm, designada - Broca de Metal Duro Especial, com revestimento de (TiAlN), sem refrigeração interna com dupla margem para gerar Ø 10 H7, com duas entradas, indicadas para a usinagem de aços de baixa liga Fig. 3.7. As principais características geométricas das ferramentas empregadas no ensaio de usinagem são apresentadas na Tab.3.3.

Tabela 3.3 – Descrição das ferramentas de corte utilizadas.

Ferramentas	Descriminação	Especificação
Broca (a)	Brocas Metal Duro standard sem refrigeração interna Ø 9,5 mm revestida de (TiAlN)	SCD 095-035-100 AP3 90
Broca (b)	Brocas Metal Duro standard sem refrigeração interna Ø 9,7 mm revestida de (TiAlN)	SCD 097-035-100 AP3 90
Alargador	Alargador de Metal Duro sem revestimento – Ø 10 mm - H7	RM-SHR-1000-H7S-CS-CH 07
Broca Especial	Broca de Metal Duro Especial revestida de TiAlN com espessura de camada de 0,002 ~ 0,005mm, sem refrigeração interna e sentido de corte a direita com dupla margem para gerar Ø 10 com tolerância H7	SCD1000-049RZA-TN17888

As Figuras 3.5 (a) e (b) apresentam o desenho esquemático e as geometrias das brocas utilizadas na pré-furação.

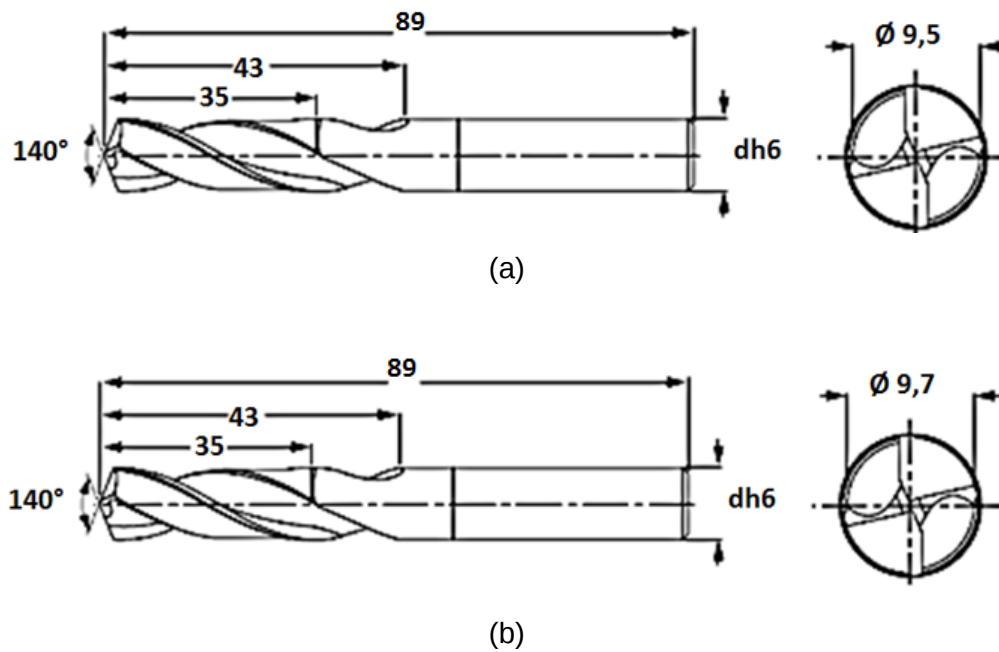


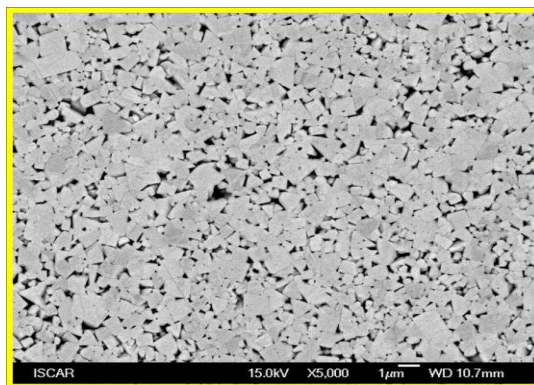
Figura 3.5 – Desenho esquemático brocas helicoidais convencionais que foram utilizadas antes do processo de alargamento (utilizadas para abrir pré-furo); (a) Ø 9,7 mm, (b) Ø 9,5 mm (Iscar do Brasil, 2013) – reprodução autorizada.

Para o processo de alargamento cilíndrico foram utilizados alargadores de metal duro, classe K10, sem revestimento – Ø 10 mm - H7, de canal reto e com seis arestas cortantes, com Os detalhes construtivos desta ferramenta são apresentados na Fig. 3.6.

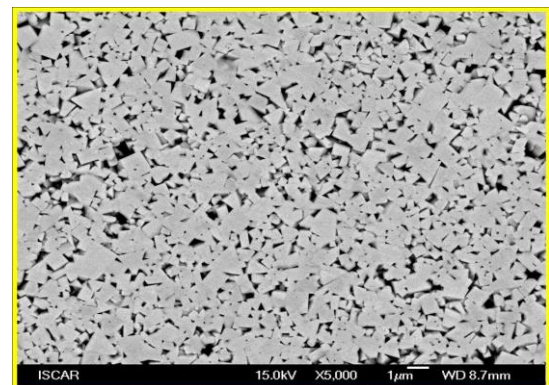
Tabela 3.4 - Propriedades das ferramentas utilizadas nos testes.

Propriedades		
	Alargador	Broca Especial
Tamanho de grão (WC)	submicron	
Densidade sinterizado (g/cm ³)	15,5	14,5
Resistência à Ruptura Transversal (Ksi)	560	600
Dureza HV	1750	1585
Resistência à Fratura (K1c) MPm ^{1/2}	11,2	14,5

Nas Figuras 3.8 (a) e (b) são apresentadas as micrografias dos alargadores e brocas especiais utilizadas neste trabalho (Fonte - ISCAR DO BRASIL, 2013).



(a)



(b)

Figura 3.8 – Micrografia com detalhe para granulometria do material da ferramenta; (a) alargador cilíndrico de Ø10 mm; (b) broca especial de metal duro com Ø10 mm.

3.4 – Sistemas de fixação das ferramentas

Para obter uma melhor fixação e minimização do valor de batimento das ferramentas durante a usinagem, todas as ferramentas foram acopladas à máquina através de um mandril hidromecânico de alta precisão Corogrip®, fabricado pela Sandvik Coromant®, conforme mostrado na Fig. 3.9.

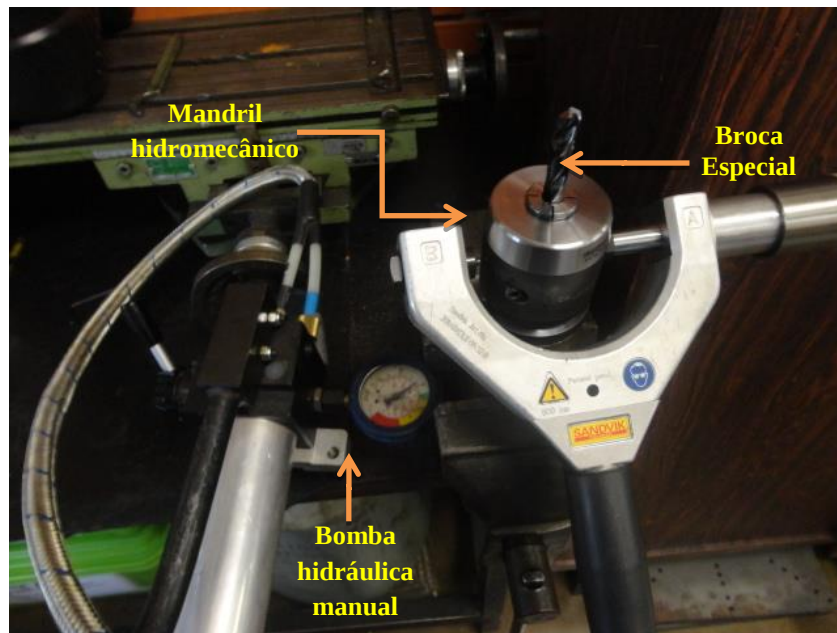


Figura 3.9 – Sistema de fixação das ferramentas para o processo de usinagem com mandril hidromecânico.

Antes de cada ensaio foi medido o valor de batimento radial dado pela diferença na posição radial das pontas de corte das mesmas. Para este procedimento, foi utilizado um relógio comparador analógico do fabricante Mitutoyo, com resolução de 0,001 mm e faixa nominal de 0,1 mm, acoplado em uma base magnética, como mostra a Fig. 3.10. Os valores de batimento radial em (μm) medidos são apresentados na Tab.3.5.

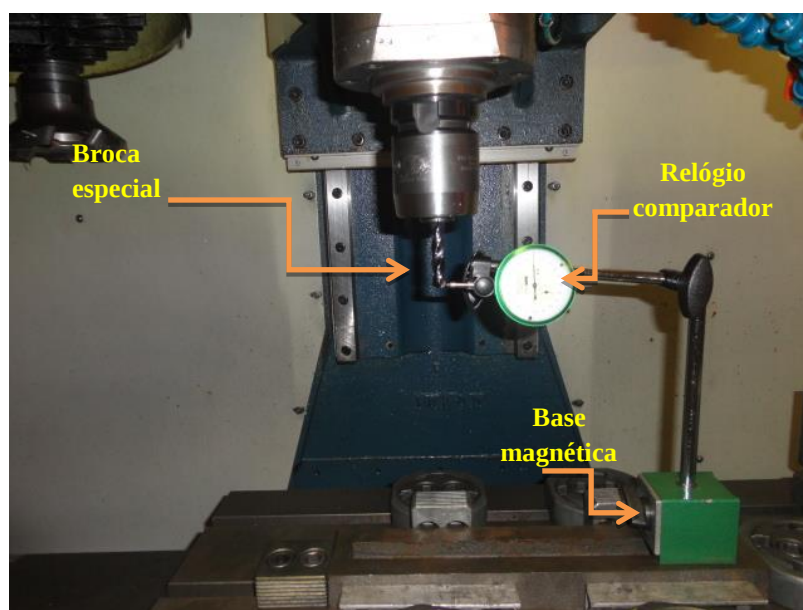


Figura 3.10– Medição do batimento radial da broca especial com relógio comparador.

Tabela. 3.5 – Valores de batimento radial medidos para as ferramentas.

Ferramentas	Batimento radial (μm)	
	Min.	Máx.
Brocas Ø 9,5 mm	9	12
Brocas Ø 9,7 mm	8	11
Alargador Ø 10 mm	11	14
Brocas Especiais Ø 10 mm	8	10

3.5 – Ensaios de usinagem

Nesta sessão serão apresentados os parâmetros de corte e todas as informações sobre ensaios de usinagem para o processo de furação (com brocas helicoidais e brocas especiais) e processo de alargamento.

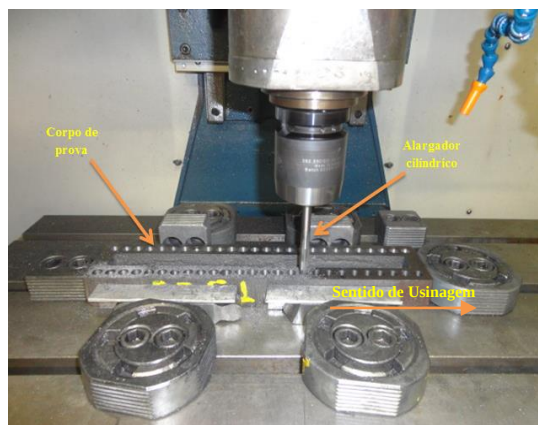
3.5.1 – Parâmetros de corte

Os processos de furação (com brocas convencional e especial) e de alargamento cilíndrico foram do tipo contínuo, posição vertical, sentido descendente, sem pré-furo e sem furo de centro. Todos os ensaios foram feitos sem fluido de corte visando acelerar o desgaste da ferramenta. Os furos usinados não foram passantes, proporcionando uma relação do comprimento pelo diâmetro do furo igual a 03 ($L/D = 3$), em amostras de Ferro Fundido Vermicular. Na Tab. 3.6 são apresentados os parâmetros de corte utilizados nos testes, de acordo com a ferramenta e o material a ser usinado. Estes parâmetros foram ajustados em função de recomendações do fabricante de ferramentas ISCAR, e de outros trabalhos desenvolvidos por pesquisadores do LEPU e com base nos pré-testes realizados previamente neste trabalho. Embora a literatura recomende que os valores de velocidade de corte em processos de alargamento sejam cerca de 66% daqueles da furação combinados com valores de avanço cerca de 2 a 3 vezes maiores, para este material e máquina-ferramenta empregadas estes valores não se aplicaram, pois houve ocorrência de grande vibração do sistema.

Tabela 3.6 – Parâmetros de corte utilizados

Processo	Velocidade de corte - V_c (m/min)	Avanço - f (mm/rot)	Profundidade do furo (mm)
Pré-Furação com brocas helicoidais	70	0,25	30
Alargamento	15	0,10	25
Furação com broca especial	70	0,20	30

A peça foi apoiada diretamente na mesa do centro de usinagem e fixada por um conjunto de mordentes. As Figuras 3.11 (a) processo de alargamento cilíndrico e (b) processo de furação com broca especial, apresentam a forma de fixação utilizada e sentindo de usinagem empregada.



(a)



(b)

Figura 3.11 - Montagem de corpo de prova e mandril com ferramentas prontas para a usinagem; (a) processo de alargamento cilíndrico (b) processo de furação broca especial.

Para o estudo técnico/econômico da broca especial em substituição ao alargador na produção de furos em ferro fundido vermicular, foram realizados 25 furos com diâmetro igual a 10 mm, com 30 mm de profundidade final, para cada condição investigada neste estudo, sendo feitas duas (2) réplicas para cada experimento. Vale ressaltar que foi adotado em paralelo ao critério de 25 furos, um valor de desgaste $VB_{B_{max}} \leq 0,1\text{mm}$ como critério de parada dos ensaios, tanto para os ensaios de furação (com brocas convencionais e com broca especial) como para os de alargamento. Com isso, foi excluída a influência de desgaste ocorrido em todas as ferramentas.

3.6 - Medição do desgaste das ferramentas

Para a avaliação dos desgastes das ferramentas foi utilizada uma metodologia que consiste em realizar a medição dos mesmos em intervalos pré-estabelecidos, neste caso a cada cinco (05) furos. Este critério foi baseado naquele adotado para os testes realizados por Almeida (2008) e outros trabalhos desenvolvidos no LPU, que considerou este número representativo em termos de desgaste e geração dos erros de forma para a usinagem de ferros fundidos. Foram sempre utilizadas ferramentas novas para cada teste.

O monitoramento dos desgastes das brocas e alargadores foi feito por meio de um estereomicroscópio SZ6145TR – OLYMPUS, ao qual está acoplado com software de captura de imagens *Imagem Pro-Express*, conforme mostrado na Fig.3.12.

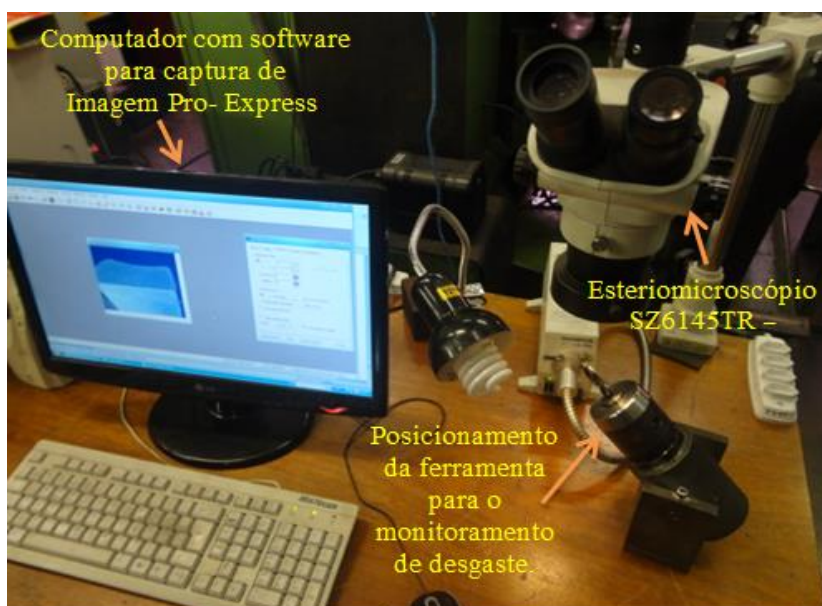


Figura 3.12 – Estereomicroscópio SZ6145TR – OLYMPUS.

Além do esteromicroscópio, foi utilizado um Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV), marca Hitachi, modelo TM 3000, mostrado na Fig. 3.13. Este equipamento possibilita análise microscópica com aumento de até 30.000 vezes, com feixes de 5 e 15 keV, pertencente ao Laboratório de Ensino e Pesquisa em Usinagem (LEPU-UFU), para uma observação mais minuciosa dos desgastes ocorridos nas ferramentas e identificação dos mecanismos de desgaste.



Figura 3.13 – MEV de bancada modelo TM 3000, utilizado para visualização dos desgastes das ferramentas e identificação dos mecanismos de desgaste.

3.7 – Medição de desvio de cilindricidade

As medições dos desvios de cilindricidade foram realizadas em uma máquina de medir a três coordenadas (MM3C), do fabricante Mitutoyo, modelo BR-M443, tipo ponte móvel, resolução de 0,001 mm e volume de trabalho de 400 x 400 x 300 mm³, para os eixos x, y e z, respectivamente (Fig. 3.14). Todas as medições dos diâmetros foram feitas á uma temperatura ambiente de $(20 \pm 1) ^\circ\text{C}$, conforme recomendado pela NBR NM-ISO 1 (ABNT, 1997), sendo monitorado durante as medições ao qual se fez o uso de um termômetro digital, com resolução de 0,1 °C e faixa nominal de $(-20 \text{ a } 60)^\circ\text{C}$. Utilizou-se uma ponta única de esfera de rubi com diâmetro de 2mm, o mesmo foi utilizado com ângulo zero para a medição dos desvios, e em todos os casos admitiu-se o desvio de calibração de no máximo 2 µm, e chegando a obter em algumas calibrações 0,8 µm, o que promove maior confiabilidade dos resultados. Para cada furo foram feitas três medições em um intervalo pré-determinado a cada 5 furos. Destas medições foram calculadas a média aritmética e desvio padrão que serão informados na sessão de resultados.

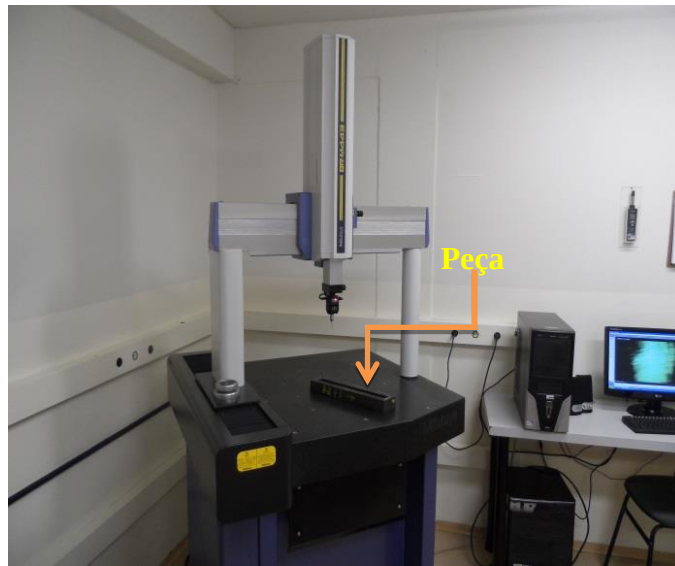


Figura 3.14 – Máquina de medir a três coordenadas utilizada na medição do diâmetro dos furos

3.8 – Medição da rugosidade

Para a medição dos parâmetros de rugosidade foi utilizado um rugosímetro portátil SJ201 P/M da marca MITUTOYO, com ponta de diamante com raio de $5\text{ }\mu\text{m}$, utilizando, com resolução de $0,01\text{ }\mu\text{m}$ e agulha do apalpador de diamante com raio de ponta de $5\text{ }\mu\text{m}$, que foi apoiado propriamente em um suporte projetado para este fim, que permitia a base do rugosímetro deslocar-se verticalmente para medir os furos em diferentes fileiras (Fig. 3.15).

O *cut-off* adotado foi de $0,80\text{ mm}$, as medições foram realizadas sobre uma mesa de desempenho, a fim de minimizar o efeito de vibrações, que interferem nas medições de rugosidade, onde foram medidos os parâmetros pré-selecionados de rugosidade R_a e R_y . A montagem experimental para medição da rugosidade pode ser vista na Fig. 3.15(a) e (b), a medição da rugosidade foi executada em dois pontos equidistantes de 180° um do outro em relação ao diâmetro do furo, onde todas as superfícies dos furos foram previamente limpas com o auxílio de hastes flexíveis de algodão (cotonetes) umedecidos em álcool.

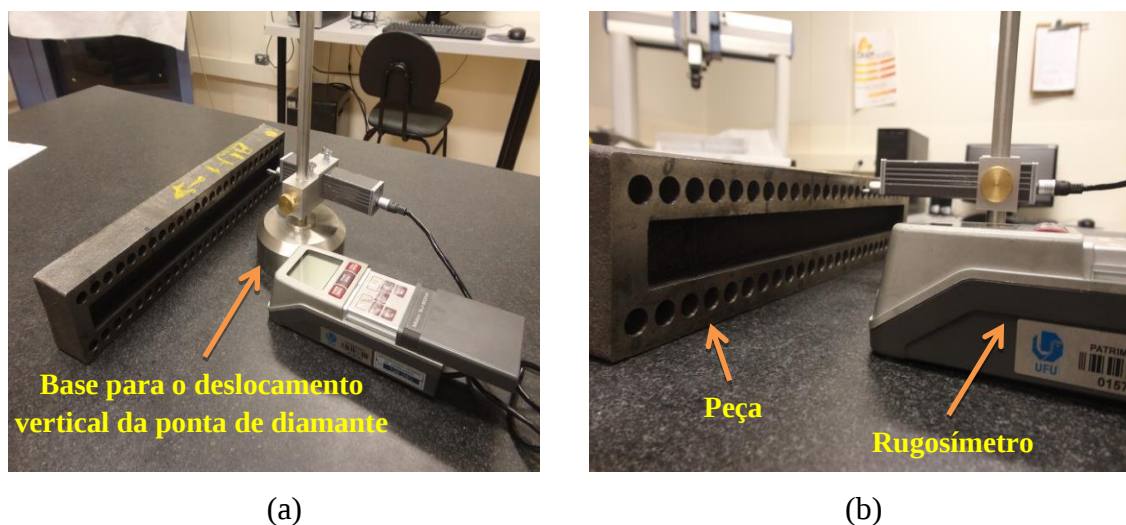


Figura 3.15 - a) Montagem do equipamento para medição da rugosidade; b) Medição da rugosidade do furo a 180° um do outro em relação ao diâmetro do furo.

3.9 – Medição do diâmetro do furo

As medições dos diâmetros dos furos foram realizadas no Laboratório de Metrologia Dimensional da Universidade Federal de Uberlândia (LMD), na qual se utilizou a mesma máquina descrita na Fig. 3.14, máquina de medir a três coordenadas (MM3C) e nas mesmas condições de operação. Ela possui resolução de 0,001 mm e volume de trabalho de 400 x 400 x 300 mm³. Foi medido apenas o ultimo furo das amostras referentes a cada ferramenta utilizada, sendo que, todas as medições de diâmetro dos furos foram realizadas a uma distância aproximada de 3 mm da borda do furo, na qual se adotou um número igual a três medições para cada uma das ferramentas de acordo os parâmetros de corte pré-estabelecidos, a fim de eliminar os erros de medição. Este valor de 3 mm foi adotado para evitar o deslocamento da esfera para a borda externa do furo. Com estes valores foi possível determinar os desvios dimensionais que resultaram por sua vez no cálculo da qualidade de trabalho IT.

3.9.1 – Cálculo de afastamento dimensional dos furos

Para garantir o cumprimento dos requisitos de funcionabilidade e intercambialidade dos furos usinados, foi realizado o cálculo de afastamento das tolerâncias dimensionais dos mesmos, que serve como base ao desenvolvimento do sistema de tolerâncias e também fixa a ordem de grandeza dos afastamentos. O cálculo foi feito por meio da Eq. (3.1) conforme Sistemas de

Tolerâncias e Ajustes - Demec- UFPR (2013) e cujos valores são fornecidos em μm . A equação é dada a seguir:

(3.1)

$$i = 0,45 \sqrt[3]{MGV} + 0,001MGV$$

Onde MGV é a média geométrica dos valores extremos de cada grupo de dimensões nominais (mm).

3.9.2 – Medição da microdureza dos furos

Para determinar se houve influência do alargador e da broca especial na integridade sub-superficial dos furos, aqui representada pela microdureza, foram tomados como referência e analisados os últimos furos usinados pelo alargador e broca especial. As amostras foram cortadas ao longo do comprimento do furo. Em seguida foram lixadas com lixas d'água, com granas de 240, 400, 600, 800 e 1200, todas do fabricante 3M, onde foi respeitada sempre esta sequência para a preparação das amostras. Para a medição da microdureza Vickers (HV), foi utilizado um micro durômetro da marca SHIMADZU HMV-2 Series, pertencente ao Laboratório de Tribologia e Materiais da Universidade Federal de Uberlândia, conforme mostra a Fig.3.16, com uma pirâmide de diamante de base quadrada e uma carga de 0,025 Kgf, com um tempo equivalente para endentação igual há 10 segundos. As medições sobre a influência na microdureza da parede dos furos foi medida utilizando a escala Vickers (HV). Todas as amostras utilizadas para a realização das medições sobre influência na microdureza foram obtidas em relação ao último furo usinado ao final do processo de alargamento cilíndrico e do processo de furação com broca especial.

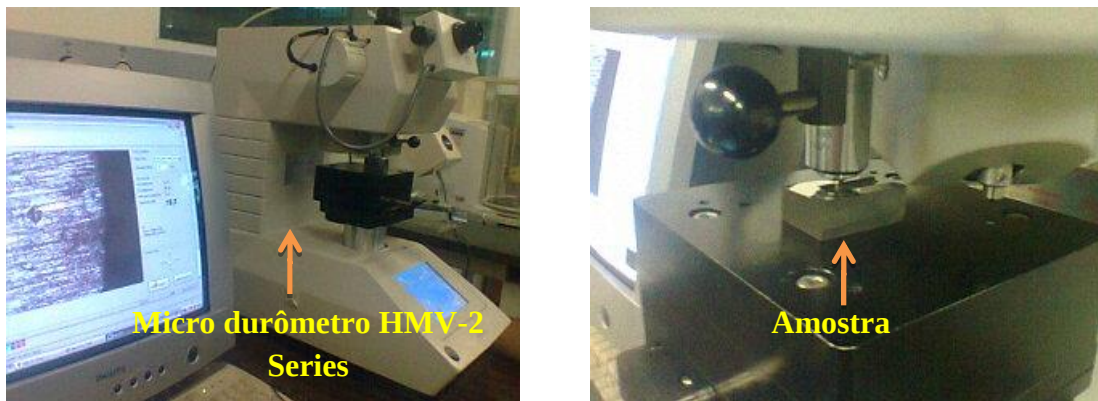


Figura 3.16 – Vistas da amostra no equipamento micro durômetro SHIMADZU HMV-2 Series.

As distancias entres as indentações foram de 40 μm tanto par o eixo X quanto para o eixo Y, respeitando esta mesma distância em relação à borda interna do furo e a 5 mm de profundidade em relação à borda do furo. A Figura 3.17 apresenta o desenho esquemático para realização das medições de microdureza (HV).

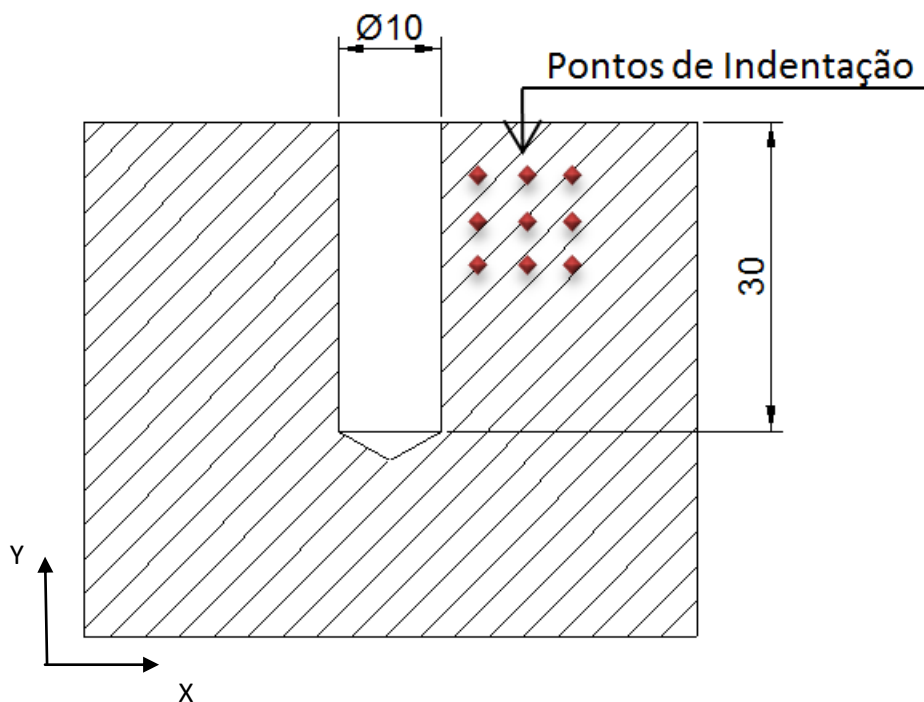


Figura 3.17 – Desenho esquemático dos pontos de indentação para medição de microdureza (HV).

3.10 - Cálculo e análise de variabilidade entre os valores de diâmetros produzidos pelas ferramentas através do teste de hipótese utilizando a distribuição t de Student.

O teste de hipótese é um procedimento da estatística amostral para testar uma alegação sobre um valor de um parâmetro populacional, ou seja, o teste de uma hipótese estatística é o procedimento ou regra de decisão que possibilita decidir por H_0 ou H_a , com base na informação contida na amostra. Uma alegação sobre um parâmetro populacional é chamada de hipótese estatística. Um par de hipóteses deve ser estabelecido:

- Uma hipótese nula H_0 que contém uma afirmativa de igualdade, tal como $\leq = \geq$.
- Uma hipótese alternativa H_a que é o complemento da hipótese nula.

Para realização dos testes de hipótese correlacionando-se sempre ao ultimo furo de cada amostra foi utilizado o software STATISTICA 7 para obtenção dos cálculos. Foi desconsiderado o efeito da interação das variáveis entre si e os quadros de análise de variância para cada uma das variáveis (ferramentas) de resposta que estão apresentados na Tab. 4.3. Foi adotado um nível de significância de 5%, o valor da probabilidade de significância (p) que deve ser menor que 0,05 para que a variável tenha influência. Existem duas opções para expressar a conclusão final de um teste de hipóteses.

- Comparar o valor da estatística do teste com o valor obtido a partir da distribuição teórica, específica para o teste, para um valor pré-fixado do nível de significância.
- Quantificar a chance do que foi observado ou resultados mais extremos, sob a hipótese de igualdade dos grupos. Essa opção baseia-se na probabilidade de ocorrência de valores iguais ou superiores ao assumido pela estatística do teste, sob a hipótese de que H_0 é verdadeira. Este número é chamado de probabilidade de significância ou valor - p e frequentemente é indicado apenas por p .

Como o valor- p é calculado supondo-se que H_0 é verdadeira, podem-se fazer duas conjecturas quando se obtém um valor muito pequeno como foi neste caso.

- Um evento que é extremamente raro pode ter ocorrido.
- A hipótese H_0 não deve ser verdadeira, isto é, a conjectura inicial é conservadora não parece plausível.

Assim, quanto menor o valor- p maior a evidência para se rejeitar H_0 . De um modo geral, considera-se que valor- p menor ou igual a 0,05 indica que há diferenças significativas entre os grupos comparados.

CAPITULO IV

RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 - Considerações iniciais

Este capítulo descreve os resultados obtidos nesta pesquisa, onde, o objetivo principal foi avaliar o desempenho da broca especial em relação ao processo de furação com brocas convencionais seguida de alargamento na produção de furos cilíndricos. A avaliação do desempenho foi em termos de desvios geométricos (rugosidade e cilindridade) dos furos, desvio dimensional, qualidade de trabalho IT, e microdureza. Também foram monitorados os desgastes nas ferramentas. Foi empregado o teste de hipóteses utilizando t de Student, na análise dos resultados, sendo também avaliado o aspecto econômico da utilização de broca especial em substituição ao alargador na produção de furos em ferro fundido vermicular visando, dentre outros aspectos, a produção de dados que possam ser aplicados na indústria metal-mecânica, na produção de furos com tolerâncias mais estreitas.

A primeira etapa consiste em avaliar os desgastes e mecanismo de desgastes ocorridos nas ferramentas em função do número do furo e influência do sobremetal utilizados nos testes sobre o acabamento superficial de rugosidade (R_a e R_y) e desvios macrogeométricos (cilindridade).

A segunda etapa consiste em avaliar a influência do sobremetal, na qualidade de trabalho IT, das ferramentas.

Por fim, a terceira etapa consiste na avaliação do aspecto econômico relacionados à utilização das ferramentas empregadas nos testes.

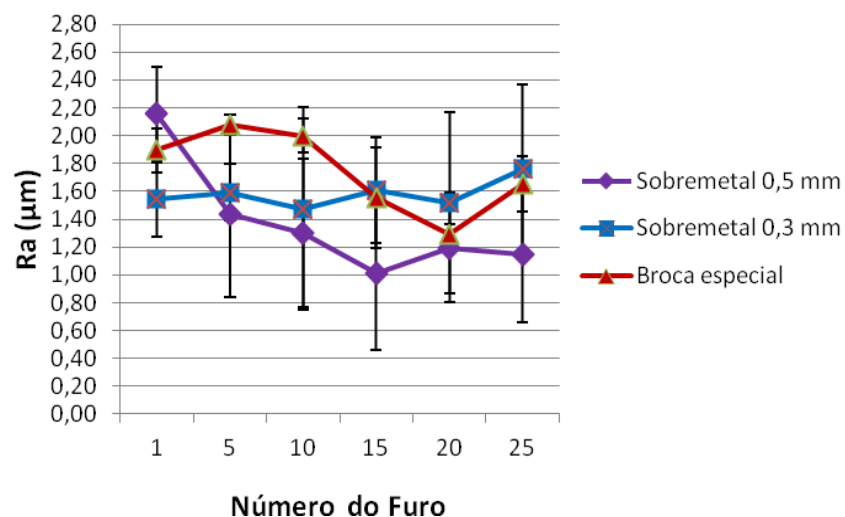
4.2 - Parâmetros de Rugosidade R_a e R_y .

A Tabela 4.1 apresenta os valores médios de rugosidade em função do número do furo, obtido ao final dos testes, onde os parâmetros de rugosidade medidos foram: R_a (Rugosidade média aritmética) e R_y (Rugosidade máxima). Estes valores são apresentados na forma gráfica na Fig. 4.1 e 4.2.

Tabela 4.1 - Valores médios de rugosidade R_a e R_y .

Rugosidade (μm)						
Alargamento					Furação	
Sobremetal 0,3 mm (após broca 9,7mm)			Sobremetal 0,5 mm (após broca 9,5mm)		Broca especial (10 mm)	
Nº do Furo	R_a	R_y	R_a	R_y	R_a	R_y
1	1,54	14,00	2,16	11,76	1,89	13,02
5	1,59	10,71	1,44	11,83	2,07	16,02
10	1,47	10,08	1,30	10,60	2,02	16,20
15	1,61	9,32	1,01	13,37	1,55	12,16
20	1,52	9,20	1,19	12,69	1,49	12,85
25	1,76	8,53	1,14	12,21	1,65	12,38

As Figuras 4.1 e 4.2 apresentam os valores encontrados para os parâmetros de rugosidade superficial (R_a e R_y) em função do número do furo realizado pelos alargadores (relacionado com o sobremetal deixado pelas brocas convencionais) e pela broca especial.

Figura 4.1 – Valores de rugosidade superficial R_a em função do número do furo

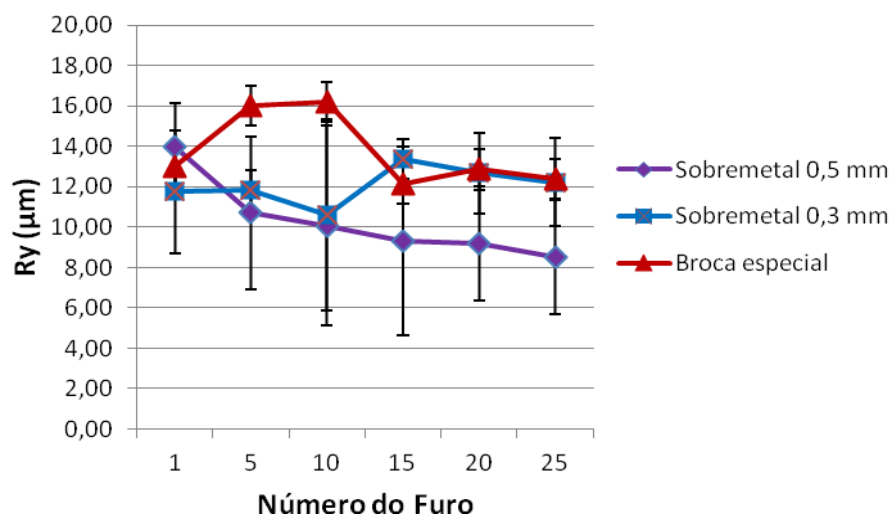


Figura 4.2 – Valores de rugosidade superficial R_y em função do número do furo para alargadores e broca especial em diferentes condições de corte.

Verifica-se destas figuras que os valores de rugosidade apresentam comportamentos distintos em relação ao sobremetal, onde os maiores valores de rugosidade foram registrados com menor sobremetal utilizado. Com base nos valores obtidos mostrados na Fig.4.1 nota-se que os valores de R_a variaram na faixa entre 1,00 e 2,20 μm indicando que as condições de corte e ferramentas selecionadas permitiram alcançar baixos resultados de rugosidade que indicam bom acabamento em furos de $\varnothing 10$ mm em ferro fundido vermicular. Para Ferraresi (2006), em operações de alargamento mais comuns são esperados valores de R_a entre 0,8 μm e 3,2 μm . Contudo, o autor realçou que uma boa combinação da geometria e material da ferramenta e material da peça, além de parâmetros de corte ideais podem produzir valores de R_a abaixo de 1 μm .

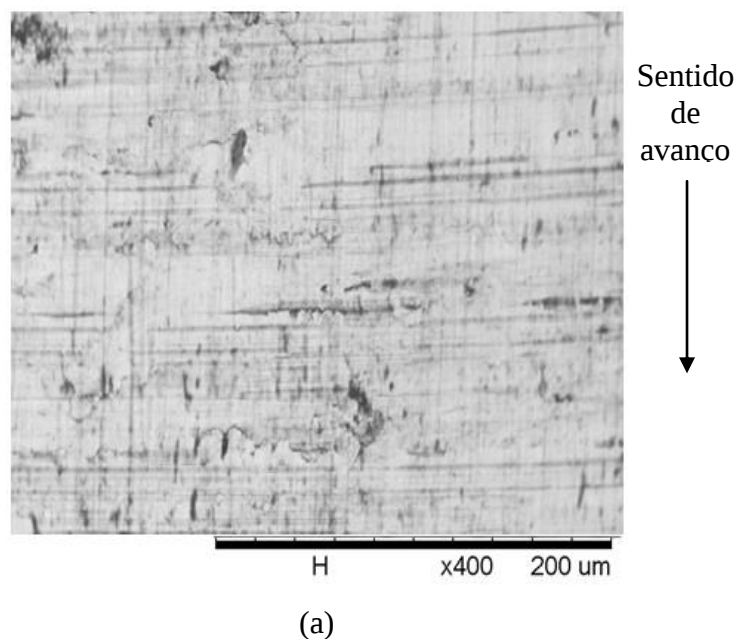
Observa-se ainda que, em geral, a rugosidade também apresenta uma leve tendência de elevação com o número do furo usinado e para o menor valor de sobremetal (para ambos os parâmetros de rugosidade) diferentemente da tendência observada para os ensaios com o maior valor de sobremetal. O mesmo ocorreu nos experimentos de Bezerra (1998) no alargamento de liga de alumínio, que observou que para pequenos valores de sobremetal havia o problema de se ter uma pequena quantidade de material a remover, resultando em alguns pontos da superfície com apenas um esmagamento do material, sem que houvesse um corte efetivo.

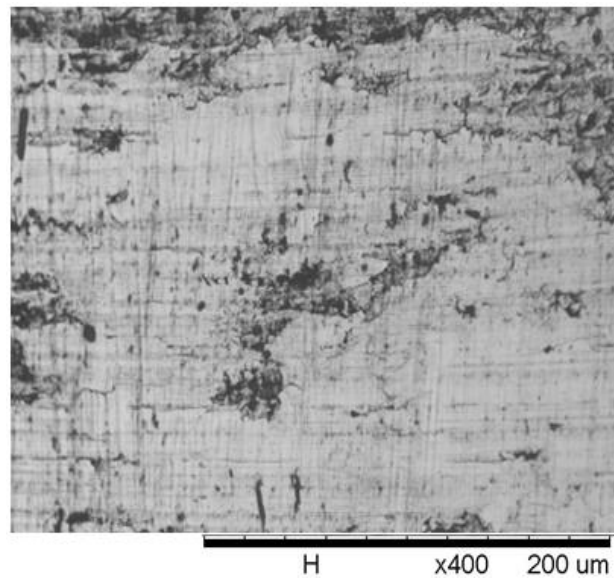
Já o parâmetro de rugosidade R_y , ele corresponde ao valor de rugosidade máxima, isto é, a distância vertical entre o pico mais elevado e o vale mais profundo do perfil de rugosidade.

Almeida (2008) em seus estudos sobre alargamento de ferro fundido cinzento comparado com o alargamento em ferro fundido vermicular, verificou que os maiores valores de rugosidade ocorreram quando se aumentou o valor de sobremetal, ou seja, quanto mais material é arrancado, maiores eram os parâmetros de rugosidade obtidos na parede do furo, valores diferentemente da tendência observada. Rosa (2012), ao realizar ensaios de alargamento de furos usinados em pistões de ferro-carbono sinterizado, observou que a pequena quantidade de material removido apenas fazia com que o alargador atritasse na peça ao invés de cortá-la, um efeito mais de conformação do que de corte propriamente dito. Além disso, as forças de corte não eram suficientes para garantir um contato contínuo entre as guias cilíndricas da ferramenta e a parede do furo e, com isso, realizando o acabamento superficial de forma ineficiente. Mas ao empregar um maior valor de profundidade de corte, o autor notou aumento da força. Ambas as situações afetam adversamente a qualidade dos furos produzidos, em termos de rugosidade. De acordo com Júlio (2009) quando se utiliza um menor valor de sobremetal, normalmente obtêm-se os piores valores de rugosidade. Este fato pode ser atribuído à pequena quantidade de material removido e consequente esmagamento do material por deformação plástica.

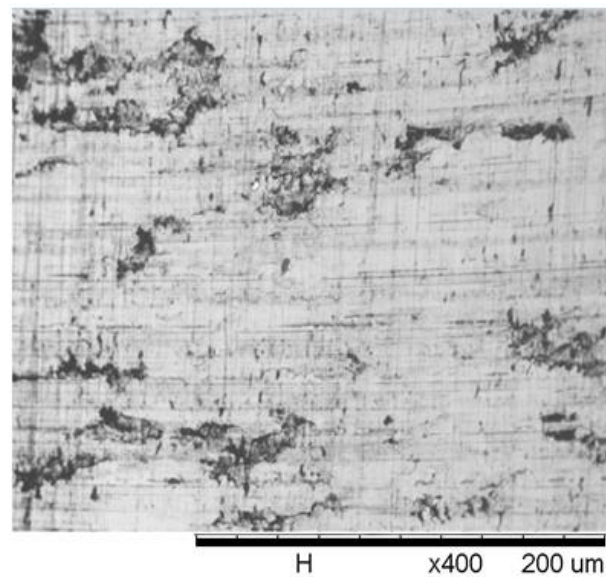
4.2.1 Análise das texturas de superfícies obtidas na parede interna dos furos

As Figuras 4.3 (a) a (c) mostram as imagens obtidas no Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV), das texturas superficiais nas paredes do último furo usinado pelas diferentes ferramentas, a uma profundidade de 5 mm da borda do furo.





(b)



(c)

Figura 4.3 – Imagens da parede dos furos após os testes; a) alargamento do furo com sobremetal 0,5 mm; b) alargamento do furo com sobremetal 0,3 mm; c) furo com a broca de geometria especial.

Nota-se que a marcas de avanço presente na parede dos furos em praticamente todas as imagens, de acordo com a Fig.4.3 (a), ao usinar com o alargador após furação com broca de 9,5mm (sobremetal 0,5mm) foi obtido um melhor desempenho em relação ao acabamento quando comparado à broca de geometria especial e alargamento após a broca de 9,7mm

(sobremetal 0,3mm) visto na Fig.4.3 (b), isto pode estar relacionado com a pequena quantidade de material a ser retirado pelo alargador cilíndrico após a pré-furação. Segundo Bezerra (1998), uma das possíveis causas para este aspecto em relação ao acabamento apresentado na Fig.4.3 (b) que se refere ao sobremetal de 0,3 mm. O autor informa que pequenos valores de sobremetal implicam em pequena quantidade de material a remover, que pode causar em alguns pontos da superfície apenas um esmagamento do material, sem que haja um corte efetivo. As consequências podem ser observadas na forma de marcas de avanço, como aquelas observadas neste trabalho. Além disso, problemas com batimento e vibração são mais comuns ao se empregar alargadores hastes mais compridas (maior comprimento em balanço) e com isso afetando o acabamento e aumentando os desvios dimensionais.

Em relação a comportamento da rugosidade de furos usinados, Zeilmann et al. (2005) ressaltam que é importante observar que ao usinar na condição a seco há a tendência de redução da rugosidade, mas não é regra geral para todos os pares de ferramenta-peça. Eles ainda correlacionaram esta tendência com um possível desgaste da quina da broca, que promove maior atrito do material da superfície do furo e causando uma maior deformação plástica do material em corte que é arrastado sobre a superfície gerada, apresentando um aspecto alisado e, portanto resultando em menor rugosidade.

Segundo Da Silva (2001), deve-se levar em consideração que ao se trabalhar com velocidades de corte mais elevadas, como aquelas empregadas nos ensaios com a broca especial, a saída dos cavacos é mais rápida, o que aumenta a probabilidade do surgimento de riscos na superfície do furo.

A Figura 4.4 apresenta os valores dos erros de cilindridade medidos nos furos prontos, após o processo de alargamento para os diferentes valores de sobremetal deixados pelas brocas com Ø 9,5 e 9,7mm e na furação com brocas especiais de Ø 10 mm. Observa-se que os erros de cilindridade tendem a aumentar com o sobremetal e também com o número de furos usinados, o mesmo acontecendo com a broca especial.

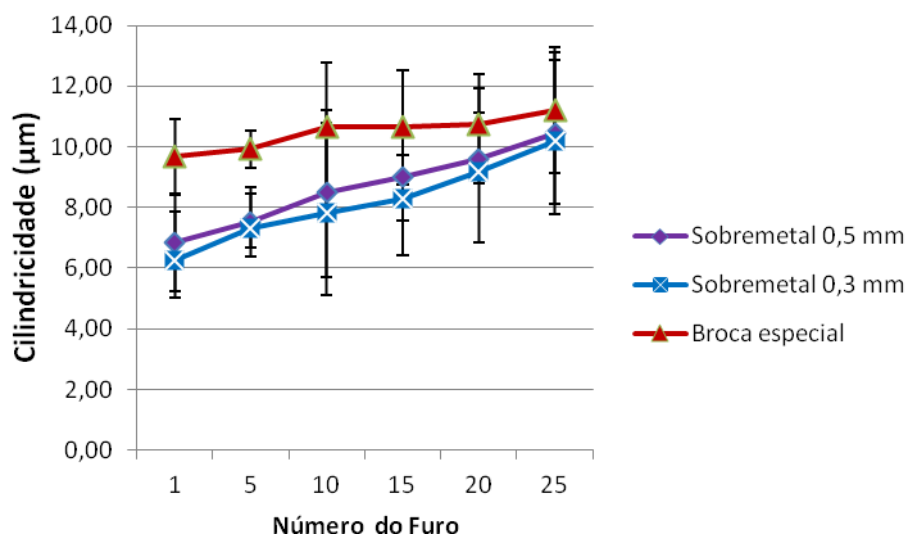


Figura 4.4 – Erro de forma (cilindricidade) dos furos após alargamento em função do diâmetro deixado pelas brocas de diâmetro 9,5 mm (sobremetal 0,5mm) e diâmetro 9,7mm (sobremetal igual a 0,3mm) e após broca especial.

Da Figura 4.4 nota-se que os erros de cilindridade (CI) são diretamente proporcionais ao sobremetal empregado, diferentemente da relação observada com a rugosidade. O maior valor médio de cilindridade (CI) foi observado quando se empregou a broca de diâmetro 10 mm no furo 25. Segundo Machado et al., (2009), estes valores podem estar relacionados com um maior valor de sobremetal, que implica em maior material a ser removido pela ferramenta.

Com isso, existe maior atrito do cavaco com a parede do furo que por sua vez eleva a temperatura na região de corte. Este aumento da temperatura implica na variação das dimensões do furo, principalmente porque influencia na dilatação do mesmo. A geração de calor na parede do furo é um dos grandes responsáveis pelos erros de forma e dimensionais em furos. Quando se têm um maior valor de sobremetal, ocorre o aumento da profundidade de corte a ser realizado pelo alargador, o que implica em aumento dos esforços de corte, gerando vibrações, o que pode piorar os desvios de forma (Bezerra, 1998). De acordo com Almeida (2008), este efeito pode estar relacionado à estrutura do próprio material usinado. Pelo fato do ferro fundido vermicular ser um material mais dúctil, o processo de nucleação e propagação de trincas é mais bem controlado já que não possui lamelas, mas sim vermículos de grafita para direcionar as trincas.

Desta forma, o processo de deformação plástica é relativamente mais dominante, alterando as regras de controle de qualidade dos furos. Assim os melhores resultados de erros de cilindridade para os menores valores de sobremetal explicam porque a ferramenta vai retirar

menos material da parede do furo e o processo gastará menos energia durante a usinagem, o que torna melhor a qualidade do furo. Além disso, é importante ressaltar novamente a diferença nos valores de velocidade e de avanço empregados para usinagem com brocas especiais, que foram bem mais elevados que o alargador. Tanto a maior velocidade que implica em maior desvio de batimento quando o avanço (o dobro) que influencia no acabamento foram juntos responsáveis por aumentarem o desvio de cilindridade produzidos pelas brocas especiais.

4.3 - Cálculo da incerteza de medição do diâmetro

A Tabela 4.2 e Fig. 4.5, na forma gráfica, mostram os resultados das medições dos desvios de diâmetro encontrados apenas no ultimo furo usinado pelas diferentes ferramentas.

Tabela 4.2 - Resultados dos desvios de diâmetros obtidos após os ensaios.

Alargamento	Sobremetal 0,5 mm				
	Leituras (mm)			Média (mm)	Desvio padrão (mm)
	1	2	3		
	10,012	10,024	10,018	10,018	0,006
	Sobremetal 0,3 mm				
	Leituras (mm)			Média (mm)	Desvio padrão (mm)
	1	2	3		
	10,009	10,016	10,014	10,013	0,003
Furação	Broca Especial Ø10 mm				
	Leituras (mm)			Média (mm)	Desvio padrão (mm)
	1	2	3		
	10,023	10,027	10,031	10,027	0,004

A Figura 4.5 apresenta os erros de diâmetro medidos nos furos de acordo com os valores descritos na Tab.4.2, após o processo de alargamento cilíndrico para os diferentes valores de sobremetal (0,5 e 0,3 mm e deixados respectivamente pelas brocas de Ø 9,5 e 9,7mm) e furação com brocas especiais de Ø = 10 mm. Observa-se que o erro dimensional da broca especial foi superior quando comparado em relação aos valores de sobremetal utilizado no processo que antecede o de alargamento cilíndrico. Este fato pode estar relacionado com os altos valores de parâmetros de corte empregados nos testes de furação com a broca de geometria especial, onde

foi utilizada uma velocidade de corte ($V_c = 70$ m/min) e avanço de ($f = 0,20$ mm/rot), que quando comparados com os valores de (V_c) utilizados no processo de alargamento cilíndrico ($V_c = 15$ m/min), soma-se mais de quatro vezes este valor e duas vezes mais em relação a avanço ($f = 10$ mm/rot) utilizados para o processo de alargamento cilíndrico com diferentes valores de sobremetal, que são condições bem mais severas. E assim como observado para o parâmetro desvio de cilindridade, o desvio dimensional de diâmetro também é afetado negativamente.

Segundo El-Tammimi (1996), para se obter uma melhor precisão e melhor qualidade dimensional na furação, é necessário utilizar baixas velocidades de corte (V_c) e baixos valores de avanços (f), onde os efeitos destes parâmetros quando elevados tem grande influencia no acabamento e nas tolerâncias geométricas. Mas por outro lado, baixos valores de velocidade de corte e avanço implicam em baixa taxa de produção.

Logo, condições que conciliem desvios de forma e desvios dimensionais com produtividade devem ser sempre priorizadas. De acordo com Da Silva (2001), é de se esperar que elevadas velocidades de corte produzissem maiores valores de desvios com a existência de vibração do sistema, pois quando se aumenta o valor de sobremetal, aumenta-se também o esforço de corte para produzir cavaco, que por sua vez exerce maior pressão sobre a peça, além de induzir vibrações auto excitadas que podem prejudicar o acabamento.

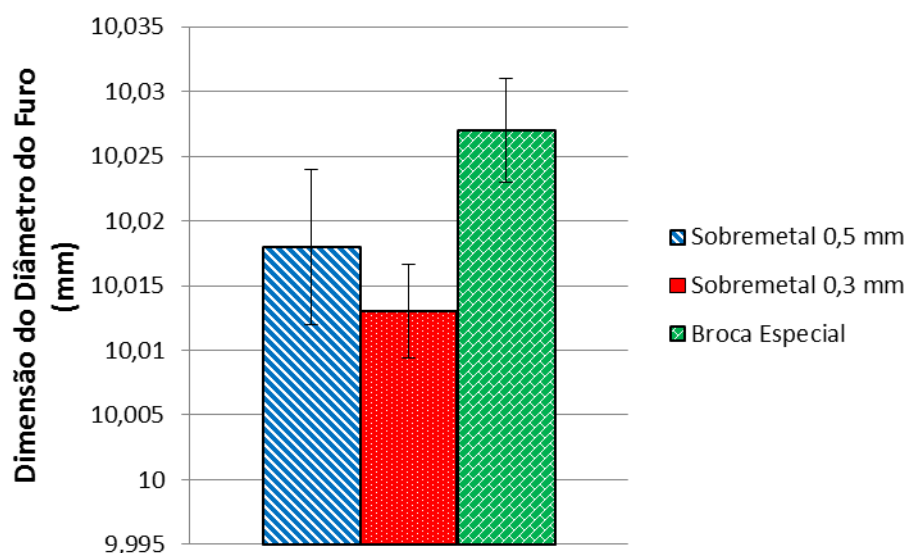


Figura 4. 5 – Desvio dimensional dos diâmetros dos furos após processo alargamento cilíndrico em função do diâmetro deixado pelas brocas de diâmetro 9,5 mm (sobremetal 0,5mm) e diâmetro 9,7mm (sobremetal igual a 0,3mm) e broca especial de diâmetro 10 mm.

Ainda na Fig.4.5 pode-se observar que os erros de diâmetro tendem a ser menores quanto menor for o valor de sobremetal. Segundo Machado (1999), entre as possíveis justificativas para estes resultados, acredita-se de forma análoga que o menor sobremetal utilizado proporcionou um corte mais efetivo, podendo o menor sobremetal de 0,3 mm proporcionar uma retirada de cavaco mais contínua e efetiva, levando a um menor erro dimensional em particular. O menor valor de sobremetal apresentou menor erro dimensional e isso ocorre porque o maior sobremetal implica que a ferramenta precisa retirar mais material, aumentando as forças de usinagem, consequentemente as deflexões (Machado, 1999). Shunmugam et al., (1990) ao analisarem a influência de três valores de sobremetal (0,25 mm - 0,50 mm e 0,75 mm) sobre o acabamento e exatidão do furo, verificaram que, em geral, os melhores resultados foram produzidos pelo menor valor de sobremetal utilizado.

4.3.1 Análise de variabilidade entre as ferramentas através da distribuição t de Student.

Como já descrito no Capítulo III sobre o teste de hipótese, quanto menor o valor- p maior a evidência para se rejeitar H_0 . De um modo geral, considera-se que valor- p menor ou igual a 0,05 indica que há diferenças significativas entre os grupos comparados.

A Tabela 4.3 apresenta os resultados do cálculo da variabilidade entre as ferramentas de corte empregadas nos testes, utilizando o software STATISITCA 7, sendo estes os valores obtidos através dos testes de hipóteses calculados utilizando a distribuição t de Student no ultimo furo de cada amostra. Nesta tabela foram designados por Experimento I (primeira coluna) os ensaios realizados com alargadores com diferentes valores de sobremetal enquanto que Experimento II está relacionado com os ensaios realizados com as brocas especiais (segunda coluna).

É objetivo da distribuição t de Student observar a influência qualitativa de cada fator investigado, isto é, como cada condição de corte sendo variada no processo de usinagem tende a alterar o comportamento das variáveis de resposta.

Tabela 4.3 - Análise de variância da distribuição t de Student.

Item	Experimento I	Experimento II	P valor < 0,05
1	R _a (Sobremetal 0,5 mm)	R _a Broca especial Ø 10 mm	<10 ⁻⁴
2	R _a (Sobremetal 0,3 mm)	R _a Broca especial Ø 10 mm	0,3865
3	R _v (Sobremetal 0,5 mm)	R _v Broca especial Ø 10 mm	<10 ⁻⁴
4	R _v (Sobremetal 0,3 mm)	R _v Broca especial Ø 10 mm	0,7825
5	(Cl) Sobremetal 0,5 mm	(Cl) Broca especial Ø 10 mm	0,2682
6	(Cl) Sobremetal 0,3 mm	(Cl) Broca especial Ø 10 mm	0,10
7	Desvio Dimensional do diâmetro (Sobremetal 0,5 mm)	Broca especial Ø 10 mm	<10 ⁻⁴
8	Desvio Dimensional do diâmetro (Sobremetal 0,3 mm)	Broca especial Ø10mm	<10 ⁻⁵

A análise de variância da distribuição t de Student indicou que os fatores de controle produziram efeito significativo nas variáveis de resposta, conforme mostra os resultados da Tab. 4.3, onde as variáveis de rugosidade R_a e R_v (sobremetal 0,5 mm) (itens 1, 3 e 5) e as variáveis de desvio dimensional (item 7 e 8) apresentaram diferenças estatísticas, e os demais resultados (itens 2, 4 e 6) permanecendo iguais estatisticamente.

Nas Tabelas 4.4 e 4.5 são apresentados os resultados da avaliação de incerteza de medição do diâmetro dos furos produzidos pelos alargadores após pré-furo com valores de sobremetal de 0,5 e 0,3mm, respectivamente. Na Tabela 4.6 são apresentados os resultados da avaliação de incerteza de medição do diâmetro dos furos produzidos pela broca especial.

Tabela 4.4 – Avaliação da incerteza do diâmetro quando se empregou o alargador com pré-furo de sobremetal 0,5 mm.

Componentes de Incerteza						
Grandeza	Estimativa (mm)	TI	DP	GL	CS	Incerteza padrão (mm)
$\Delta s(L_{MMC})$	0,006	A	Normal	2	1	0,003464
ΔR_{MMC}	0,001	B	Retangular	∞	1	0,000288
ΔE_A	0,0029	B	Triangular	∞	1	0,001183
ΔI_{CMMC}	0,001924	B	Normal	5,9009	1	0,001923
Incerteza padrão combinada (u_c) em mm						0,004145
Grau de liberdade efetivo (ν_{eff})						3,94
Fator de abrangência (k)						3,18
Incerteza expandida (U) em mm						0,013

Onde: (TI) tipo de incerteza; (DP) desvio padrão; (GL) grau de liberdade; (CS) coeficiente de sensibilidade.

Tabela 4.5 – Avaliação da incerteza do diâmetro quando se empregou o alargador com pré-furo de sobremetal 0,3 mm.

Componentes de Incerteza						
Grandeza	Estimativa (mm)	TI	DP	GL	CS	Incerteza padrão (mm)
$\Delta s(L_{MMC})$	0,004	A	Normal	2	1	0,002081
ΔR_{MMC}	0,001	B	Retangular	∞	1	0,000288
ΔE_A	0,0029	B	Triangular	∞	1	0,001183
ΔI_{CMMC}	0,001924	B	Normal	5,9009	1	0,001923
Incerteza padrão combinada (u_c) em mm						0,003085
Grau de liberdade efetivo (ν_{eff})						7,38
Fator de abrangência (k)						2,36
Incerteza expandida (U) em mm						0,007

Tabela 4.6 – Avaliação da incerteza do diâmetro gerado pela broca especial

Componentes de Incerteza						
Grandeza	Estimativa (mm)	TI	DP	GL	CS	Incerteza padrão (mm)
$\Delta s(L_{MMC})$	0,004	A	Normal	2	1	0,002309
ΔR_{MMC}	0,001	B	Retangular	∞	1	0,000288
ΔE_A	0,0029	B	Triangular	∞	1	0,001183
ΔI_{CMMC}	0,001924	B	Normal	5,9009	1	0,001923
Incerteza padrão combinada (u_c) em mm						0,003243
Grau de liberdade efetivo (ν_{eff})						6,47
Fator de abrangência (k)						2,45
Incerteza expandida (U) em mm						0,008

Dos resultados apresentados obtidos e apresentados nas três tabelas anteriores, 4.4 a 4.6, após a avaliação de incerteza de medição do diâmetro dos furos produzidos pelo alargador e broca especial, pode-se observar que a broca de Ø 9,5 mm (sobremetal 0,5 mm) resultou em um maior valor de desvio padrão e incerteza de medição entre as ferramentas testadas, com um valor de para $k=3,18$ e 95,45% de probabilidade de abrangência, embora este valor de incerteza possa ser considerado adequado para o nível de exatidão da medição. A Figura 4.6 apresenta os valores de incerteza expandida U (mm) dos furos usinados com uma probabilidade de 95,45%, aqueles apresentados nas Tab. 4.4 a 4.6. Pode-se observar que o menor valor de incerteza em relação à medida do diâmetro do furo foi obtido quando se empregou o processo de alargamento cilíndrico com menor valor (sobremetal 0,3 mm). Já o segundo menor valor foi observado quando se empregou a broca especial. Isto indica que estes processos garantiram furos com uma menor variação dimensional.

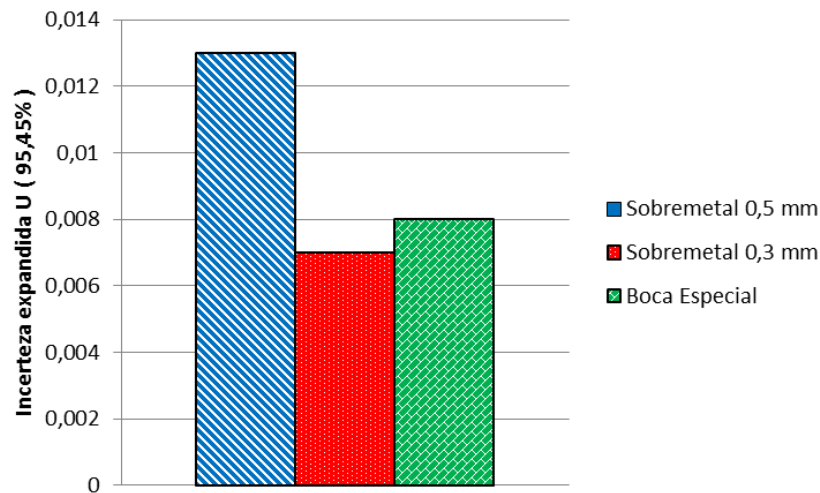


Figura 4.6 – Valores da incerteza expandida U (mm), com uma probabilidade de abrangência de (95,45%).

A próxima etapa avalia a influencia do sobremetal utilizado na qualidade de trabalho (IT) e o cálculo dos valores de afastamento referentes a cada qualidade de trabalho obtida.

4.4 - Influência do sobremetal

Esta etapa consiste em avaliar a influencia do sobremetal nos valores de afastamento nominais das dimensões limites, ou seja, representar os limites entre os quais devem estar compreendidas as dimensões das peças, incluindo o erro de medição referente à qualidade de trabalho IT obtida e também no desgaste das ferramentas utilizadas nos testes. Para a avaliação dos valores de afastamento nominais referentes à qualidade de trabalho IT, foi adotado para este cálculo a Eq. (3.1), onde sempre foi avaliado o ultimo furo usinado.

A variável que aparece em todas as formulas empíricas de calculo de tolerâncias é:

$D = \sqrt{D1D2}$, onde D1 e D2 são as dimensões extremas do intervalo da variação dimensional estabelecida e que deve conter a dimensão nominal do item.

Dimensões:

$$D1 = > 6 \text{ mm}$$

$$D2 = < 10 \text{ mm}$$

$$D = \sqrt{D1D2} \rightarrow \sqrt{6 \times 10} = \rightarrow D = 7,743 \text{ mm}$$

De acordo com os resultados obtidos descritos na Tab.4.1, para o cálculo das tolerâncias fundamentais de afastamento e as dimensões nominais entre > 6 e < 10 mm, e para a qualidade de trabalho IT6, IT7 e IT8, tem-se os seguintes valores de unidade de tolerância.

$$i = 0,45 \sqrt[3]{7,743} + 0,001 \times 7,743 \rightarrow i = 0,898 \mu m$$

A seguir são apresentados os valores de cálculo de afastamento nominal referente a cada qualidade de trabalho (IT) obtida ao final dos testes para os diferentes valores de sobremetal e a broca especial.

$$IT6 = 10 \times i = 10 \times 0,898 = 8,98 \text{ arredondando} = 9 \mu m$$

$$IT7 = 16 \times i = 16 \times 0,898 = 14,368 \text{ arredondando} = 14 \mu m$$

$$IT8 = 25 \times i = 25 \times 0,898 = 22,45 \text{ arredondando} = 22 \mu m$$

4.5 – Desgaste das ferramentas

A seguir, na Tab.4.7, são apresentados os valores de desgaste de flanco $VB_{Bm\acute{a}x}$ monitorados no decorrer dos testes de furação em função do número do furo e na forma gráfica na Fig. 4.7.

Tabela 4.7 - Valores de desgaste de flanco $VB_{Bm\acute{a}x}$ para as diferentes ferramentas.

Desgaste de flanco $VB_{Bm\acute{a}x}$ (mm)			
Nº do Furo	Broca Ø 9,5 mm	Broca Ø 9,7 mm	Broca especial
1	0,0000	0,0000	0,0000
5	0,0223	0,0268	0,0000
10	0,0335	0,0469	0,0134
15	0,0631	0,0604	0,0402
20	0,0738	0,0805	0,0536
25	0,0876	0,0965	0,0641

A Figura 4.7 apresenta os valores de desgaste de flanco $VB_{Bm\acute{a}x}$ monitorados nas brocas em função do número do furo realizado nos testes, onde se procurou tirar a influência de desgaste ocorrido, ou seja, permitindo somente um valor de desgaste $VB_{Bm\acute{a}x}$ igual ou abaixo de 0,1mm de acordo com os valores apresentados na Tab.4.7.

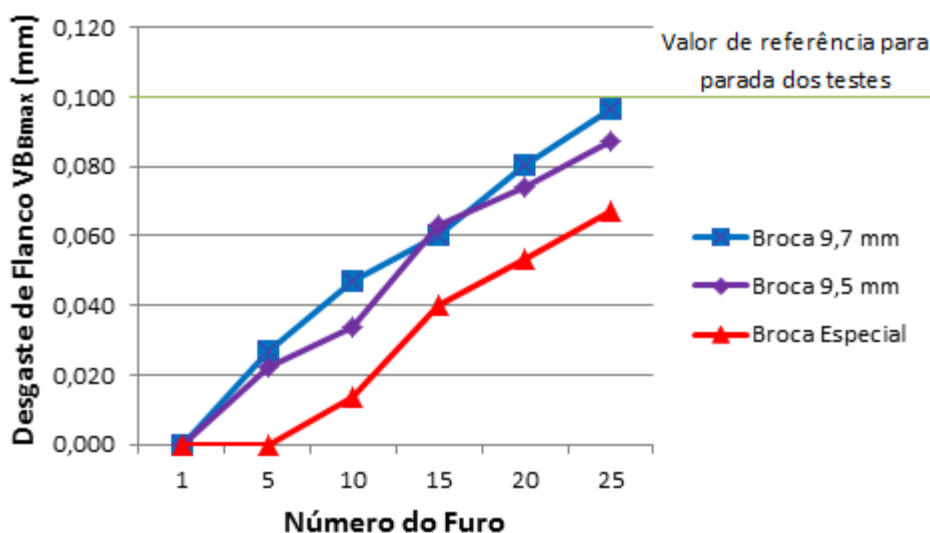


Figura 4.7 – Valores de desgaste de flanco máximo $VB_{Bm\acute{a}x}$ em função do número de furos.

Ao observar o gráfico da Fig. 4.7, os resultados apresentam pequenas diferenças com relação ao desgaste de flanco $VB_{Bm\acute{a}x}$ das brocas utilizadas na pré-furação, que antecede o processo de alargamento cilíndrico. A broca especial apresentou menor valor de desgaste de flanco $VB_{Bm\acute{a}x}$ quando comparada com as outras brocas, em torno de 30% (menor o valor de desgaste de flanco), quando comparada com a broca de diâmetro 9,7 mm, e cerca de 20% menor em relação à broca com diâmetro de 9,5 mm, nota-se ainda que o desgaste de flanco máximo, $VB_{Bm\acute{a}x}$, só veio a ocorrer na broca especial a partir no furo de número 10. Vale ressaltar que as velocidades de corte foram às mesmas para a furação com brocas convencionais e com brocas especiais (Tab. 3.6) e apenas o avanço foi alterado, 0,25 mm/rot para as brocas convencionais contra 0,20 mm/rot para as brocas especiais. Isso indica que mesmo de forma análoga diante dos resultados observados, pode-se considerar que a avaliação dos desgastes ocorridos nas brocas, de acordo com os valores apresentados na Tab.4.1, que a maioria das ferramentas apresenta um valor de desgaste muito pequeno em relação ao número do furo executado nos testes, considerando ainda que os ensaios foram feitos na condição a seco.

Os desgastes das ferramentas foram verificados ao final dos testes, em geral são apresentadas as imagens de desgaste no flanco $VB_{Bmáx}$. As Figuras 4.8 (a) e (b) apresentam os valores de desgaste para as duas arestas (indicadas pelas setas) da broca de $\varnothing 9,5$ mm ao final do furo de número 25 (último furo). Em geral o desgaste foi uniforme ao longo da aresta de corte para as duas arestas da broca, demonstrando que as condições de corte empregadas foram adequadas.

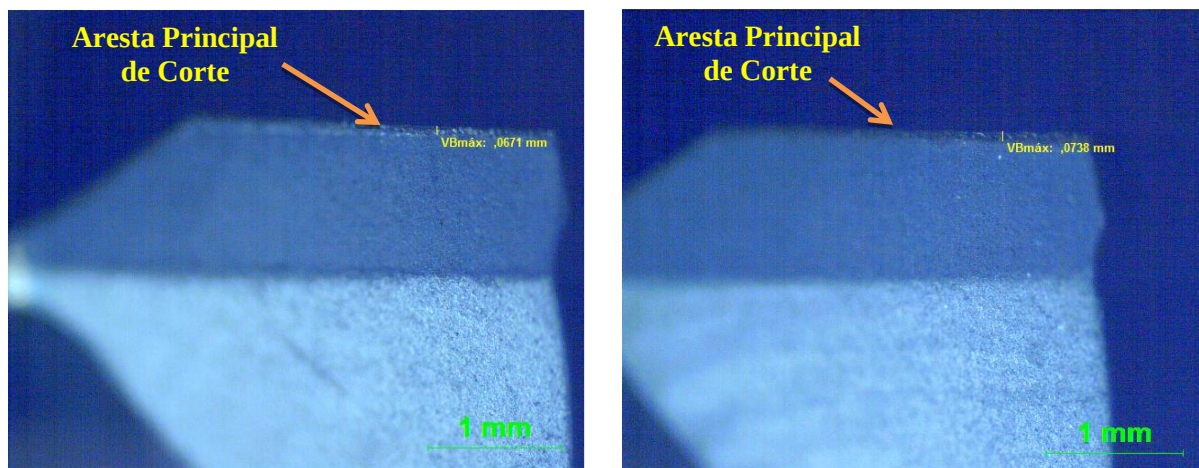


Figura 4.8 – Arestas da broca de 9,5 mm: (a) aresta 1, (b) aresta 2.

Na Figura 4.9 é apresentada a imagem da aresta transversal da broca de 9,5 mm. Observa-se que a aresta sofreu lascamento causada pelo atrito com a peça durante a usinagem.

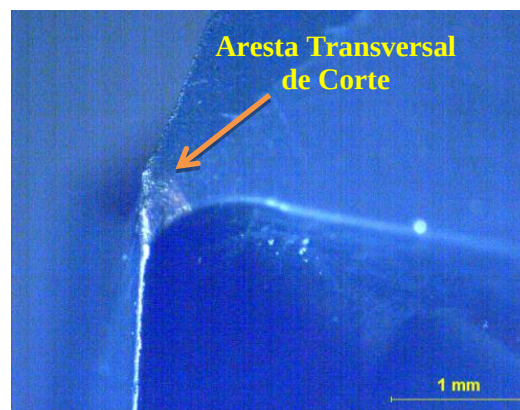


Figura 4.9 – Aresta transversal de corte broca $\varnothing 9,5$ mm

As Figuras 4.10 (a) e (b) apresentam os valores de desgaste de flanco das arestas 1 e 2 da broca de Ø 9,7 mm após usinagem do último furo (número 25). Fig. 4.11 mostra a imagem da aresta transversal da broca de Ø 9,7 mm.

Das Figuras 4.8 a 4.11 não se pode afirmar, por meio das imagens, que houve diferença significativa no valor de desgaste das arestas nas condições investigadas. Em geral, as formas de desgaste de flanco $VB_{Bmáx}$, durante a usinagem foram bem similares para ambas às brocas empregadas, de diâmetros de 9,5 e 9,7 mm.

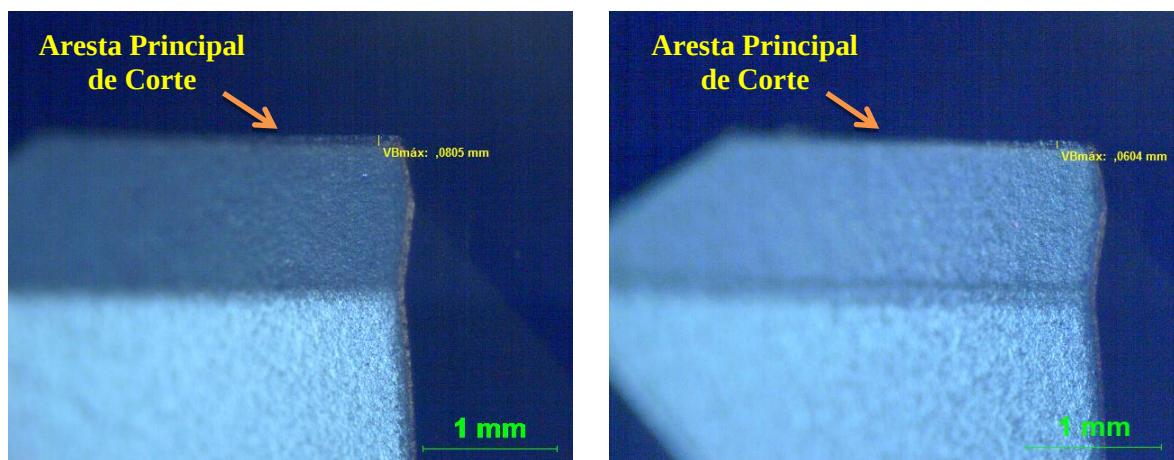
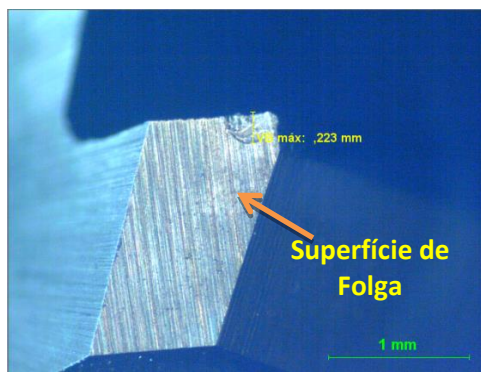


Figura 4.10 – Arestas da broca de 9,7 mm: (a) aresta 1, (b) aresta 2.

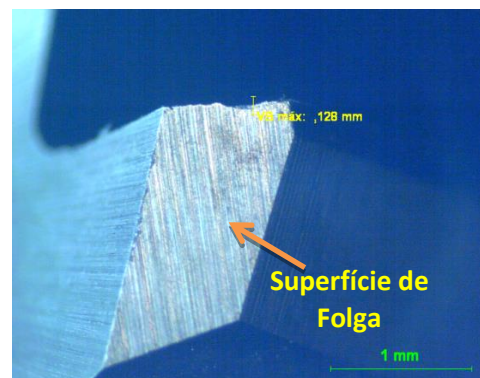


Figura 4.11 – Aresta transversal de corte broca Ø 9,7 mm

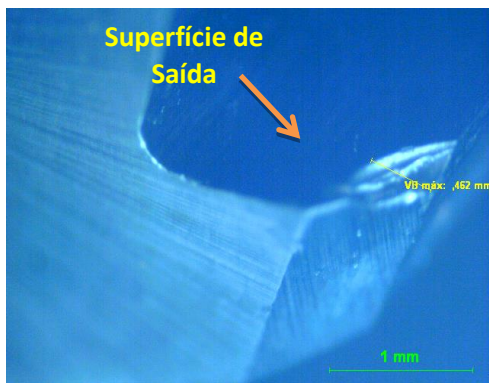
Nas Figuras 4.12 (a) a (d) são apresentadas as imagens das arestas de corte dos alargadores empregados no trabalho após usinagem do furo 25 em função do sobremetal deixado pelas brocas. Da Figura 4.12 (a), alargador empregado após pré-furo com sobremetal igual a 0,5 mm observa-se que houve pequeno lascamento da aresta de corte e o desgaste foi relativamente maior que aquele observado em relação ao alargador que usinou o furo com sobremetal igual a 0,3 mm Fig.4.12 (b). Mas ao observar as imagens obtidas da superfície de saída dos mesmos alargadores, Figuras 4.12 (c) e (d), observa-se a presença de lascamento no alargador empregado no pré-furo deixado com sobremetal igual a 0,3mm.



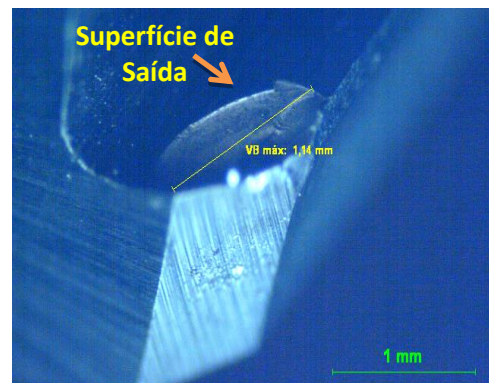
(a)



(b)



(c)



(d)

Figura 4.12 – Imagens das arestas de corte dos alargadores: a) superfície de folga– sobremetal= 0,5mm; b) superfície de folga sobremetal = 0,3mm; c) superfície de saída – sobremetal = 0,5mm; d) superfície de saída– sobremetal = 0,3mm.

Il'in (1975) apud Da Silva (2001) ao utilizar metal duro com $V_c = 78,4$ m/min e $f = 0,62$ mm/rot (considerados valores elevados) observou que as arestas de corte apresentavam lascamento ou até mesmo fratura súbita. Ao reduzir a velocidade de corte pela metade e

mantendo o avanço constante, notou o aparecimento de desgaste mais uniforme na superfície de folga da ferramenta, sem a ocorrência de lascamento.

Borille (2005) em seus estudos de análise do alargamento de ferro fundido Cinzento GG25 com ferramentas de metal duro, observou diversos tipos de lascamentos e falhas na aresta principal de corte e nas guias cilíndrica dos alargadores com diâmetro de 9,011 mm utilizando diferentes parâmetros de corte.

O lascamento ou a quebra são o resultado de uma sobrecarga das tensões de tração mecânica. Estas tensões podem ocorrer por vários motivos, como martelamento de cavacos, uma profundidade de corte ou avanço muito alto, inclusão de areia no material da peça, aresta postiça, vibrações ou desgaste excessivo na ferramenta (Stemmer, 2005; Diniz et al., 2006). Outro fator pode estar relacionado à ausência de fluido de corte nos ensaios, que pode ter dificultado a dissipação de calor. Segundo Machado (2009) a avaria em uma ferramenta de corte é um fenômeno que ocorre de maneira repentina e inesperada, causado pela quebra, lascamento ou trinca da aresta de corte.

Na Figura 4.13 (a) e (b) são apresentadas as imagens das arestas de corte 1 e 2 da broca especial e a Fig.4.14 apresenta a aresta transversal de corte da broca especial empregada nos testes de furação em comparação com o alargamento cilíndrico após usinagem do ultimo furo (número 25).

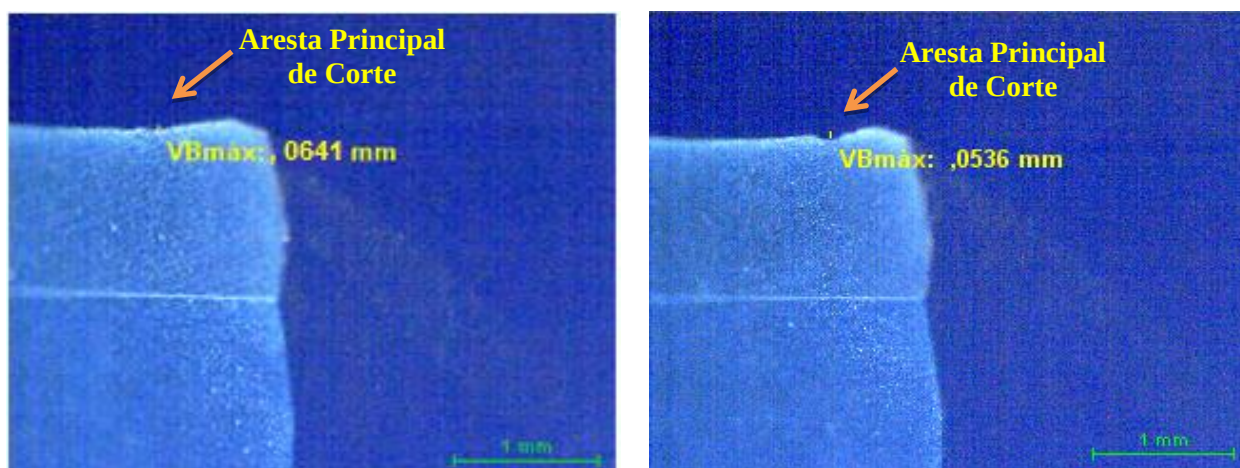


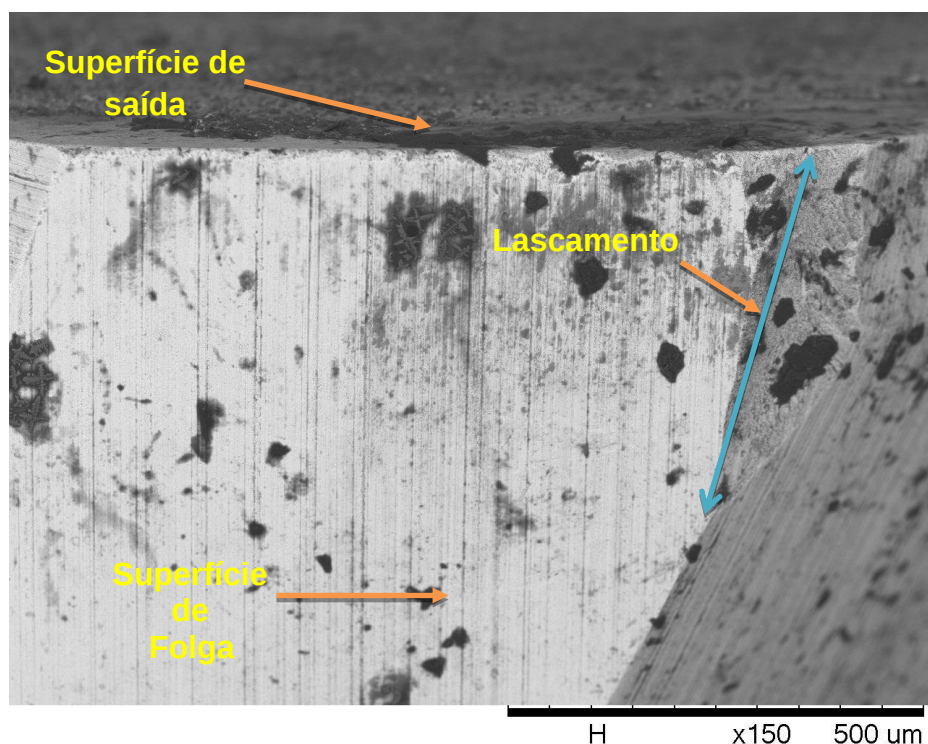
Figura 4.13 – Arestas da broca especial de Ø 10 mm: (a) aresta 1, (b) aresta 2.



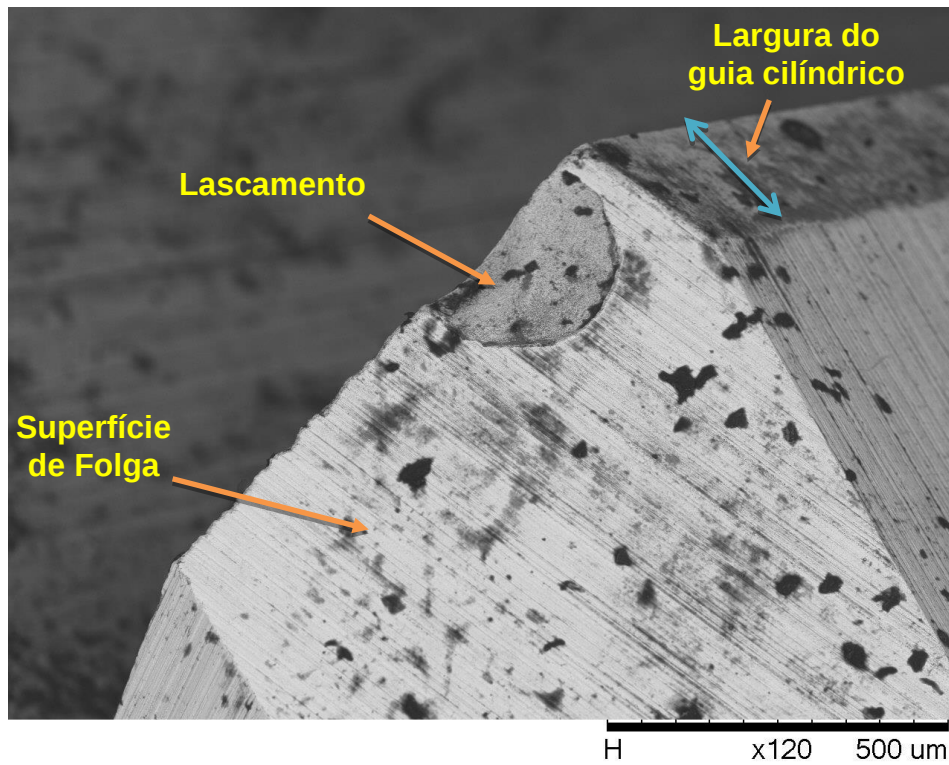
Figura 4.14 – Aresta transversal de corte da broca especial Ø 10 mm

A seguir, nas Figuras 4.15 e 4.16, são apresentadas as imagens das ferramentas desgastadas que foram obtidas com o auxílio do MEV em diferentes ampliações.

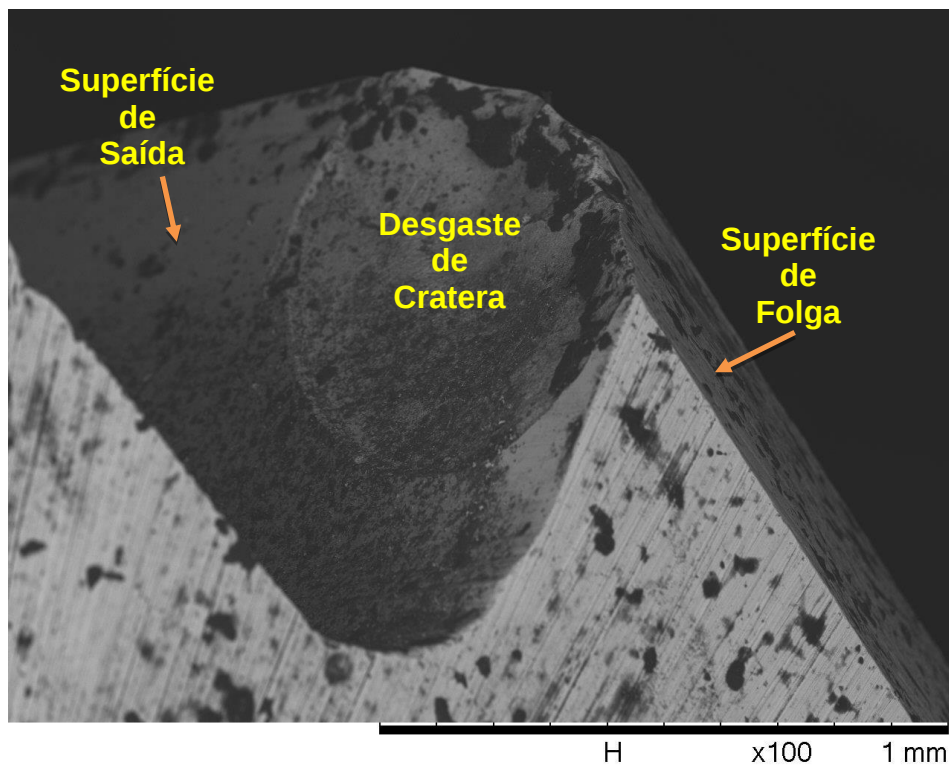
As Figuras 4.15 (a) a (f) apresentam as imagens gerais dos desgastes ocorridos nas diferentes ferramentas. Destas figuras observa-se que os alargadores sofreram desgaste mais severo que as brocas especiais nas condições investigadas com visível lascamento alternando entre as superfícies de folga e de saída.



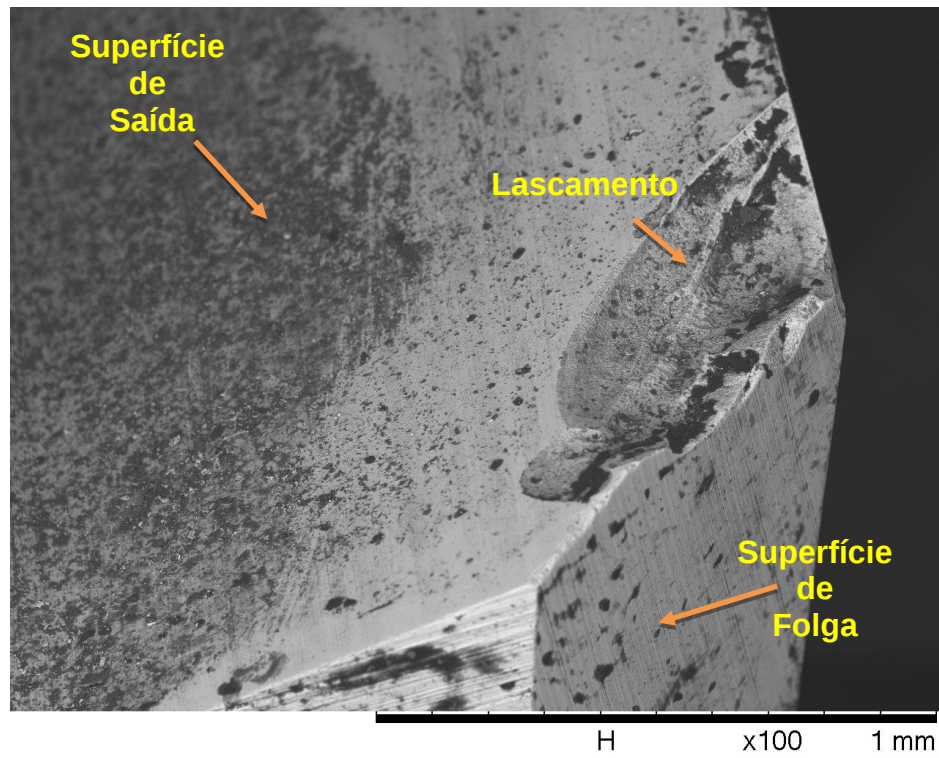
(a) – Vista do alargador após broca 9,5 mm



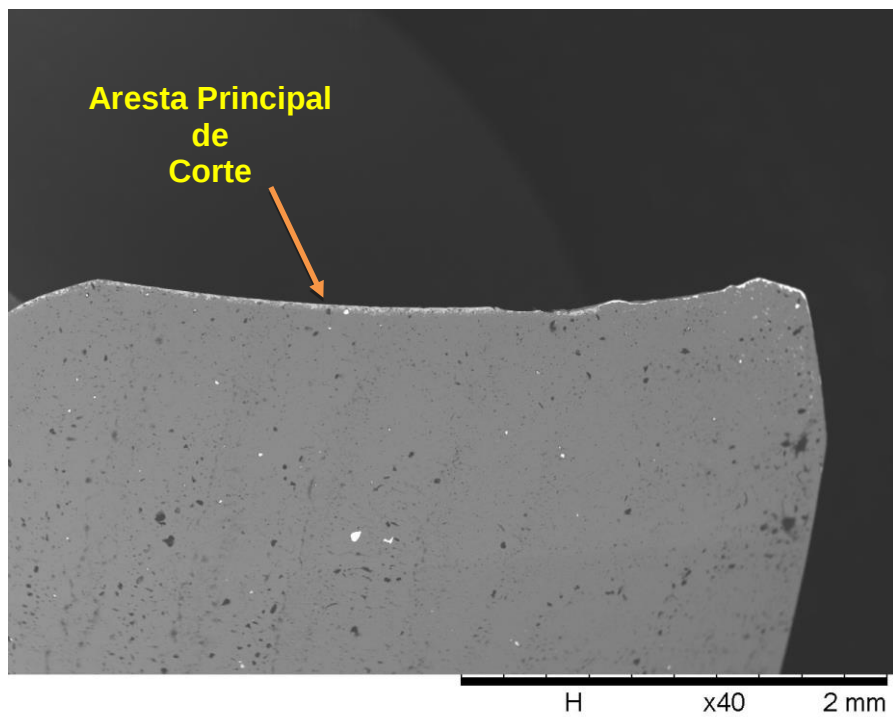
(b) – Vista do alargador após broca 9,7 mm



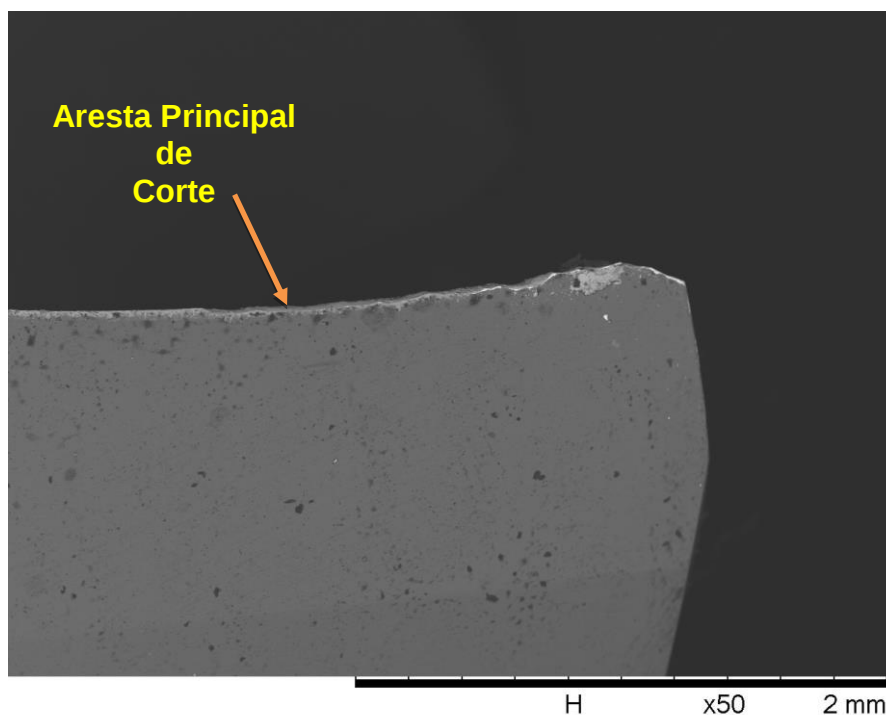
(c) – Vista do alargador após broca 9,5 mm



(d) – Vista do alargador após broca 9,7 mm



(e) – Vista aresta de corte 1 da broca especial



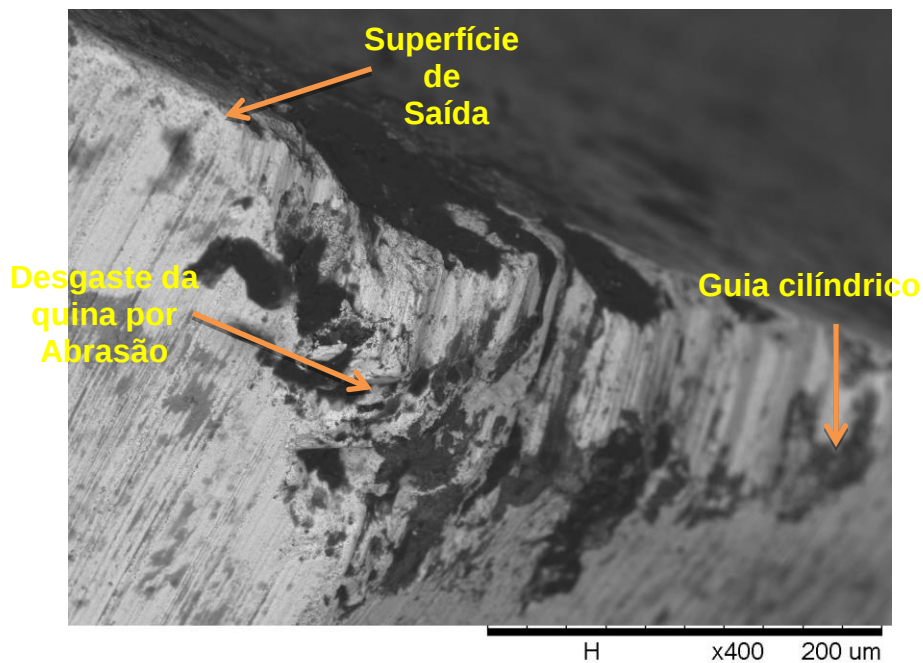
(f) – Vista aresta de corte 2 da broca especial

Figura 4.15 – Imagens obtidas no Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV) das superfícies das ferramentas desgastadas: a) vista da superfície de folga do alargador após usinagem com broca de 9,5 mm b) vista geral da aresta de corte do alargador após usinagem com broca de 9,7 mm; c) vista da superfície de saída do alargador após usinagem com broca de 9,5 mm; d) vista de aresta de corte da broca de 9,7 mm; e) Aresta de corte 1 da broca especial; f) Aresta de corte 2 da broca especial.

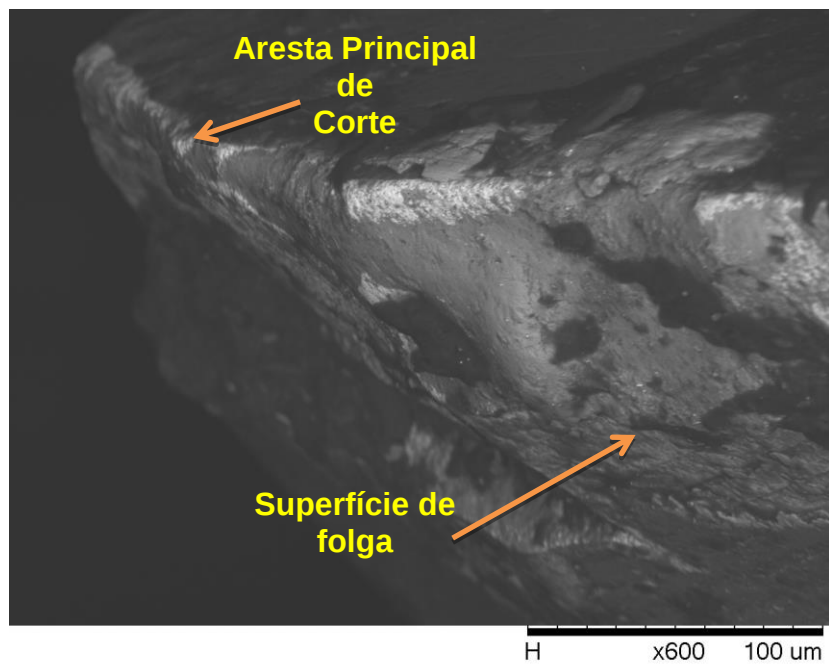
Segundo Zeilmann et al., (2005), os problemas de desgaste em ferramentas de corte sempre foram motivos de preocupação, devido ao controle dimensional e à necessidade de parada no processo para troca das ferramentas. Isso significa custos adicionais e perda de produtividade. Na usinagem do ferro fundido os principais tipos de desgaste são a abrasão, a adesão e a difusão, nesta ordem. A abrasão é causada por carbonetos na microestrutura e por areia na superfície. A adesão pode vir de aresta postiça de corte em baixas velocidades. E a difusão pode ocorrer em altas velocidades na superfície de saída quando não se usam coberturas apropriadas (Machado et al., 2009).

Mais imagens das ferramentas desgastadas são apresentadas nas Figuras 4.16 (a) a (c) com detalhes para a aresta de corte. Destas figuras é possível observar o desgaste da quina do alargador após furação com broca de 9,7mm (sobremetal de 0,3 mm) fornecendo evidências que

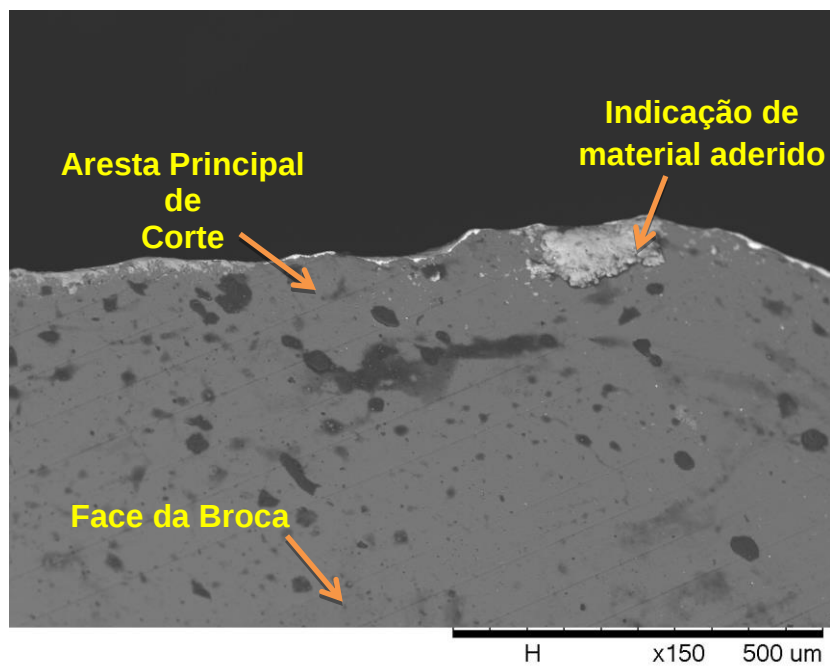
houve o mecanismo de desgaste por abrasão Fig. 4.16 (a). Já para as brocas especiais, Fig.4.16 (b) e (c), não se pode afirmar que houve desgaste por abrasão, mas pelas imagens pode se observar lascamento de material da aresta de corte e em alguns casos a indicação da presença de material aderido. Vale lembrar que o valor de velocidade de corte empregado para a broca especial foi quase 5 vezes maior que aquele para os alargadores e com o dobro do avanço Tab. 3.6, indicando que as brocas especiais conseguiram usinar em condições mais severas que os alargadores sem sofrer grandes alterações que pudessem comprometer a aresta de corte nas condições investigadas.



(a)



(b)



(c)

Figura 4.16 – Imagens das ferramentas desgastadas obtidas no Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV) – (a) Desgaste da quina do alargador após furação com broca de 9,7mm (sobremetal de 0,3 mm); (b) e (c) Aresta principal de corte da broca especial $\varnothing$ 10 mm.

4.6 - Análise de medição da microdureza (HV).

A Figura 4.17 mostra as diferentes marcas deixadas na peça pelo penetrador Vickers durante a medição de microdureza, ou seja, pontos indentados em relação à parede interna dos furos. As distâncias entre as indentações foram de $40\text{ }\mu\text{m}$ tanto par o eixo X quanto para o eixo Y, incluindo a primeira marca de indentação, respeitando sempre esta mesma distância entre os demais em relação à borda interna do furo usinado, a distância de profundidade em relação à borda superior do furo foi de 5 mm.

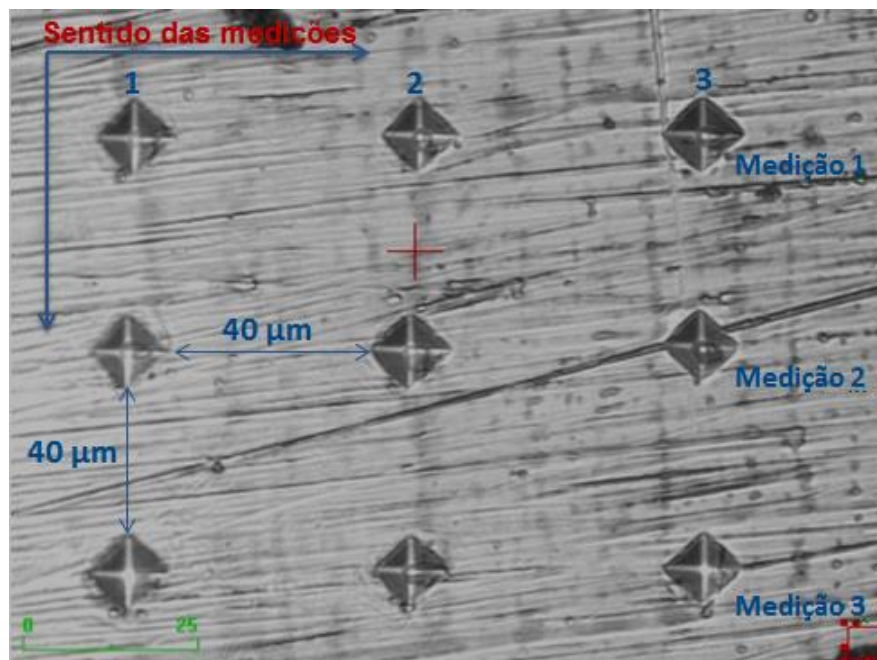


Figura 4.17 – Pontos de indentação para medição da microdureza (HV) após processo de alargamento cilíndrico utilizando sobremetal de 0,5 mm.

A Tabela 4.8 mostra os valores de medição da microdureza (HV) que foi realizada no último furo usinado pelos alargadores e broca especial.

Tabela 4.8 – Valores de microdureza (HV) medidos na superfície de entrada do furo em função das diferentes ferramentas empregadas.

Nº de Leituras	Broca Especial		
	1ª Marca	2ª Marca	3ª Marca
1	346	346	314
2	378	399	369
3	346	344	324
Nº de Leituras	Sobremetal 0,5 mm		
	1ª Marca	2ª Marca	3ª Marca
1	346	359	322
2	365	371	399
3	329	329	358
Nº de Leituras	Sobremetal 0,3 mm		
	1ª Marca	2ª Marca	3ª Marca
1	436	406	428
2	384	385	392
3	421	432	424

Ao comparar os valores de dureza do material da peça antes da usinagem (a Tab. 3.1) que se situa entre 321 e 366 HV, com os valores após a usinagem (Tab. 4.8 e Fig. 4.18), nota-se que não houve alteração da microdureza na parede dos furos usinados em função das ferramentas empregadas. A oscilação entre os valores na Fig. 4.18 pode ser considerada normal, já que o ferro fundido utilizado nos experimentos possui variação de dureza provenientes do processo de fundição, ou seja, não possuem estrutura homogênea.

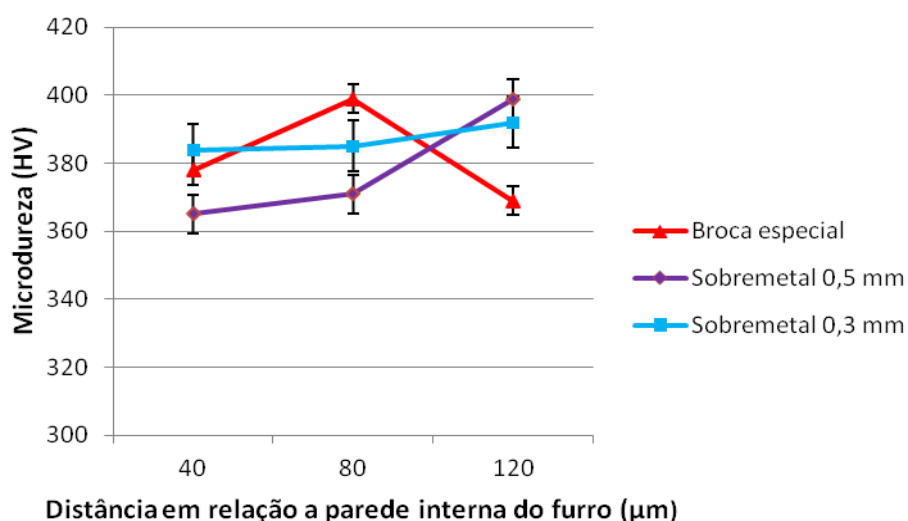


Figura 4.18 – Valores de microdureza (HV) em ferro fundido vermicular em relação a distancia dos pontos de endentação após usinagem com diferentes ferramentas em diferentes condições de corte.

Segundo Miranda (2003) em seus estudos sobre o processo de furação com broca de metal duro revestida com TiAlN sem fluido de corte, após análises feitas nos corpos de prova o autor observou a existência de uma zona afetada pelo calor da ordem de 6 μm até 68 μm , e que resultou na estrutura martensítica. Ele ainda notou a presença de outros tipos de alterações na camada sub-superficial das amostras, tais como deformações determinadas pela orientação da microestrutura na direção da extração do material (movimento da broca). Segundo o autor o aparecimento da camada afetada pode ser explicado pela ocorrência de atritos entre o corpo da broca e a parede do furo, o que provoca um esmagamento da superfície usinada e causa a formação de uma camada deformada na estrutura sub-superficial do furo, sendo o fator mais predominante para a formação da camada afetada é o aquecimento gerado pelo atrito da ferramenta e o cavaco na peça que, conforme já indicado anteriormente.

Ramos (2008), em estudos sobre os aspectos cinéticos da transformação bainítica incompleta em ferros fundidos nodulares, verificou que as regiões contendo martensita apresentam dureza bastante elevada, em torno de 925 HV. Quanto à combinação de ferrita bainítica e austenita retida em filmes, observou-se que não há variação significativa nos valores de microdureza em função dos teores de silício das ligas. Porém, a amostra austemperada a 320°C apresentou valor mais elevado em comparação com a amostra austemperada a 370°C. Segundo o autor, este resultado pode ser atribuído ao maior grau de refinamento da microestrutura.

Doré (2007), após estudar a influência da variação da nodularidade de ferro fundido vermicular, observou que a microdureza da perlita dos corpos de prova utilizando uma carga de (0,5 Kgf), em 5 pontos distintos ao longo da amostra, notou uma correlação entre a dureza Brinell (HB) da superfície das amostras e a microdureza da perlita e que a dureza foi inversamente proporcional à nodularidade, pois na liga VER-1 com 6% de nodularidade tem as durezas mais elevadas, decrescendo até a liga VER-3 com 36% de nodularidade e menores durezas, tanto na superfície quanto na microdureza da perlita.

A etapa seguinte consiste a seguir consiste em avaliar os aspectos econômicos em relação ao tempo de processo referente a cada ferramenta utilizada e os custos de cada processo.

4.7 - Aspectos econômicos de usinagem

Esta etapa consistiu em avaliar os aspectos econômicos das ferramentas utilizadas nos testes que estão relacionados com os custos envolvidos na produção de uma peça. Cada furo considerado uma peça para esta análise. Foram calculados o tempo e custos de fabricação.

4.7.1 – Tempo de fabricação

A determinação do tempo de fabricação de um furo ou peça está relacionado às parcelas de tempo individuais do processo de furação/alargamento e furação apenas com broca especial e que são calculados pela Eq.(2):

$$t_t = t_c + t_s + t_a + (t_p / Z) + t_{ft} \quad (2)$$

Onde:

- t_t : tempo total de fabricação por peça, (min/pç);
- t_c : tempo de corte da ferramenta, (min/pç),
- t_s : tempos secundários de usinagem, (min/pç),
- t_a : tempo de aproximação e afastamento da ferramenta, (min/pç),
- t_p : tempo de preparação da máquina, (min),
- t_{ft} : tempo de ajuste e troca da ferramenta (min/pç),e
- Z: tamanho do lote, (Nº de peças ou Nº furos).

Logo, da Eq. (2), o tempo total t_t para a produção de 25 peças ou furos com broca helicoidal convencional seguida de alargador será:

$$t_t = 0:42'' + 0:10' + 0:08'' + (0:12'/25) + 0:12'$$

$$t_t = 23'48''$$

Ou seja, o tempo total para a produção de 25 peças considerando pré-furação e alargamento será de vinte e três minutos e quarenta e oito segundos ($t_{t \text{ broca} + \text{alargador}} = 23'48''$).

Vale ressaltar que a parcela de tempo de troca de ferramenta contém os tempos necessários para a broca e para o alargador.

De forma análoga, da Eq. (2), o tempo total t_t para a produção de 25 peças ou furos com broca helicoidal especial será:

$$t_t = 0:09'' + 0:10' + 0:05'' + (0:10'/25) + 0:06'$$

$$t_t = 16'54''$$

Ou seja, o tempo total para a produção de 25 peças considerando apenas furação com broca especial será de dezesseis minutos e cinquenta e quatro segundos ($t_{t \text{ - broca especial}} = 16'54''$).

Ao comparar os tempos para fabricação de 25 furos com as diferentes ferramentas, observa-se que houve uma redução de cerca de 29 % ao se empregar as brocas especiais.

4.7.2 – Custos de fabricação

Segundo Diniz et al., (2006), nos cálculos dos custos de produção, pode dividir estes custos em duas categorias: aqueles diretos, devido ao processo de fato, como custo das ferramentas e custo de ocupação das máquinas e dos operadores e aqueles não diretamente envolvidos com o processo, como custo de controle de qualidade, custo de matéria prima, custo de mão de obra indireta, etc. Assim, os custos diretamente envolvidos com a produção de uma peça por usinagem pode ser expresso pela Eq.(3):

$$K_p = K_{us} + K_{um} + K_{uf} \quad (3)$$

Onde:

K_p = custo de produção por peça

K_{us} = custo de mão de obra de usinagem

K_{uf} = custo das ferramentas (depreciação, troca, afiação).

K_{um} = custo da máquina (depreciação, manutenção, espaço, ocupado, energia consumida, etc.).

Vale ressaltar que o custo de produção por peça deveria também envolver outros custos, mas para os objetivos deste trabalho, somente a somatória destas três parcelas foi suficiente.

Assim, da Eq. (3), o custo de produção por peça para o processo de alargamento (K_{pa}) cilíndrico utilizando diferentes tipos de sobremetal será:

$$K_p = K_{us} + K_{um} + K_{uf}$$

$$K_p = R\$ 18,00 \text{ hr/op.} + (R\$126,78_{\text{(broca)}} + R\$200,55_{\text{(alargador)}}) + R\$230,00 \text{ hr/máq.}$$

$$K_{pa} = R\$575,33$$

Ou seja, o custo de fabricação por peça envolvendo os processos de pré-furação com brocas convencionais e alargadores foi de quinhentos e setenta e cinco Reais e trinta e três centavos ($K_{pa} = R\$575,33$).

De forma análoga, da Eq. (3), o custo de produção por peça para o processo de furação utilizando brocas de geometria especial (K_{pbe}) será:

$$K_p = K_{us} + K_{um} + K_{uf}$$

$$K_p = R\$ 18,00 \text{ hr/op.} + R\$138,62_{\text{(broca esp.)}} + R\$230,00 \text{ hr/máq.}$$

$$K_{pbe} = R\$386,62$$

Ou seja, o custo de fabricação por peça envolvendo o processo de furação apenas com brocas especiais foi de trezentos e oitenta e seis Reais e sessenta e dois centavos ($K_{pbe} = R\$386,62$).

Ao comparar os custos de fabricação entre o processo de alargamento (precedido pelo processo de furação) e processo de furação com broca especial, observa-se que houve uma redução de 33% no custo quando se empregou a broca especial nas condições investigadas.

Para melhor entendimento e resumo das informações desta sessão, na Tab.4.9 são mostrados os valores de tempo total de fabricação, custo e qualidade IT proporcionada em

relação a cada processo de usinagem empregado, para o critério de 25 furos adotado neste trabalho.

Tabela 4.9 – Avaliação do custo das ferramentas comparado com a qualidade de trabalho proporcionada.

Ferramentas	Rugosidade		Cilindricidade (μm)	Tempo Total de Fabricação	Custo Total de Fabricação	Qualidade de Trabalho (IT)
	R _a (μm)	R _y (μm)				
Alargador (sobremetal 0,3 mm)	1,76	8,53	10,18	23'48"	R\$575,33	IT6
Alargador (sobremetal 0,5 mm)	1,14	12,21	10,45	23'48"	R\$575,33	IT7
Broca Especial	1,16	12,38	11,21	16'54"	R\$386,62	IT8

Diante dos valores obtidos após os cálculos de custo da produção entre os diferentes processos de obtenção de furos cilíndricos com tolerâncias mais estreitas, pode-se afirmar que o processo de furação com a broca de geometria especial proporcionou um tempo de usinagem cerca 29 % menor em relação aquele calculado para o processo de alargamento, e foram 33% menor em termos de custo entre os processos envolvidos, para o critério adotado de 25 furos neste trabalho.

Estes resultados também indicam que, quando se almeja uma qualidade de trabalho (IT6), não há diferença entre de valores financeiros e nem sobre o tempo de usinagem operacional, pois os valores em relação ao custo das ferramentas e também de tempo de usinagem utilizando-se diferentes valores de sobremetal são praticamente os mesmos. Os resultados deste trabalho, em termos de qualidade IT, tanto para os alargadores quanto as brocas especiais foram bem animadores, pois variaram entre IT6 e IT8. Vale ressaltar que, de acordo com a literatura pesquisada para este trabalho, foram encontrados diversos valores de qualidade de trabalho IT, na maioria superior a IT8, tanto para o processo de alargamento cilíndrico quanto para o processo de furação. Alguns destes resultados são apresentados a seguir.

De Chiffre et al., (2009) investigando a capacidade do processo de alargamento com MQL, utilizando alargadores de HSS com diâmetros de 9,8 e 10,3 mm, obtiveram uma qualidade de trabalho IT7 e IT8.

Harrys (2003), em seus estudos sobre os mecanismos de desgaste utilizando diferentes tipos de brocas revestidas na usinagem a seco, obteve qualidades de trabalho que variaram entre IT9 e IT11.

Machado (2011) em seus estudos sobre diferentes geometrias de corte em broca de metal duro com canal reto em ferro fundido cinzento, obteve uma qualidade de trabalho IT10 utilizando brocas de metal duro com ponta cônica normal e qualidade IT7 utilizando brocas de metal duro com ponta cônica esférica.

Novaski (1996), utilizando brocas helicoidais com afiações do tipo Bickford, Helical, Rancon e Cruzada na furação de titânio, conseguiram qualidades de trabalho variando na faixa IT9 a IT10.

Oliveira (2008) estudou a influência de três geometrias de afiação da ponta em brocas helicoidais (afiação em S, em cruz e a geometria com ponta em raio) com diâmetro de 6 mm, sem canais de refrigeração, revestidas por TiAlN de camada única na usinabilidade do ferro fundido vermicular e também obteve qualidades de trabalho variando na faixa IT9 a IT10.

Diante dos resultados encontrados na literatura consultada e comparados com os descritos na Tab.4.7 pode se afirmar que a broca de geometria especial detém uma melhor margem em relação ao custo e ao tempo de usinagem, ou seja, para operações onde a qualidade de trabalho (IT) requerida em processo de furação esteja na classe de qualidade de trabalho (IT8), esta ferramenta seria ideal tanto em relação ao custo de usinagem, quanto, para o tempo de usinagem proporcionando uma melhor margem de lucro ao final do processo de usinagem e também em relação à qualidade de trabalho IT.

CAPITULO V

CONCLUSÕES

As seguintes conclusões podem ser retiradas deste trabalho:

- O número de furos (25) como critério de parada dos ensaios, juntamente com $VB_{Bmax} = 0,1 \text{ mm}$, foi adequado para avaliar o desempenho de alargadores e das brocas especiais em termos de acabamento, desvios de cilindridade, desvio dimensional, microdureza, desgaste das ferramentas e realizar análise das condições econômicas de usinagem;
- Os valores de R_a variaram na faixa entre $1,00$ e $2,20 \mu\text{m}$ e este parâmetro em geral diminuiu com o número de furos para o maior sobremetal no processo de alargamento (broca de $9,5 \text{ mm}$). Para Ferraresi (2006), em processos de alargamento mais comuns são esperados valores de R_a entre $0,8$ e $3,2 \mu\text{m}$.
- Observa-se ainda que, em geral, a rugosidade também apresenta uma leve tendência de elevação com o número de furos usinados tanto para a broca especial quanto para o menor valor de sobremetal (para os parâmetros de rugosidade R_a e R_y) diferentemente da tendência observada para os ensaios com o maior valor de sobremetal.
- Após análise das superfícies usinadas, observou-se que a broca especial promoveu marcas de avanço mais definidas em relação aos alargadores;
- Em relação ao desvio de cilindridade, ele aumentou com o número de furos e os maiores valores foram observados quando empregaram alargadores com sobremetal de $0,5 \text{ mm}$ e com broca especial. A broca especial apresentou o pior desempenho em relação a este parâmetro;
- Os resultados de análise de variância da distribuição t de Student indicou que os fatores de controle produziram efeito significativo nas variáveis de resposta, onde as variáveis de rugosidade R_a e R_y (sobremetal $0,5 \text{ mm}$) e as variáveis de desvios dimensionais obtiveram diferenças estatísticas, seno os demais resultados permanecendo iguais estatisticamente.
- O mecanismo de desgaste predominante nas ferramentas foi o desgaste por abrasão seguido de lascamento de forma acentuado na superfície de saída dos alargadores que

usinaram os furos com sobremetal igual a 0,3 mm. Observou-se destacamento de material da aresta de corte;

- Em relação à microdureza das superfícies usinadas, não houve alteração causada por nenhuma das ferramentas empregadas;
- A melhor qualidade de trabalho, IT6, foi alcançada quando se empregou o alargador com sobremetal de 0,5 mm. Já a broca especial proporcionou qualidade IT8;
- A broca de geometria especial proporcionou um tempo de usinagem 29 % menor com redução de cerca 33% no custo de fabricação em relação ao emprego de alargador nas condições investigadas, para um total de 25 furos, indicando-se, portanto que ela pode ser empregada em substituição a alargador cilíndrico de canal reto na usinagem de ferro fundido vermicular quando tolerâncias de trabalho IT8 forem satisfatórias.

CAPITULO VI

SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

- Realizar um estudo empregando à metodologia semelhante à adotada neste trabalho, porém na presença de fluido de corte e ampliando a faixa de velocidades de corte e avanço tanto para as brocas especiais quanto para os alargadores;
- Realizar estudos utilizando diferentes geometrias de brocas e com diferentes diâmetros em comparação com o processo de alargamento e adotar o colapso das ferramentas como critério de parada dos testes;
- Realizar um estudo sobre a influência dos parâmetros de corte utilizados neste trabalho em outros materiais como aço comum ao carbono e ligas de alumínio;
- Realizar estudos mais detalhados como monitoramento sobre as forças de corte e torque atuantes nos dois processos estudados neste trabalho;
- Realizar um estudo sobre os processos de furação e alargamento feitos neste trabalho utilizando ferramentas com diferentes tipos de revestimento, e de longa duração para levantamento mais detalhado da vida da ferramenta.

CAPITULO VII

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AGAPIOU, J, S., 1993. Desing Characteristics of New Types of Drill And Evaluation of Their Performance Drilling Cast Iron. Drill With Four Major Cutting Edges Int. J. Mach. Tools Manufact. Vol. 33, No. 3, Pp 321-341, (+) 890-6955/9356.00. Impresso na Grã-Bretanha.

AGOSTINHO, O.L.; RODRIGUES, A.C.S.; LIRANI, J. 2004. Tolerâncias, ajustes, desvios e análise de dimensões, 8ª. reimpressão. São Paulo: Edgard Blücher, Pp. 295.

ALMEIDA, D.O., 2008, Investigação de Desvios Geométricos no Alargamento de Ferro Fundido com Ferramentas Revestidas, Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Uberlândia, MG. Pp. 103.

APOSTILA DE METROLOGIA CNI, 2012. Disponível em:
<http://www.abraman.org.br/Arquivos/48/48.pdf>, Acesso em: Dezembro de 2012

APOSTILA DE METROLOGIA - Parte II-DEMEC – DESVIOS E TOLERÂNCIAS GEOMETRICAS - DEMEC – UFMG, 2012.

Disponível em:
<http://www.demec.ufmg.br/disciplinas/ema092/Documentos/APOSTILA PARTE II cap 1 Controle Geometrico.pdf>

Acesso em: Novembro de 2012

APOSTILA SISTEMAS DE TOLERÂNCIAS E AJUSTES- DEMEC – UFPR, 2012. Disponível em: <ftp://ftp.demec.ufpr.br/disciplinas/TM297-TM159/Arquivos%20gerais/Metrologia%20-%20Toler%20ncias%20e%20Ajustes.pdf>

Acesso em: Dezembro de 2012

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, NBR ISO 6158: 1995. Sistema de tolerâncias e ajustes. Rio de Janeiro, Pp.79.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, NBR ISO 5419:2009 Brocas helicoidais - Termos, definições e tipos. Rio de Janeiro, Pp18.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, ABNT NBR 7079:2010: Brocas helicoidais calibradoras com haste cilíndrica e haste cone Morse, Rio de Janeiro, Pp5.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, NBR 6409: 1997. Tolerâncias geométricas – Tolerâncias de forma, orientação, posição e batimento – Generalidades, símbolos, definições e indicações em desenho. Rio de Janeiro, Pp.19.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, NBR ISO 3002-1: 2013: Grandezas básicas em usinagem e retificação Parte 1: Geometria da parte cortante das ferramentas de corte — Termos gerais, sistemas de referência, ângulos da ferramenta e de trabalho e quebra-cavacos. Rio de Janeiro, Pp.70.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, NBR ISO 4287:2002 Especificações geométricas do produto (GPS) - Rugosidade: Método do perfil - Termos, definições e parâmetros da rugosidade. Rio de Janeiro, Pp.18.

BAGCI, E.,* BABUR, O.; 2006. Investigation of the effect of drilling conditions on the twist drill temperature during step-by-step and continuous dry drilling, Department of Design and Manufacturing Engineering, Gebze Institute of Technology, 41400 Gebze-Kocaeli, Turkey. Materials and Design Vol. 27. Pp. 446–454

BEZERRA, A.A., 1998, Influência dos principais parâmetros no processo de alargamento de uma liga de alumínio-silício, Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Uberlândia, MG. Pp.139.

BOEIRA, A.M. G. 2010 Modelagem e simulação das forças na furação com brocas helicoidais a partir de dados obtidos no torneamento de segmentos cilíndricos Tese (doutorado) - Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico. Programa de Pós- Graduação em Engenharia Mecânica, Florianópolis, SC, Pp. 193.

BORDIM, F.M.; 2008. Estudos Sobre a Relação entre o Desgaste e a Força de Avanço na Determinação do Fim de Vida Efetivo de Uma Broca Helicoidal Grupo de Usinagem, Centro de Ciências Exatas e Tecnologia, Universidade de Caxias do Sul, SC.

BORILLE, A.V., 2005, Análise do Alargamento de Ferro Fundido Cinzento GG25 com Ferramentas de Metal Duro. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, Pp153.

BULBA, E. A. 2007, Obtenção de Montagens com Padrão Seis Sigmas se Elevados Custos de Manufatura. In: 8º CONGRESSO IBEROAMERICANO DE ENGENHARIA MECANICA, Cusco, 23 a 25 de Outubro de 2007.

CALZA, D.C.; ZEILMANN R, P.; XAVIER, E.B.; 2005, “Influencia das Condições de Aplicação de Fluido Lubrificante sobre a Qualidade Superficial para o Processo de Furação”, Disponível em: http://www.ucs.br/ucs/tplJovensPesquisadores2006/pesquisa/jovenspesquisadores2006/trabalhos_pdf/exatas/elizangelaballardinxavier.pdf. Acesso em 12 de Janeiro de 2014.

CZAMPAA, M.; MARKOSA, S.; SZALAYA, T., 2013. Improvement of Drilling Possibilities for Machining Powder Metallurgy Materials. Budapest University of Technology and Economics, Department of Manufacturing Science and Engineering, Egry J. Street 1., H-1111 Budapest, Hungary Procedia CIRP 7 Pp. 288-293.

COSTA, E. S. 2004. Furação de aços microligados com aplicação de mínima quantidade de fluido de corte – Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, MG.

CHIAVERINI, V. 1996 “Tecnologia Mecânica”, 2ª edição. São Paulo-SP. McGraw-Hill, Pp.165.

DA SILVA, R.B., 2001, Alargamento Cônico do Ferro Fundido Nodular GGG 40, Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, MG, Pp. 105.

DANGERFIELD, P. 2000, Usinar Bons Furos com Rapidez é Difícil? Não. Isso é Mito. O Mundo da Usinagem - Sandvik Coromant – Sandvik Coromant do Brasil - 3.

De CHIFFRE, L.; TOSELLO, G.; PISKA, M.; MULLER, P., 2009. Investigation on capability of the reaming process using minimal quantity lubrication. CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology 2, Pp. 47–54

De CHIFFRE, L.; BELLUCO, W. 2002 Surface integrity and part accuracy in reaming and tapping stainless steel with new vegetable based cutting oils. Tribology International, Vol. 35 Pp. 865–870

DINIZ, A. E; MARCONDES, F. C., COPPINI, N. L., 2006, Tecnologia da usinagem dos Materiais. 1ª ed. São Paulo: MM Editora, São Paulo – SP – Brasil.

DORÉ, C., 2007, Influencia da Variação da Nodularidade na Usinabilidade do Ferro Fundido Vermicular, Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, SC. Pp.131.

DORMER. Catálogo de Produtos. 2007. Pp.145.

FÁVARO, L.A, 2007. Estudos Sobre a Análise e Pré-otimização do Processo de Furação dos Perfis “U” Utilizados na Montagem de Chassis. Grupo de Usinagem, Centro de Ciências Exatas e Tecnologia, Universidade de Caxias do Sul, SC.

FERRAMENTAS MAPAL, 2013. Disponível em:

<http://www.mapal.com/pt/mapal-no-mundo/mapal-no-mundo/mapal-do-brasil/>

Acesso em: 04 fevereiro, 2014.

FERRARESI, D. 2006. Fundamentos da Usinagem dos Metais. São Paulo: Edgard Blücher, Volume 1, 1970, 12ª reimpressão Pp. 751.

FERREIRA, M.C., 2011. Análise Comparativa Entre Alargamento com Ferramentas de Gume Único Regulável e Mandrilamento em Ferro Fundido Nodular GGG40 Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, SC.

CATALOGO FERRAMENTAS GUHRING, 2013. Disponível em:

< http://www.guhring.com.br/dados/catalog/Guehring_2013-Kat-pt-PT-av_LoRes.pdf

Acesso em: 04 fevereiro, 2014.

HABER-HABER, R^b; HABER^a, R; SCHIMITTDIEL^a, M; RAU[´] L M; DEL TOROA, R, I, M. A. 2007. Classic Solution for the Control of a High-Performance Drilling Process, (a) Institute of Industrial Automation (IAI), Spanish Council for Scientific Research (CSIC), N-III, Km. 22 800 La Poveda, Arganda del, 28500 Madrid, Spain, (b) Universidad de Oriente (UO), Avenidad de las Ame´ricans s/n, 90400 Santiago de Cuba, Cuba

HARRY S, S.G., 2003. A.Study of The Wear Mechanisms of TiAlN and TiAlCrN coated high – speed twist drills under dry machining conditions. Wear, vol. 254. Pp. 723-734.

ISCAR, 2013. Catálogo de Produtos HOLE MAKING TOOLS – Version 2013. Pp. 449.

JULIO, V., 2009, Avaliação da Redução do Uso de Fluido de Corte no Processo de Alargamento de Ferro Fundido Vermicular, Dissertação de Mestrado, Sociedade Educacional de Santa Catarina, Florianópolis, SC. Pp.110.

LIMA JR, S.G., 2009. Avaliação do desempenho de ferramentas de metal duro no alargamento de guias de válvulas automotivas. Dissertação de Mestrado – Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, MG. Pp. 100.

LUGSCHEIDER, E.; KNOTEK, C.; BARIMANI, T.; LEYENDECKER; LEMMER, O. WENKE, R. 1999 .PVD hard coated reamers in lubricant-free cutting Surface and Coatings Technology, Vol. 112, Pp. 146–151.

MACHADO, A.R., ABRAO, A.M., COELHO, R.T., DA SILVA,. M.B., 2011, "Teoria da Usinagem dos Materiais" 2.^a edição, Editora Blucher, São Paulo-SP, Pp. 397.

MACHADO, C.A.M., 2011, Estudo Comparativos de Diferentes Geometrias de Corte em Broca de Metal Duro com Canal Reto em Ferro Fundido Cinzento, Dissertação de Mestrado, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, SP, Pp. 128.

METALS HANDBOOK – VOLUME 16, 1989, Machining, ninth edition, ASM International.

MIRANDA, G. W. A., 2003, Uma Contribuição ao Processo de Furação sem Fluido de Corte com Broca de Metal Duro Revestida com TiAlN. Tese de Doutorado, Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Mecânica, Campinas, Pp.182.

MITSUBICHI MATERIALS – Catálogo de Ferramentas 2013. Disponível em:

http://www.mitsubishicarbide.net/contents/mht/pt/html/product/technical_information/information/drill_terminology_nomenclature.html. Acesso em: Fevereiro 2013

MOCELLIN, F., 2002. Avaliação da usinabilidade do ferro fundido vermicular em ensaios de furação. Dissertação de mestrado em Engenharia Mecânica. Departamento de Engenharia Mecânica Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, SC. Pp. 112.

NOAURI, M., LIST, G., GIROT, F., GEHIN. D, 2005. Effect of machining parameters and coating on wear mechanisms in dry drilling of aluminium alloys, Laboratoire Materiaux Endommagement Fiabilité et Ingénierie des Procédés, Centre d'Enseignement et de Recherche de Bordeaux, Ecole Nationale Supérieure d'Arts et Métiers de Bordeaux, Esplanade des Arts et Métiers, 33405 Talence Cedex, France, International Journal of Machine Tools & Manufacture Vol. 45. Pp. 1436–1442.

NORMA DIN 6537, Solid-hardmetall twist drills with stepped parallel shank; dimensions
Published: 04/01/1993, Pp. 2.

NORMA DIN 8589-2, Manufacturing processes chip removal - Part. 2: Drilling, countersinking and counter boring, reaming; Classification, subdivision, terms and definitions; Published: 09/01/2003, Pp. 12.

NOVASKI, O., 1996. Contribuições ao Processo de Furação com Brocas Helicoidais. Tese de Livre Docência, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, SP. Pp.153.

NOVASKI, O. 1989. Determinação das condições econômicas de usinagem através de parâmetros obtidos na empresa. Tese de Doutorado. Faculdade de Engenharia Mecânica da Universidade Estadual de Campinas, Campinas. SP. Pp 103.

OLIVEIRA, V. V. 2008. Influência da Geometria de Brocas na Furação do Ferro Fundido Vermicular. Dissertação Mestrado em Engenharia - Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica e de Materiais, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba. Pp173.

PANGRÁCIO, M. L., 2003, “Análise da Qualidade de Furos Realizados por Fresamento Helicoidal Interpolado”, Dissertação de Mestrado do Programa de Pós-Graduação em Eng. Mecânica, Universidade Federal de Paraná - UFPR, Curitiba. Pp.103.

RAMOS, D. S., 2008, Estudo de Aspectos Cinéticos da Transformação Bainítica Incompleta em Ferros Fundidos Nodulares Austemperados. Dissertação de Mestrado, Instituto Superior Tupy, Joinville, SC. Pp.89.

REDDY, N.S. K and YANG, M. Development of an electro static lubrication system for drilling of SCM 440 steel. School of Mechanical Engineering, Korea Advanced Institute of Science and Technology, Daejeon, Republic of Korea. DOI: 10.1243/09544054JEM1670

ROSA, V. A. O. 2012. Investigação da Operação de Alargamento dos Furos Usinados em Pistões de Ferro-Carbono Sinterizado. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia. MG. Pp122.

SANDVIK, 2012. Disponível em: http://www.sandvik.coromant.com/pt-pt/technical_guide/boring/troubleshooting/reaming/pages/default.aspx.

Acesso em: 06 março. 2013.

SANTOS, S.C.; MACHADO, A.R. e DINIZ, A.E., Maio 2000, “Brocas de metal duro integral na furação do ferro fundido cinzento”, Máquinas e Metais, Aranda Editora, Ano XXXVI, n. 412, Pp. 102-115.

SHUNMUGAM, M.S. & SOMASUNDARAM, G., 1990, “Investigation into reaming processes using a frequency decomposition technique”, International Journal Prod. Res., Vol. 28, n. 11, Pp. 2065-2074.

SKF (1987). Manual Técnico SKF, SKF Ferramentas S.A., São Paulo.

SCHROETER, R.B, 1989. Alargamento de Precisão em Alumínio Aeronáutico com Ferramentas de Gume Único Regulável. Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina. SC. Pp113.

STEMMER, C.E., 2005, Ferramentas de Corte II: brocas, alargadores, ferramentas de roscar, fresas, brochas, rebolos, abrasivos, 2ª edição, Editora da UFSC, Florianópolis-SC, Pp. 33-43.

STOETERAU, R. L.2004 Processos de Usinagem, (Fabricação Por Remoção De Material), Revisão: 2004/1, Florianópolis: Editora da UFSC, Pp.180.

STOETERAU, R. L. 2013. 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: Março 2013.

TÖNSHOFF, H. K.; SPINTIG, W.; KÖNIG, W. & NEISES, A., 1994, “Machining of holes development in drilling technology”, Annals of the CIRP, vol. 43/2, Pp. 551-561.

TRENT, E.M., 1991, “Metal Cutting”, 3rd Edition, Butterworths-Heinemann Ltd, Pp 273, ISBN0-7506-1068-9.

WANG, J. ZHANG, Q., 2008. A study of high-performance plane rake faced twist drills. Part I: Geometrical analysis and experimental investigation, School of Mechanical and Manufacturing Engineering, The University of New South Wales, Sydney, NSW 2052, Australia, International Journal of Machine Tools & Manufacture, Vol. 48. Pp. 1276– 1285

XIA, R.S., MAHDAVIAN, S.M, 2004. Experimental studies of step drills and establishment of empirical equations for the drilling process, Australia, International Journal of Machine Tools & Manufacture. Vol.45 Pp. 235–240

YAMADA, Y. 2010. Melhoria da produtividade na obtenção de ligas de alumínio aeronáutico com ferramentas de aço rápido. Dissertação de Mestrado – Universidade Estadual de Campinas, Campinas, SP. Pp.122.