

ESTE EXEMPLAR CORRESPONDE A REDAÇÃO FINAL DA
TESE DEFENDIDA POR Carlos Antonio
Meyer Machado..... E APROVADA
PELA COMISSÃO JULGADORA EM 17/06/11.....

O. Novak
.....
ORIENTADOR

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA
COMISSÃO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

Carlos Antonio Meyer Machado

**Estudo Comparativo de Diferentes
Geometrias de Corte em Broca de Metal
Duro com Canal Reto em Ferro Fundido
Cinzento**

Campinas, 2011

Carlos Antonio Meyer Machado

Estudo Comparativo de Diferentes Geometrias de Corte em Broca de Metal Duro com Canal Reto em Ferro Fundido Cinzento

Dissertação de mestrado profissional apresentada à comissão de Pós Graduação da Faculdade de Engenharia Mecânica, como requisito para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Automobilística.

Área de Concentração: Manufatura

Orientador: Olívio Novaski

Campinas

2011

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA
BIBLIOTECA DA ÁREA DE ENGENHARIA E ARQUITETURA - BAE - UNICAMP

M18e Machado, Carlos Antonio Meyer
Estudo comparativo de diferentes geometrias de corte em broca de metal duro com canal reto em ferro fundido cinzento / Carlos Antonio Meyer Machado. -- Campinas, SP: [s.n.], 2011.

Orientador: Olivio Novaski.

Dissertação de Mestrado (Profissional) -
Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Mecânica.

1. Brocas (Ferramentas). 2. Ferro fundido. 3. Usinagem. 4. Processos. I. Novaski, Olivio. II. Universidade Estadual de Campinas. Faculdade de Engenharia Mecânica. III. Título.

Título em Inglês: Comparative study of different geometries cut with carbide drill straight flute in grey cast iron

Palavras-chave em Inglês: Drills (Tools), Cast iron, Machining, Processes

Área de concentração: Manufatura

Titulação: Mestre em Engenharia Automobilística

Banca examinadora: Amauri Hassui, João Roberto Ferreira

Data da defesa: 17-06-2011

Programa de Pós Graduação: Engenharia Mecânica

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA
COMISSÃO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO PROFISSIONAL

**Estudo Comparativo de Diferentes
Geometrias de Corte em Broca de Metal Duro
com Canal Reto em Ferro Fundido Cinzento**

Autor: Carlos Antonio Meyer Machado

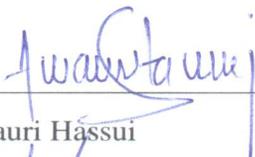
Orientador: Olivio Novaski

A Banca Examinadora composta pelos membros abaixo aprovou esta Dissertação:



Prof. Dr. Olivio Novaski, Presidente

UNICAMP



Prof. Dr. Amauri Hassui

UNICAMP



Prof. Dr. João Roberto Ferreira

UNIFEI

Campinas, 17 de junho de 2011.

Agradecimentos

A MWM que me proporcionou este curso e a todos os colegas que ajudaram de forma direta e indireta na conclusão deste trabalho dando condições de desenvolver e concluir este trabalho junto com minhas atividades na empresa, às quais presto minha homenagem.

Ao meu orientador, Olívio Novaski que me encaminhou para as melhores alternativas no desenvolvimento deste trabalho.

Aos professores e colegas de curso que reforçaram os ensinamentos.

Ao grupo de colegas de viagem, com quem compartilhamos esta caminhada universitária, formada ao longo de inúmeras viagens.

A vida está cheia de desafios que, se encarados de forma criativa, transformam-se em oportunidades.

Resumo

O objetivo deste trabalho é comparar o desempenho de duas diferentes geometrias de brocas de metal duro sem cobertura, com canal reto e refrigeração interna, na furação de ferro fundido cinzento. As geometrias avaliadas nos experimentos foram a geometria de ponta normalizada (*normal*) e uma geometria desenvolvida chamada de geometria de ponta *esférica*. A avaliação do desempenho foi feita com testes de vida realizados na linha de produção de blocos de motores, em que, além da vida, foram monitoradas a circularidade, a cilindridade e o diâmetro dos furos. Os testes foram divididos em três partes, em que foi possível verificar a evolução do desgaste da aresta de corte da broca, da circularidade, da cilindridade e dos diâmetros dos furos. Inicialmente foi utilizado como critério de fim de vida o tempo do processo original e posteriormente outro critério utilizado foi o desgaste da aresta principal. Os resultados obtidos permitiram concluir que a geometria de corte com melhor desempenho foi a geometria proposta, denominada *esférica*, que mostrou uma redução no custo na produção das peças estudadas, sendo possível esta implementação no processo de furação em ferro fundido cinzento em escala industrial. Na seqüência, utilizando a broca de geometria de ponta *esférica* foram feitos os mesmos monitoramentos para duas velocidades de corte maiores, sendo que os custos ficaram acima do resultado encontrado com os parâmetros de corte do processo original.

Palavras-chaves: Broca de metal duro com canal reto, ferro fundido cinzento, desgaste da aresta de corte.

Abstract

The aim of this study is to compare the performance of two different geometries of uncoated carbide drills, with straight flute and internal cooling, in drilling of gray cast iron. The geometries evaluated in the experiments were the standard tip geometry and a developed geometry called spherical tip geometry. The performance evaluation was done with life tests performed an engine blocks production line, for which, beyond tool life, measures were made for circularity, cylindricity and diameter of the holes. The tests were divided on three parts, where it was possible to check the wearing progress of the cutting edge of the drill, the circularity, cylindricity and diameter of the holes. Initially the original process time was used as end of life criteria and after the criterion of main edge wearing was used. The results showed that the cutting geometry with better performance was the one proposed, called spherical, which produced a reduction in the cost of manufactured parts, making possible the implementation of this process of drilling cast iron on an industrial scale. Subsequently, using the spherical tip drill geometry the same measures were made at two higher cutting speeds, and these last costs were higher than results found with the cutting parameters of the original process.

Keywords: Carbide drill straight flute, grey cast iron, wear of the cutting edge.

SUMÁRIO

Dedicatória	iii
Agradecimentos	iv
Resumo	vi
Abstract	vii
SUMÁRIO	viii
1 INTRODUÇÃO	1
1.1 Objetivo	3
1.2 Estrutura do trabalho	4
2 REVISÃO DA LITERATURA	5
2.1 Ferro fundido	5
2.1.1 Generalidades	5
2.1.2 Usinabilidade do ferro fundido cinzento	6
2.2 O processo de furação	11
2.2.1 Generalidades	11
2.2.2 Tipos de brocas e sua utilização	15
2.2.3 Geometria de brocas helicoidais	19
2.2.4 Tipos de afiação de broca	34
2.2.5 Parâmetros de corte no processo de furação	38
2.2.6 Desgaste da ferramenta	41
2.2.7 Materiais para brocas	46
2.2.8 Mecanismos causadores do desgaste das ferramentas	48
2.2.9 Características da broca de canal reto	52
2.2.10 Desvios de fabricação na furação	53
2.2.11 Furação em ferro fundido	57
2.2.12 Forças na furação	61
2.2.13 Critério de fim de vida da ferramenta	66
2.2.14 Considerações sobre condições econômicas de corte	69
2.2.15 Determinação e otimização dos parâmetros de corte	74

3 PROCEDIMENTOS EXPERIMENTAIS	77
3.1 Corpo de prova / bloco do motor	78
3.2 Máquina-ferramenta	80
3.3 Ferramentas de corte	81
3.4 Medição e avaliação do desgaste da broca	86
3.5 Fluido de corte e controle	86
3.6 Coleta de dados e análise	88
3.7 Condições operacionais dos ensaios	91
4 RESULTADOS E DISCUSSÕES	93
4.1 Primeiro experimento	95
4.2 Segundo experimento	104
4.3 Terceiro experimento	108
4.4 Considerações sobre os resultados	113
5 CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA FUTUROS TRABALHOS	115
5.1 Conclusões	115
5.2 Sugestões para futuros trabalhos	117
Referências	119
APÊNDICE A – Planilha de Resultados 1° e 2° experimento broca <i>esférica</i>	125
APÊNDICE B – Planilha de Resultados 1° experimento broca <i>normal</i>	126
APÊNDICE C – Planilha de Resultados 3° experimento com $v_c > 10\%$	127
APÊNDICE D – Planilha de Resultados 3° experimento com $v_c > 20\%$	127
APÊNDICE E – Desenho da broca Normal	128
APÊNDICE F – Desenho da broca Esférica	128

1 INTRODUÇÃO

As empresas buscam incessantemente melhorar seu produto e produzi-lo com economia e qualidade. A própria história nos remete a uma diversidade de exemplos em que as empresas tiveram que se preocupar com fatores que melhorassem sua eficiência e reduzissem seus desperdícios, a fim de manter sua competitividade.

A consequência desta situação é que a procura e a oferta por produtos e serviços com melhor preço e qualidade estabeleceram um novo critério de exigências. Essa competição traz a necessidade, por parte das empresas, de reduzir seus custos dentro do possível, mantendo a expectativa de reforçar a qualidade do produto de forma atraente para o consumidor. A empresa que alcançar os requisitos necessários para competir e estiver alerta diante do mercado, terá condições de se manter ativa. A indústria trabalha, neste sentido, quando realiza a manufatura de um item de forma a atender ao critério econômico para reduzir os custos.

A determinação de condições econômicas de usinagem é fundamental na otimização de processos de fabricação com remoção de cavaco e constitui uma ferramenta essencial para fazer frente às condições de mercados cada vez mais competitivos. Qualquer aprimoramento no sentido de aumentar a produção de um processo de usinagem representa um ganho significativo (AMORIM, 2002).

O tema central deste trabalho, paralelamente engajado nesta preocupação, está em otimizar os meios produtivos, sem comprometer a qualidade do produto. A análise das informações e os dados coletados deverão indicar a possibilidade de redução do consumo de bens e recursos para uma mesma produção ou produzir mais com os mesmos recursos.

O uso otimizado de máquinas e ferramentas exerce um foco importante nos custos industriais para empresa, porque se a utilização do equipamento (máquina e ferramenta) não tiver seu uso otimizado, resultará em custos mais elevados para a produção e, nesta cadeia, novos recursos serão exigidos, com investimentos na produção de bens que poderiam ser utilizados adequadamente em novas oportunidades.

Isto demonstra a importância das ferramentas no que diz respeito ao seu reflexo sobre os custos totais de produção. Otimizar a sua utilização, explorando ao máximo sua vida, não é apenas questão de racionalidade, mas principalmente de competitividade e sobrevivência.

Para adequar-se às novas exigências comentadas, as ferramentas empregadas no processo de usinagem devem apresentar como característica essencial a durabilidade dentro de critérios estabelecidos. O aumento da vida da mesma implicará em menos gastos com atividades secundárias, paralelas ao processo de usinagem, não agregadoras diretas de valor ao produto obtido. Como exemplo: maior número de paradas para a troca de ferramenta, maior tempo de afiação, transporte (logística), etc. Analisando esta situação, avaliar-se-á a possibilidade de uma utilização mais racional das ferramentas necessárias para a usinagem e a otimização dos processos de fabricação, através da melhoria da geometria das ferramentas e através da adequação dos parâmetros de corte. Somente assim a produtividade real aumentará e as reduções de custo serão possíveis.

Entre outros fatores, com a redução dos níveis de desgaste de ferramentas, haverá uma racionalização em itens, tais como: maior vida da ferramenta (maior rendimento e utilização dos recursos), melhor utilização da máquina reduzindo tempos operacionais, menores tempos de afiação e trocas de ferramenta na máquina.

Na usinagem o processo de furação é um dos mais utilizados na indústria manufatureira (DINIZ et al., 2006). Responsável por cerca de 30% de todas as operações de usinagem. Estima-se que 60% de todas as aplicações de furação na indústria mecânica referem-se a furos curtos, com uma profundidade de até 2,5 vezes o diâmetro da ferramenta (CASTILLO, 2005). No entanto, um grande número de operações na indústria exige profundidades de furo maiores que 5 vezes o diâmetro, denominada de furação profunda (NOVASKI, 1996). A furação profunda é um processo que possui um grau de complexidade maior do que a furação convencional, normalmente requer o emprego de ferramentas e equipamentos especiais devido às condições críticas de usinagem em que se realiza. Tais condições envolvem principalmente a dificuldade da formação e o escoamento do cavaco.

Vale destacar a importância de se estudar esta operação já que a furação é responsável por 34% do tempo consumido em usinagem pela indústria automobilística mundial, sendo inclusive um pouco superior ao processo de torneamento, que fica na ordem de 26% enquanto que o fresamento fica com 40% (CAPUANO, 2004; BARBOSA, MIRANDA, 2005).

A furação é o processo de usinagem mais comum. Uma estimativa é que 75% de todo material removido na usinagem vem do processo de furação (EFUNDA 2010; CASTILLO, 2005; CASTRO, 2005 apud MATTES, 2009).

Dos três processos de usinagem mais usuais (fresamento, torneamento e furação), este último é menos estudado, mesmo com o desenvolvimento de novos tipos e geometrias de brocas, bem como de materiais pelos fabricantes das mesmas (BARBOSA, MIRANDA, 2005).

No processo de usinagem do bloco do motor, a furação é uma das operações com maior tempo efetivo de corte, o que influencia diretamente nos custos do processo (PAIVA JUNIOR et al., 2009).

A geometria de afiação mais empregada na produção é a cônica normalizada que, devido ao extenso uso na indústria metal mecânica também é conhecida como geometria convencional devido a grande adequação da mesma em muitas aplicações de furação e a maior simplicidade de obtenção de sua geometria (CORRÊA, 1996). Neste trabalho, a broca de geometria de ponta cônica normalizada ou convencional será denominada broca *normal*.

1.1 Objetivo

Reforçada a preocupação acima, fundamentada na redução de custos, foi realizado este trabalho, com o objetivo de comparar o desempenho entre duas diferentes geometrias de corte de brocas de metal duro com canais retos com refrigeração interna sem cobertura para furação em ferro fundido cinzento. As brocas com ponta de afiação, aqui denominada de *esférica*, foram desenvolvidas nesta pesquisa.

Para o alcance do objetivo proposto foram realizadas três séries de experimentos, da seguinte maneira:

-na primeira série foram testadas brocas *normais* e brocas *esféricas* com os dados de corte e com o critério de fim de vida de 185 minutos de corte efetivo utilizados no processo original;

-na segunda série, com as brocas *esféricas* foram testadas com os mesmos dados de corte originais e com o critério de fim de vida o desgaste da aresta principal de corte $VB=0,3\text{mm}$;

-na terceira série foram utilizadas velocidades de corte 10 e 20% maiores em relação à velocidade de corte original e com o critério de fim de vida o desgaste $VB=0,3\text{mm}$.

1.2 Estrutura do trabalho

A Introdução aborda de maneira sucinta o conteúdo da dissertação e suas propostas.

A Revisão da Literatura apresenta o ferro fundido com suas características e usinabilidade, o processo de furação com brocas helicoidais e de canal reto, nomenclaturas utilizadas, avaliação do desgaste da ferramenta, características geométricas, algumas variantes no processo de furação no ferro fundido e algumas considerações sobre determinação de corte econômico para a otimização deste processo de usinagem relevantes para compreensão do estudo realizado.

Os Procedimentos Experimentais apresentam os equipamentos, as ferramentas adotadas e os métodos e critérios adotados nos experimentos para a realização dos ensaios.

Os Resultados e Discussões apresentam os valores e resultados obtidos nos ensaios e considerações sobre os mesmos e as discussões envolvem uma análise de todos os resultados considerados relevantes ou expressivos.

As Conclusões, baseadas nas discussões e resultados, apresentam as considerações finais sobre esta dissertação e as Sugestões para Próximos Trabalhos apresentam temas para continuidade de estudos baseados neste trabalho. Em seguida, citam-se as referências bibliográficas.

Nos Apêndices estão algumas tabelas e informações relevantes para o trabalho.

2 REVISÃO DA LITERATURA

2.1 Ferro fundido

Os ferros fundidos são materiais amplamente empregados na produção de peças automotivas, tais como: blocos e cabeçotes de motores de combustão interna, discos de freio, escapamentos, virabrequins, entre outros. Os blocos de motores de combustão interna ilustram a complexidade e os detalhes que podem ser obtidos com o processo de fundição que se caracteriza como o caminho mais econômico para fabricação de peças com geometria complexa. No entanto, de modo geral, as tolerâncias de fabricação especificadas nos projetos não são possíveis de serem obtidas diretamente do processo de fundição. Dessa forma, outro processo de fabricação denominado usinagem é empregado para melhorar o acabamento e a precisão das peças fundidas.

A estrutura dos ferros fundidos, em resumo, apresenta os seguintes constituintes que estão normalmente presentes nos aços - ferrita, perlita e cemetita – com maior ou menor quantidade de carbono ou grafita livre, na forma de veios ou lamelas, dependendo da composição química e das condições de resfriamento (CHIAVERINI, 2005).

2.1.1 Generalidades

A indústria automobilística, especialmente quando voltada à produção de bloco de motores, tem usado com mais intensidade as ligas de ferro fundido cinzento e mais recentemente do tipo vermicular. A resistência mecânica do vermicular aumenta a eficiência dos motores, com a redução no tamanho e a eficiência térmica durante a combustão, por permitir maiores taxas de compressão. A exigência para o material utilizado nessa aplicação é que tenha elevada resistência

mecânica, ductilidade, condutividade térmica e capacidade para amortecer vibrações (MOCELLIN, 2002).

A alta resistência mecânica do vermicular ainda desfavorece a usinabilidade. Ainda há uma grande demanda por pesquisas que vêm sendo feitas em empresas automobilísticas e fundições, principalmente em ferramental e processo (MOCELLIN, 2002).

O ferro fundido cinzento é uma liga Ferro, Carbono e Silício de fácil fusão e moldagem, excelente usinabilidade, resistência mecânica satisfatória, boa resistência ao desgaste, boa capacidade de amortecimento de vibrações e, dentre os ferros fundidos, a mais usada (CHIAVERINI, 1986).

Os blocos em ferro fundido cinzento possuem o menor custo de fabricação, mas resultam em motores mais pesados do que os que utilizam o ferro fundido vermicular.

2.1.2 Usinabilidade do ferro fundido cinzento

A usinabilidade refere-se à facilidade com a qual a peça pode ser usinada e medida em termos de vida útil da ferramenta, velocidade de remoção de cavaco, acabamento superficial, facilidade de formação de cavaco, ou forças de corte. Não é uma propriedade intrínseca do material, mas resulta de uma complexa interação entre as propriedades mecânicas do material da peça, ferramentas de corte e condições de usinagem (KENNAMETAL, 2003 apud FERRER, 2006).

Entre todos os ferros fundidos, o ferro fundido cinzento é o material que apresenta a melhor usinabilidade devido à presença da grafita lamelar e das inclusões de sulfeto de manganês na matriz do material.

O comportamento frágil do ferro fundido cinzento deixa o contato do material com a superfície principal de folga e a superfície de saída da ferramenta de corte intermitente. Dessa forma, há intervalos de tempo em que não ocorre o contato abrasivo sobre a ferramenta (PAIVA JUNIOR, 2009).

As propriedades dos ferros fundidos cinzentos dependem dos seguintes fatores:

- **microestrutura** (quantidade, forma e distribuição da grafita, quantidade de ferrita e perlita, influenciada pela introdução de elementos de liga e ou aplicação de tratamentos térmicos);
- **composição química** (elementos básicos que influem nas propriedades mecânicas são o C (carbono), Si (silício) e em menor extensão o P (fósforo));
- **secção do material** (efeito da velocidade de resfriamento devido a massa de material).

Dos três elementos C, Si e P, o silício é o mais importante, pois ele é o principal responsável pela formação de grafita. O silício melhora ainda a resistência à corrosão e a oxidação a temperaturas elevadas do material. A presença de grafita ou carbono livre em forma de lamelas facilita a formação do cavaco, devido ao efeito lubrificante desta. Apesar disso, existem situações onde essa relativa boa usinabilidade varia consideravelmente de um lote de fundição para outro. Esta variação é usualmente medida pelas diferenças na vida da ferramenta, potência de corte requerida e acabamento superficial. Muitas vezes, essas diferenças na usinabilidade ocorrem sem mudanças óbvias na microestrutura do material. Isso faz com que seja indispensável tomar cuidados especiais no processo de fundição, para evitar a formação de carbonetos.

A dureza não é um indicador de usinabilidade tão eficiente para o ferro fundido (como ocorre com os aços). Nesse caso, a microestrutura exerce papel mais preponderante (AFS, 2003 apud CASTILLO, 2005).

O tom escuro característico de sua fratura é a razão da denominação pela qual é conhecido entre os diversos tipos de ferro fundido. Sua microestrutura apresenta a grafita na forma lamelar interconectada, razão para a boa condutividade térmica. Por outro lado, certos parâmetros de resistência mecânica, como ductilidade e tenacidade, são afetados pela presença de descontinuidades na matriz, que conferem a este material um comportamento frágil, quando submetido ao carregamento dinâmico imposto por altas taxas de deformação (COLPAERT, 1974).

No sistema ABNT (Associação Brasileira de Normas Técnicas) os ferros fundidos cinzentos são designados por FC e por algarismos indicativos dos limites máximos de resistência à tração. A Tabela 2.1 mostra a classificação dos ferros fundidos cinzentos, segundo a norma da ABNT, quanto ao seu limite de resistência.

Quanto menor o carbono equivalente, maior a classe do material e menor a quantidade e o tamanho das grafitas. Para a definição das propriedades mecânicas, é importante o conhecimento da espessura da peça, da microestrutura da grafita, bem como da composição química. O

tratamento térmico e o recozimento, no ferro fundido cinzento, têm por objetivo melhorar suas propriedades aliviando tensões, o que por sua vez melhora a usinabilidade.

Tabela 2.1 - Propriedades mecânicas dos ferros fundidos cinzentos segundo ABNT (CHIAVERINI, 2005).

Classe	Limite de resistência à tração (min.) kgf/mm ²	Dureza Brinell (valores máximos)	Resistência a flexão estática (valores médios) kgf/mm ²
FC10	10	201	-
FC15	23	241	34
	18	223	32
	15	212	30
	11	201	27
FC20	28	269	41
	23	248	39
	20	241	36
	16	229	33
FC25	33	269	-
	28	248	46
	25	241	42
	21	229	39
FC30	33	269	-
	30	262	48
	26	248	45
FC35	38	-	-
	35	277	54
	31	269	51
FC40	40	-	60
	36	-	57

A seguir, é apresentada a influência de vários constituintes da matriz do ferro fundido sobre a vida da ferramenta (AFS, 2003 apud CASTILLO, 2005):

a) Ferrita: é um constituinte essencialmente livre de carbono. Com exceção da grafita, apresenta dureza mais baixa, se comparada com os demais constituintes e baixa resistência a tração, mas excelente resistência ao choque e elevado alongamento. Se a ferrita for predominante na matriz metálica do ferro fundido cinzento, a usinabilidade do material é melhor.

b) Perlita: é o mais comum constituinte nos ferros fundidos. Apresenta resistência e dureza média. É composta de uma estrutura fina, alternada de ferrita mole e carbonetos duros. Essa estrutura pode variar entre fina e grossa. A estrutura fina é mais dura e é usinada a menores velocidades de corte. A perlita no ferro fornece a melhor combinação entre usinabilidade e resistência ao desgaste. Se a perlita for o constituinte predominante na matriz metálica, os ferros fundidos cinzentos apresentarão melhor resistência mecânica.

c) Martensita: é o constituinte de maior dureza. É formada mediante tratamentos térmicos nos ferros fundidos. Na condição dura não-revenida, a martensita é de difícil usinagem, porém, quando tratada posteriormente com um revenimento, dá origem a uma estrutura contendo carbonetos esferoidais em uma matriz ferrítica, o que reduz a dureza e garante uma usinabilidade até mesmo melhor que a da perlita de mesma dureza.

d) Bainita: a estrutura bainítica é obtida após o tratamento térmico de têmpera. Devido à maior dificuldade de ser usinada, geralmente são usadas velocidades menores que as usadas para a usinagem da martensita revenida de mesma dureza.

e) Austenita: é o principal constituinte dos ferros fundidos cinzentos com elevados teores de níquel e dos ferros dúcteis não-magnéticos. A austenita é um componente considerado como de dureza relativamente baixa e de usinabilidade similar à da ferrita. Porém, existem alguns tipos de ferros austeníticos com suficiente conteúdo de cromo para produzir carbonetos na sua microestrutura. A presença de carbonetos aumenta a dureza e diminui a usinabilidade em uma proporção maior.

f) Carbonetos: são constituintes extremamente duros, variando desde simples carbonetos de ferro até complexos carbonetos contendo elementos de liga. A presença de carbonetos em forma de finas camadas na estrutura perlítica, devido à facilidade de cisalhamento, não representa prejuízo para a vida da ferramenta. Maiores quantidades de carbonetos no ferro fundido, como constituintes livres, causam diminuição da usinabilidade. Uma concentração de 5% de carbonetos livres pode significar uma diminuição significativa na vida da ferramenta. Os carbonetos podem estar presentes nas extremidades das peças fundidas devido ao rápido resfriamento dessas regiões.

g) Esteadita: é um constituinte duro, formado pela presença de fósforo no ferro fundido. Com um conteúdo de fósforo inferior a 0,2%, não exerce um efeito significativo na vida da ferramenta. Para concentrações da ordem de 0,4%, a usinabilidade é comprometida em operações críticas tais como rosqueamento. Maiores quantidades de fósforo reduzem significativamente a vida da ferramenta.

h) Estrutura mista na matriz: formada por dois ou mais constituintes, provoca efeito intermediário na vida da ferramenta, comparado ao efeito devido a cada um dos componentes isolados. No entanto, o efeito combinado não é proporcional à quantidade relativa de cada constituinte.

Os ferros fundidos cinzentos podem ser tratados termicamente com o objetivo de melhorar suas propriedades. O comportamento desses materiais quando submetidos a tais processos é, de um modo geral, idêntico ao que ocorre com os aços, dos quais se distingue pela presença de carbono livre. Os ferros fundidos cinzentos são submetidos usualmente ao tratamento térmico, sendo o mais utilizado o “alívio de tensões” ou “envelhecimento artificial”, para eliminar as tensões internas devidas às diferenças nas velocidades de resfriamento nas diversas seções, durante a solidificação. Isso ocasiona contrações não uniformes com conseqüente aparecimento de variações não uniforme de volumes (CHIAVERINI, 2005; CHIAVERINI, 1986).

Na Figura 2.1 é mostrada a microestrutura do ferro fundido cinzento com detalhes na distribuição da perlita e da grafita.

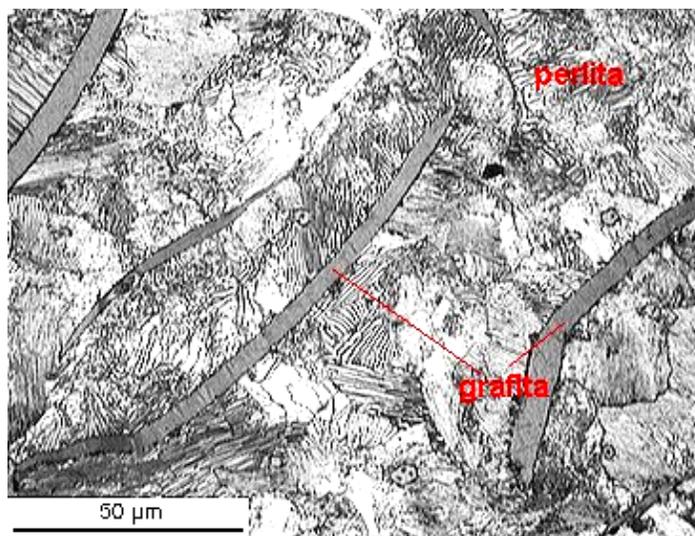


Figura 2.1 - Microestrutura do ferro fundido cinzento (COLPAERT, 1974).

Na usinagem do ferro fundido o cavaco é arrancado em formato de lascas ou pedaços, característica comum em materiais frágeis ou de estrutura heterogênea. O cisalhamento se dá em relação à grafita, que possui a menor resistência mecânica e pela descontinuidade na matriz. Logo a formação de cavacos nos ferros fundidos é diretamente afetada pelas características da grafita e pelo mecanismo de propagação de trincas no material (OLIVEIRA, 2008).

2.2 O processo de furação

2.2.1 Generalidades

A norma alemã (Deutsche Industrie Normen) DIN 8589 define a furação como um processo com movimento rotativo principal, isto é, um processo de usinagem que apresenta movimento de corte circular, no qual a ferramenta pode apresentar apenas um movimento de avanço no sentido de seu eixo de rotação, que mantém sua posição em relação à ferramenta e à peça (CASTILLO, 2005; MATTES, 2009).

A furação com brocas está incluída no grupo de processos de fabricação por usinagem com aresta de corte de geometria definida, sendo um dos processos mais utilizados. Junto com o torneamento, é uma das operações mais importantes, envolvendo aproximadamente 30% de todas as operações de usinagem de metal (TÖNSHOFFT, 1994 apud CASTILLO 2005).

O processo de furação trabalha com condições elevadas de temperatura e pressão. Na furação, existe ainda a dificuldade de acesso do fluido de corte na ponta da broca, o que faz com que a temperatura na região de corte seja ainda mais elevada, ocasionando imprecisão dimensional e irregularidades na forma geométrica dos furos usinados. Além disso, ocorre uma concentração maior de calor nas arestas da ponta de corte da broca, consequência de uma maior velocidade de corte em relação às demais áreas da aresta de corte, acelerando o processo de desgaste e, conseqüentemente, prejudicando o acabamento superficial dos furos usinados (MARMENTINI, 2009).

Segundo Ferraresi, a furação é um processo mecânico de usinagem destinado a obtenção de um furo geralmente cilíndrico numa peça, com auxílio de uma ferramenta geralmente

multicortante. Para tanto, a ferramenta ou a peça se deslocam segundo uma trajetória retilínea, coincidente ou paralela ao eixo principal da máquina (FERRARESI, 1977).

Segundo Novaski, a furação é um processo de usinagem coaxial ao eixo de rotação do movimento de corte, utilizado para obtenção de superfície cilíndrica circular interna. A rotação pode ser tanto da peça quanto da ferramenta, simultaneamente ao deslocamento de uma delas segundo uma trajetória retilínea ou paralela ao eixo de rotação da máquina (NOVASKI, 1996).

As variações mais usuais do processo estão resumidas na Figura 2.2 indicando as direções de movimento usuais.

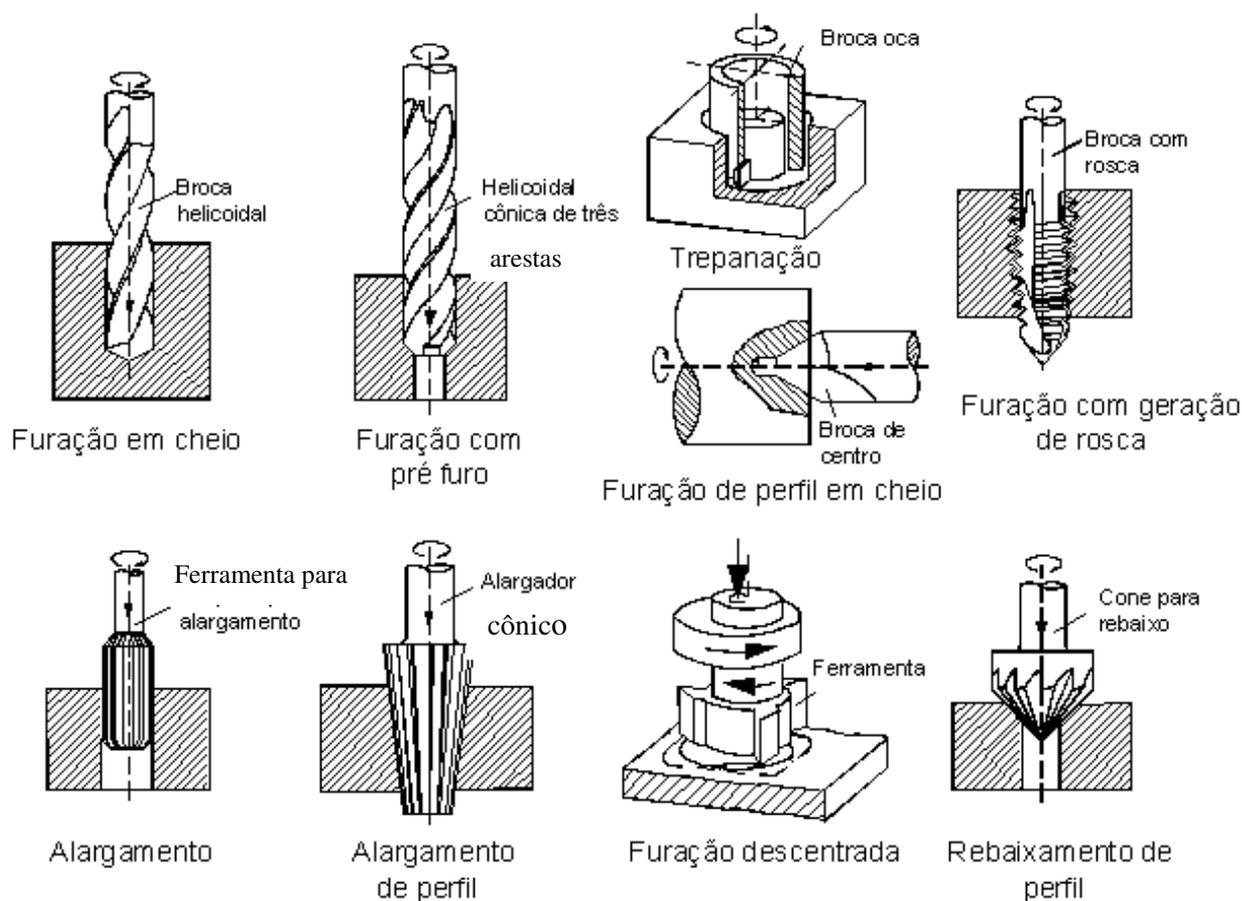


Figura 2.2 - Variantes do processo de furação segundo DIN 8589 (KÖNIG, 1997 apud CASTILLO, 2005).

O processo de furação possui algumas características particulares, listadas abaixo (SCHROETER E WEINGAERTNER, 2002; STEMMER II, 2005; CASTILLO, 2005):

- a) A velocidade de corte é nula no centro da broca, chegando ao seu valor máximo nas periferias da ferramenta;
- b) Apresenta dificuldade no transporte dos cavacos para fora do furo;
- c) Distribuição inadequada de calor na região do corte;
- d) Quando apresenta canto vivo, a ponta de corte da broca está sujeita a desgastes excessivos;
- e) As guias da ferramenta se atritam com a parede do furo durante o processo;
- f) O processo de geração de cavaco é de difícil observação;
- g) O fluido de corte, que deve atuar como refrigerante, lubrificante e meio de transporte de cavacos, chega com dificuldade à aresta de corte da ferramenta, onde é mais necessário.

Desde então, a ferramenta foi desenvolvida e melhorada, embora, com poucos avanços quando comparada com outros tipos de ferramentas voltadas para outros processos, tais como torneamento e fresamento com a introdução de novos materiais para ferramentas, como o metal duro, cerâmica, nitreto cúbico de boro e diamante.

Baseado no fato de que a furação é a operação de usinagem mais comum e que a maior parte dos diâmetros dos furos por ela obtidos situam-se entre 10 e 20 mm, pode-se afirmar que trata-se de um processo de grande importância no campo da usinagem, principalmente quando se considera a utilização crescente de Centros de Usinagem, levando ao desenvolvimento dos materiais empregados nas brocas (DINIZ et al., 2006).

O desenvolvimento de máquinas mais estáveis e o decréscimo do uso de brocas de aço rápido têm colaborado com o desenvolvimento de brocas inteiriças de metal duro, incluindo novas classes, tanto no sentido do substrato de metal duro, como na sua microestrutura (grãos finos e extrafinos), além do desenvolvimento de novos revestimentos (SANTOS 1999).

A vida da ferramenta pode ser limitada com base em diversos fatores: qualidade da peça usinada, aumento da força de corte, da potência consumida, do torque, da força de avanço, ruídos considerados anormais, vibrações excessivas da máquina, da peça ou da própria ferramenta, comprimento do desgaste na aresta principal de corte na superfície principal de folga, profundidade da cratera na superfície de saída da ferramenta, formação de rebarbas, aumento da temperatura da aresta de corte (KÖNIG, 1997 apud CASTILLO, 2005) e (DINIZ et al., 2006). Ou

- Movimento de avanço: movimento entre a peça e a aresta de corte que, juntamente com o movimento de corte, origina um levantamento repetido do cavaco, durante várias revoluções. A velocidade de avanço (v_f) é a velocidade instantânea do movimento de avanço, no ponto de corte escolhido;
- Movimento efetivo de corte: movimento resultante dos movimentos de corte e de avanço, realizados ao mesmo tempo. A velocidade efetiva de corte (v_e) é a velocidade instantânea do movimento efetivo, no ponto de corte escolhido.

2.2.2 Tipos de brocas e sua utilização

Em função das características da furação (diâmetro do furo, profundidade, tolerâncias de forma, medidas e volume de produção), podem ser empregados diferentes tipos de brocas, como mostra a Figura 2.4.

a) **Brocas chatas:** são as ferramentas para furar mais antigas, obtidas por achatamento a quente de uma parte de uma barra cilíndrica ou por encaixe de uma lâmina com duas arestas principais de corte. Ainda hoje, elas podem ser encontradas sendo utilizadas em tornos revólver ou tornos automáticos na furação de materiais frágeis, como ferro fundido, bronze e latão. Por outro lado, seu emprego é limitado, pois apresenta baixa resistência a momentos torçores e, em furos mais profundos, a remoção de cavacos é bastante deficiente (STEMMER II, 2005).

b) **Brocas helicoidais:** são as ferramentas mais utilizadas na execução de furos, seja na furação em cheio ou para aumentar o diâmetro de furos existentes (SCHROETER E WEINGAERTNER, 2002). Em geral, possuem duas arestas principais de corte, ligados pela aresta transversal, segundo Stemmer II (2005). Brocas de três arestas principais de corte são usadas na usinagem de ligas de alumínio, melhorando a autocentragem, o fluxo de cavacos e, ainda, reduzindo as forças de corte e avanço (MOCELLIN, 2002).

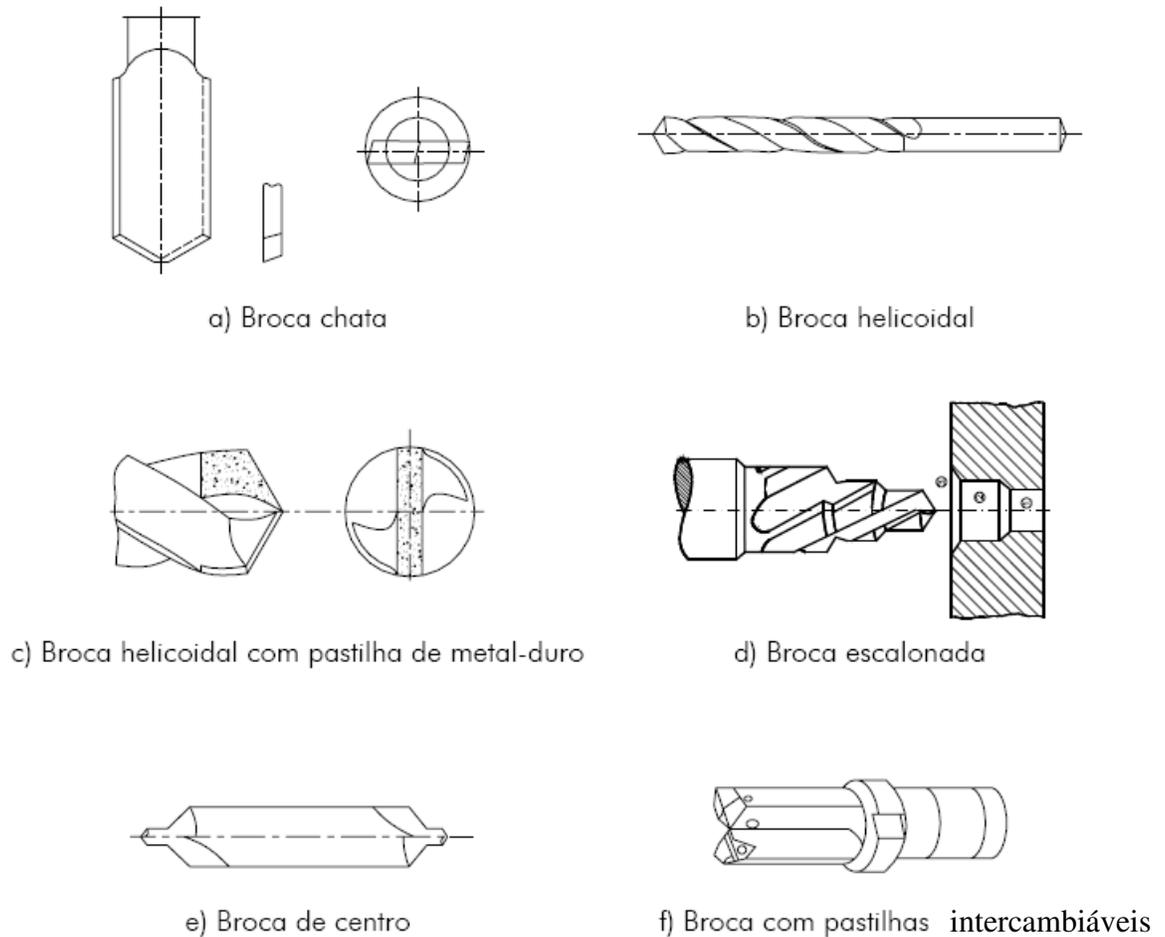


Figura 2.4 - Tipos de brocas para furação (STEMMER I, 2005).

c) **Brocas helicoidais com pastilhas de metal duro:** utilizadas principalmente na usinagem de furos em materiais de alta abrasão (concreto, cerâmica e não-metálicos, plásticos, ferros fundidos duros, etc.) (CASTILLO, 2005). Por serem de metal duro, devem ser utilizadas em velocidades de corte superiores a um certo mínimo, podendo chegar de 2 a 3 vezes quando comparadas àquelas recomendadas para brocas de aço rápido, porém com avanço reduzido de 2 a 3 vezes quando comparadas a estas últimas (STEMMER II, 2005).

d) **Brocas escalonadas:** possuem dois ou mais diâmetros retificados em brocas padronizadas. Geralmente são utilizadas na usinagem de furos com dois ou mais diâmetros diferentes ou para operações combinadas de furação, chanframento ou alargamento. Para maior

rigidez, o diâmetro menor da broca escalonada deve ser maior do que o diâmetro do seu núcleo (STEMMER II, 2005).

e) **Brocas de centro:** como expressado pelo próprio nome, geralmente utiliza-se a broca de centro para a confecção de furos de centro em peças de revolução que serão usinadas entre pontas. Na verdade, trata-se de ferramenta combinada de furar e escariar (STEMMER II, 2005).

f) **Brocas com dutos de refrigeração:** usadas na usinagem de furos mais profundos. O fluido de corte passa pelos dutos, atingindo a zona de corte, refrigerando a ferramenta, além do seu corpo, a peça e ainda auxiliando na retirada do cavaco através da sua saída pelos canais da broca, (STEMMER II, 2005).

g) **Brocas helicoidais escalonadas de múltiplas guias:** possuem duas guias diametralmente opostas para cada diâmetro. As vantagens destas brocas sobre as brocas escalonadas descritas no item “c” são a sua vida mais longa e maior facilidade para sua reafiação (STEMMER II, 2005), conforme Figura 2.5.



Figura 2.5 - Brocas helicoidais escalonadas de múltiplas guias.

h) **Brocas-canhão:** também conhecidas como brocas com remoção externa de cavacos e destinadas a furos de diâmetros de 3 a 20 mm, segundo Diniz et al (2006), são utilizadas principalmente em furações profundas. Suprem as inconveniências do uso de brocas helicoidais, tais como desvio dos furos devido a carga na ponta e deficiência das guias, pouca rigidez diante da ação de torques elevados, necessidade de retirada freqüente do furo para descarga dos cavacos, devido a dificuldade de penetração do fluido de corte. Já na broca-canhão, conforme Figura 2.6, a lubrificação é feita sob alta pressão através de canal que saem sobre a superfície principal de folga e arrastam os cavacos no seu retorno pelo canal, que ocupa 1/3 da seção da broca, assegurando maior rigidez à torção (STEMMER II, 2005). Neste caso o movimento de rotação é feito pela peça em máquina especial.

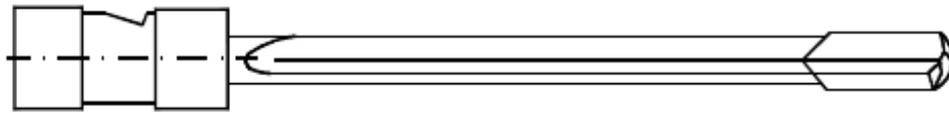


Figura 2.6 – Broca-canhão (KONIG, 1997 apud CASTILLO, 2005).

i) **Brocas BTA:** também conhecidas como brocas-canhão com remoção interna de cavacos (Figura 2.7), são destinadas à execução de furos de 18 a 64 mm, com profundidade limitada pelo equipamento e ferramental disponível, (DINIZ et al., 2006).

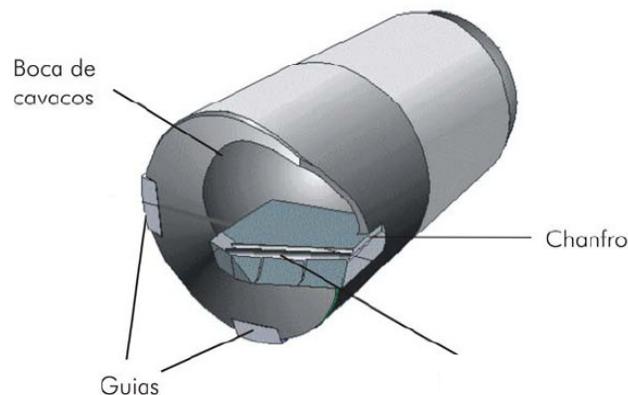


Figura 2.7 – Broca BTA, (KÖNIG, 1997 apud CASTILLO, 2005).

j) **Brocas de canais retos:** (Figura 2.8) mais eficazes em furação profunda do que as brocas helicoidais, devido à sua maior rigidez, boa resistência à torção. As brocas de canal reto apresentam bons resultados de erros de forma (circularidade e cilindridade). São fabricadas em metal duro e são utilizadas principalmente para furação de ferro fundido e ligas de alumínio, etc, sendo limitado a furos de 15 vezes o diâmetro de comprimento (STEMMER I, 2005; GUHRING, 1997 apud CASTILLO, 2005).



Figura 2.8 – Broca de canais retos.

k) **Brocas ocas:** utilizadas na operação de trepanação, a qual resulta em um núcleo aproveitável, com conseqüente redução de produção de cavacos, (STEMMER II, 2005). Utilizada somente na usinagem de furos passantes (DINIZ et al., 2006).

l) **Brocas Ejector:** (Figura 2.9) nome patenteado pela empresa Sandvik, é bastante semelhante à broca BTA, diferindo pelo sistema de retirada do cavaco. O sistema de lubrificação é constituído de 2 tubos concêntricos, sendo que o fluido de corte sob pressão é conduzido à zona de corte pelo tubo externo. O tubo interno possui alguns orifícios, pelo qual parte do fluido conduzido pelo tubo externo retorna, gerando zona de baixa pressão, sugando os cavacos gerados na usinagem (DINIZ et al., 2006).

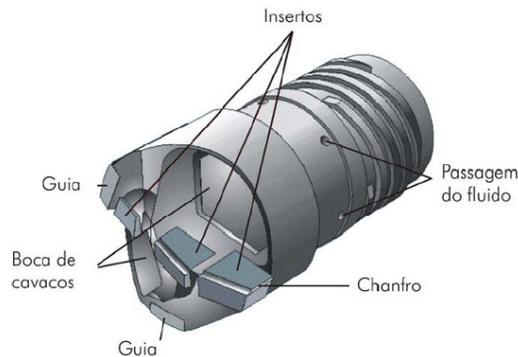


Figura 2.9 – Cabeçote Ejector (CASTILLO, 2005).

2.2.3 Geometria de brocas helicoidais

As brocas helicoidais têm um maior significado na furação, sendo elas as principais ferramentas utilizadas para a fabricação de furos cilíndricos partindo-se de materiais maciços ou

para aumentar o diâmetro de furos existentes. A broca helicoidal é a ferramenta fabricada em maior número e também a ferramenta mais difundida para a usinagem (SCHROETER E WEINGAERTNER, 2002).

De modo simplificado uma broca helicoidal compreende uma haste e uma parte cortante, e só uma análise mais detalhada mostra a geometria complexa, de sobremodo na ponta da broca. Existem aproximadamente 150 formas diferentes de afiação de brocas e uma série de perfis específicos desenvolvidos para materiais de peças diferentes, com o que se tenta garantir uma qualidade e um desempenho adequado da furação, nas mais diversas tarefas. Para que seja possível otimizar as solicitações mecânicas a que é submetida uma broca, é necessário o conhecimento da geometria da cunha da broca, da cinemática do processo de furação, bem como do efeito dos fatores influentes específicos do processo de furação sobre o comportamento do processo (SCHROETER E WEINGAERTNER, 2002).

Assim como uma ferramenta simples de corte, a broca possui elementos como arestas principais de corte (S), arestas secundárias de corte (S'), superfície principal de folga ($A\alpha$), superfícies de saída ($A\gamma$), superfície secundária de folga ($A'\alpha$) e ponta de corte, conforme Figura 2.10 (STEMMER II, 2005) e (NBR 6163 NB 205, 1990).

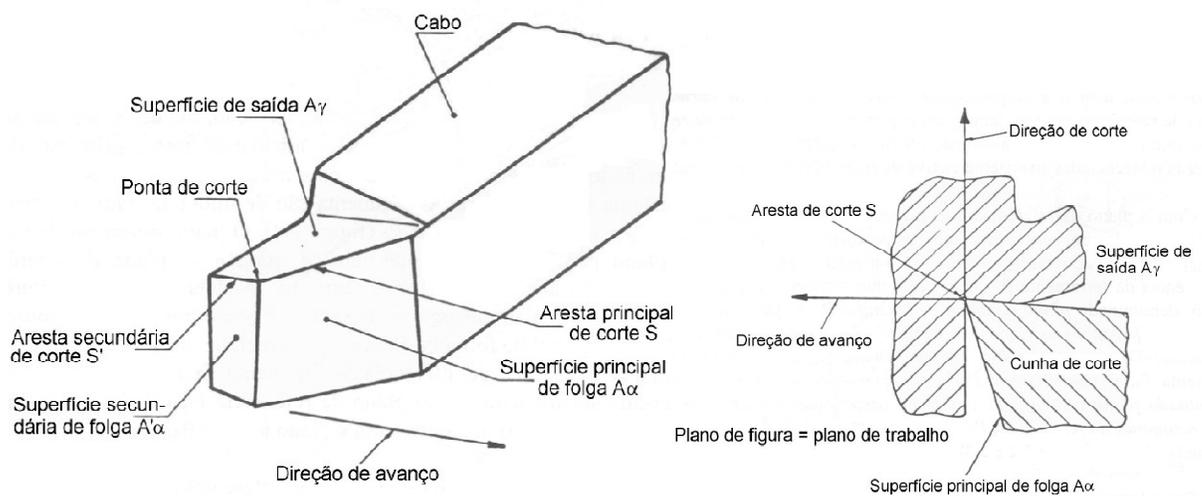


Figura 2.10 – Arestas de corte e superfícies de uma ferramenta de corte (NBR 6163 NB 205, 1990).

As normas ABNT NBR 6163, aplicadas a todas as brocas utilizadas em usinagem, também designam e classificam as terminologias da broca conforme mostrado na Figura 2.11.

A terminologia é importante, pois oferece a cada um que escreve e fala sobre brocas a utilização de uma linguagem clara, evitando-se mal entendidos. Neste trabalho procurou-se seguir a nomenclatura das normas ABNT.

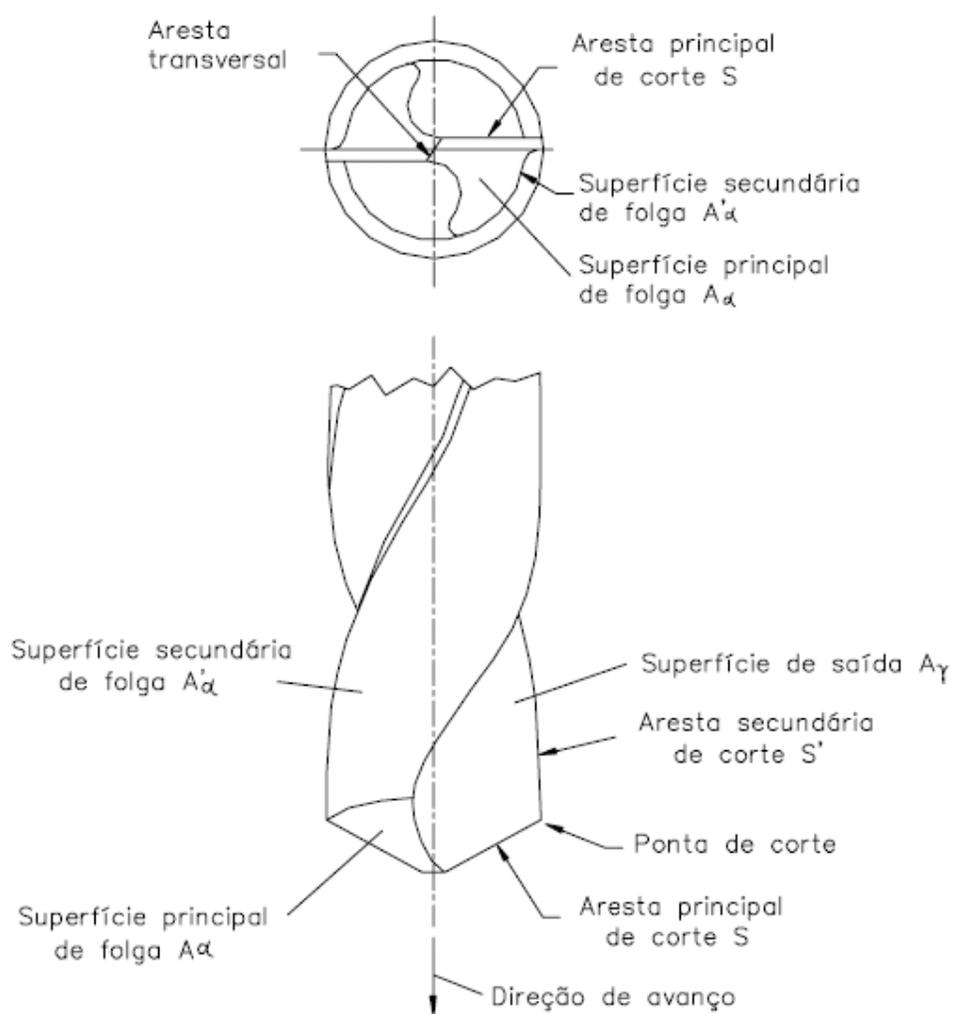


Figura 2.11 – Superfícies e arestas da broca helicoidal (NBR 6163 NB 205, 1990), (CORRÊA, 1996).

As brocas, assim como qualquer ferramenta de usinagem, têm seu desempenho fortemente afetado por sua geometria (PAIVA JUNIOR, 2007).

Podem existir algumas variações geométricas, tais como ausência de rebaixo, haste cilíndrica ao invés de cônica, existência de canais para refrigeração interna e algumas outras, conforme mostrado na Figura 2.12 (STEMMER II, 2005).

Analisando as Figura 2.11 e Figura 2.12 têm-se as seguintes descrições:

a) **Canais:** espaços pelos quais haverá a remoção do cavaco (STEMMER II, 2005), e entrada de fluido de corte, quando apresenta o sistema externo de refrigeração.

b) **Arestas principais de corte (S):** é a parcela da aresta de corte que está localizada na parte da ferramenta voltada para o sentido de corte, formada pela intersecção do canal, onde está localizada a superfície de saída ($A\gamma$), com a superfície principal de folga ($A\alpha$).

c) **Aresta transversal:** liga as duas arestas principais de corte. Segundo Stemmer (2005) a ação de corte da aresta transversal não é eficiente, pois possui ângulo de saída negativo e velocidade de corte baixa, por estar muito próximo do centro da broca. Além disto, a aresta transversal é o responsável por metade da força de avanço da ferramenta, podendo chegar a 65% desta força, no caso de brocas com núcleo reforçado (STEMMER II, 2005). Segundo Schoroeter e Weingartner (2002), a aresta transversal não apresenta corte e sim deformação plástica do material, extrudando-o em direção às arestas principais de corte.

d) **Guias:** têm como funções direcionar o trabalho da broca e reduzir o atrito da ferramenta com a parede do furo, reduzindo a superfície de contato da parede externa da broca, com conseqüente diminuição dos esforços de furação (DINIZ et al., 2006).

e) **Haste:** responsável pela fixação da broca na máquina, apresentando-se sob a forma cônica ou cilíndrica, sendo a primeira utilizada, geralmente, em brocas de diâmetros maiores do que 15 mm. Possibilita maior força de fixação, sendo esta realizada diretamente na máquina. As brocas com haste cilíndricas, por sua vez, são fixadas à máquina por intermédio de mandris (DINIZ et al., 2006).

f) **Núcleo:** confere rigidez à broca e possui espessura de aproximadamente 0,16 vezes o diâmetro da broca (DINIZ et al., 2006).

g) **Ponta de corte:** parte relativamente pequena da cunha de corte onde se encontram as arestas principal e secundária de corte, onde se formam o ângulo de ponta da ferramenta (ϵ), (NBR 6163 NB 205, 1990).

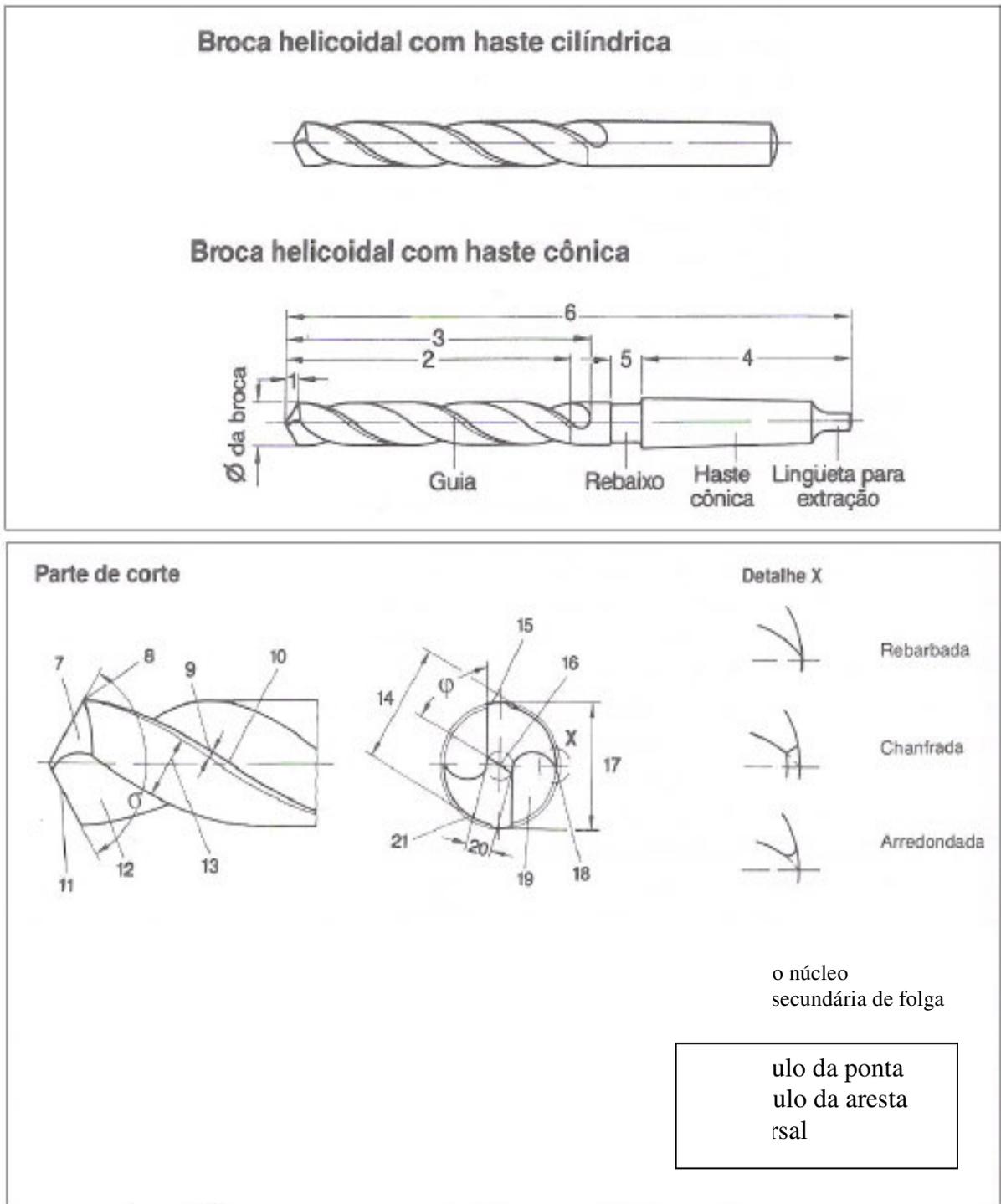


Figura 2.12 – Partes de uma broca helicoidal (ABNT NBR 6176), (DINIZ et al., 2006; STEMMER II, 2005).

Assim como os elementos anteriores, diversos ângulos compõem uma broca. Os principais ângulos da broca helicoidal são:

a) **Ângulo de Ponta de corte da ferramenta (ϵ_f):**

Conforme a norma NB-205 o ângulo de ponta de corte da ferramenta é formado pelo encontro das duas arestas de corte (S e S'), no plano de referência e esta representada na Figura 2.13. Seu valor é dado pelo tipo de material a ser furado e pelas condições de trabalho.

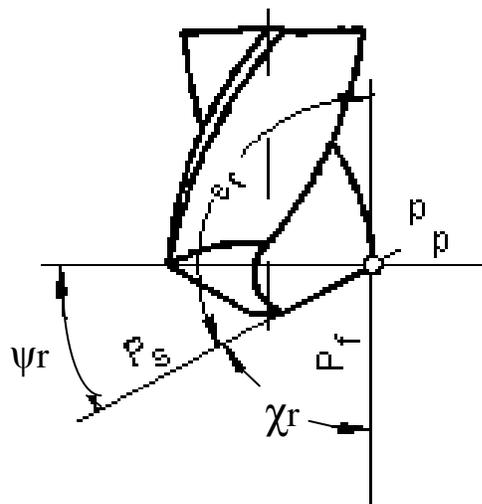


Figura 2.13 – Ângulos de brocas helicoidais (NBR 6163 NB 205, 1990).

Alguns autores como Stemmer (2005) dizem que a ponta da broca está situada junto com a aresta transversal formado pelas duas arestas principais de corte (S), no plano que contém o eixo principal da broca, e é denominada pelo símbolo σ que é igual a duas vezes o ângulo de posição da ferramenta. Pequenos ângulos de ponta (σ) conduzem a uma boa centragem da broca, isto é, garante uma precisão dimensional do furo. Porém, ângulos σ muito pequenos conduzem a um aumento considerável do atrito da broca na parede do furo. Ângulo de ponta (σ) grande dificulta a centragem da ferramenta, facilmente causando desvios da broca, o que pode provocar aumento do diâmetro do furo segundo Schroeter e Weingaertner (2002).

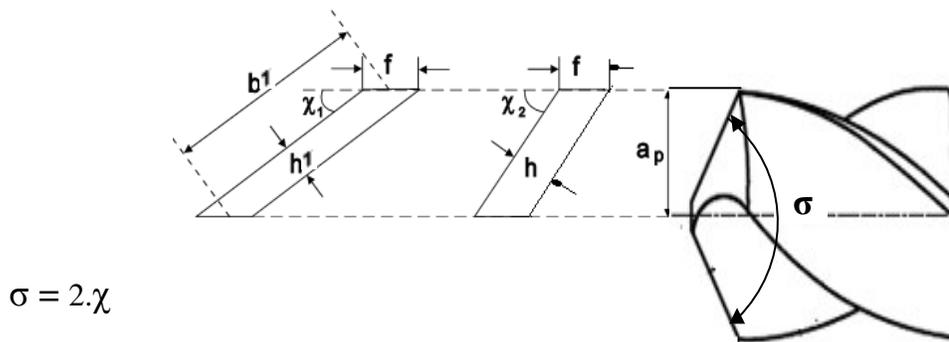


Figura 2.15 – Espessura do cavaco conforme alteração do ângulo de ponta da broca.

Para o caso de alguns materiais de difícil usinabilidade, o cavaco mais espesso é mais vantajoso, pelo fato de fazer contato na face, num ponto mais afastado da aresta principal de corte (S) (CASTILLO, 2005).

Um grande ângulo de ponta da broca (σ) permite usualmente, o aumento do avanço. Isto possibilita uma substancial redução no tempo de usinagem. Com o aumento do ângulo de ponta (σ) a centragem da ferramenta e o momento torçor tendem a diminuir (TIKAL, 1993 apud CASTILLO, 2006).

O ângulo de ponta da broca (σ) está diretamente relacionado com o ângulo de posição (χ) que se relaciona com os mecanismos de formação do cavaco. Normalmente a ponta da broca é submetida a pressões de corte intensas logo, com uma diminuição do ângulo de ponta (σ), o contato da ferramenta com a peça será maior, aumentando a área disponível à dissipação do calor gerado durante a usinagem, influenciando os mecanismos de distribuição de calor podendo aumentar a vida da ferramenta (DINIZ et al., 2006) e haverá uma solitação mecânica por unidade de comprimento da aresta cortante menor (FERRARESI, 1977).

b) **Ângulo de folga** (α_f):

Este ângulo é medido no plano de trabalho, obtido pelo rebaixamento da superfície principal de folga (A_a) conforme Figura 2.16. Quando obtido em valores altos evita o esmagamento do material pela ação da superfície principal de folga da broca. Valores excessivos deste ângulo causam perda da resistência da cunha da broca e tendência a vibração (SCHROETER E WEINGAERTNER, 2002).

Este ângulo tem como função principal evitar o atrito entre a superfície de corte e a superfície principal de folga (A_α) e permitir que a aresta de corte penetre no material e o corte livremente. Se o ângulo de folga for muito pequeno, a aresta de corte principal (S) não pode penetrar convenientemente no material e a ferramenta perde as propriedades de corte rapidamente. Assim, ocorre forte atrito com a peça, superaquecimento da ferramenta e mau acabamento superficial.

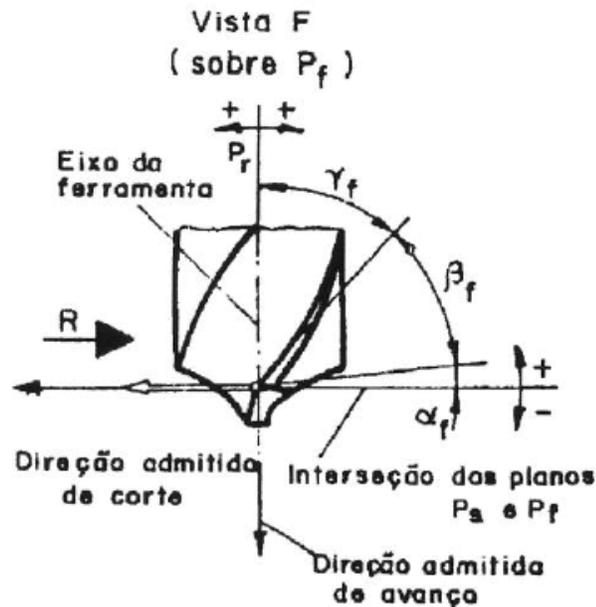


Figura 2.16 – Ângulos de brocas helicoidais (NB 205, 1990), (CORRÊA, 1996).

Se o ângulo de folga é demasiadamente grande, a aresta principal de corte pode quebrar ou sofrer pequenos lascamentos em virtude do apoio deficiente. A grandeza do ângulo de folga depende principalmente dos seguintes fatores (STEMMER I, 2005):

- Resistência do material da ferramenta;
- Resistência e dureza do material da peça a ser usinada.

Usualmente, se o material da ferramenta apresenta alta tenacidade, pode-se usar ângulo de folga grande, sem perigo de quebras. Assim, podem ser usados ângulos maiores em ferramentas de aço-rápido do que em ferramentas de metal-duro, devido à maior resistência e tenacidade do aço rápido. Já a usinagem de materiais moles como o alumínio, permite usar ângulos bem maiores do que a usinagem de materiais duros como o aço (CASTILLO, 2005).

A ação simultânea da rotação e do avanço resulta em uma direção efetiva de corte, definido pelo ângulo efetivo η . Este, por sua vez, reduz o ângulo de folga efetivo. Portanto, o maior ângulo possível, evitando esmagamento de material e boa resistência da cunha, favorece o melhor desempenho da broca (SCHROETER E WEINGAERTNER, 2002).

Para compreender a importância do ângulo de folga (α_f), serão feitas algumas considerações sobre a cinemática do processo de furação:

O processo de corte nas duas partes cortantes da aresta principal de corte está mostrado na Figura 2.17 desenvolvido sobre o plano do desenho. A superfície de corte, geralmente na forma de um funil que surge abaixo da ponta de uma broca no furo é na verdade composta de duas hélices equidistantes entre si pela metade do avanço por rotação decorrente do avanço contínuo da ferramenta.

Pela composição do movimento principal de corte (rotação) e do avanço, tem-se uma direção efetiva de corte, que é definida com o ângulo efetivo η . Este, diminui o ângulo de folga efetivo α_{fe} .

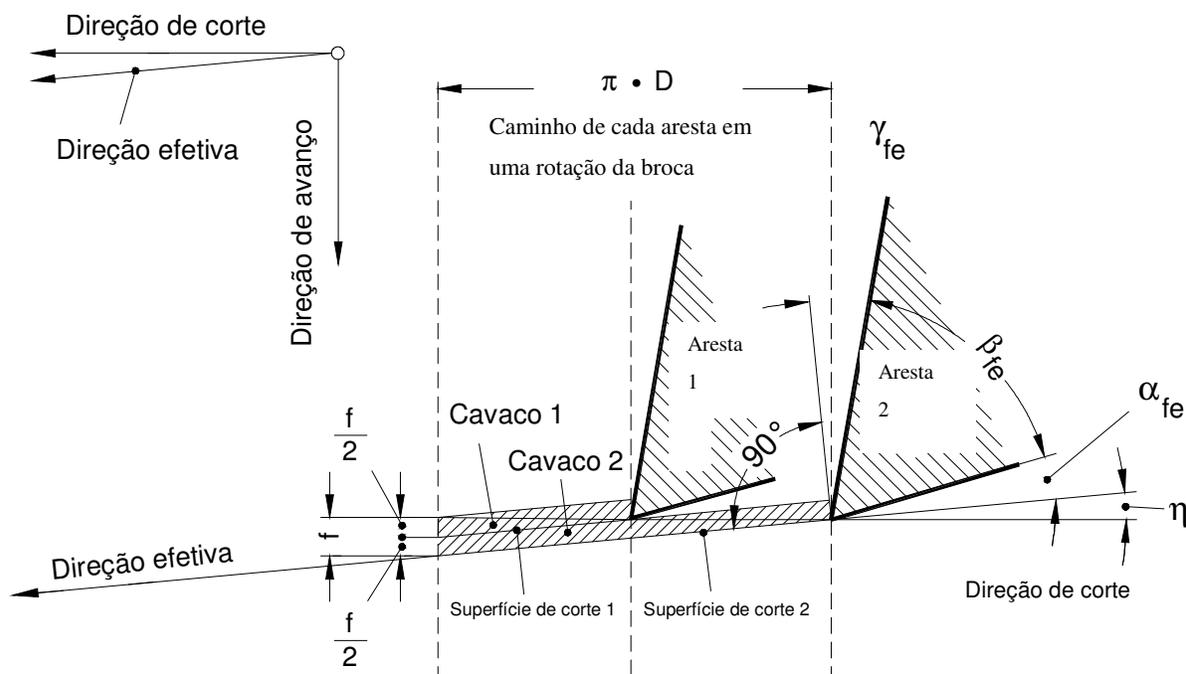


Figura 2.17 - Princípio de corte na aresta principal de brocas helicoidais (Segundo Schallbroch) (SCHROETER E WEINGAERTNER, 2002).

Um ângulo σ de 118° é o valor usual para brocas por representar, na maioria dos casos, valor ótimo em relação à centragem e furação livre (SCHROETER E WEINGAERTNER, 2002). No entanto, em certos tipos de materiais outros valores são recomendados, tais como o ângulo de 140° para materiais de cavacos longos, onde se tem dificuldade da saída dos cavacos como o alumínio, pois facilita a saída dos mesmos. Já em materiais que tendem ao engripamento da broca, o ângulo de 130° garante furação livre. O ângulo σ de 90° é mais usual na furação de plásticos duros com alto efeito abrasivo, a fim de reduzir o desgaste das pontas de corte (ϵ_r) da broca ao garantir uma passagem mais suave entre as arestas principais e as arestas secundárias de corte (SCHROETER E WEINGAERTNER, 2002) e com isso reduzindo o desgaste da ponta de corte (ϵ_r) da broca (Figura 2.14).

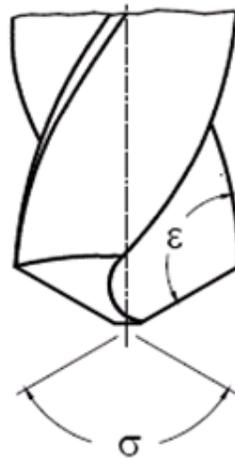


Figura 2.14 – Ângulo de ponta de brocas (SCHROETER et al., 1999 apud CASTILLO, 2005).

O ângulo σ tem influência na espessura do cavaco. Em relação às dimensões do cavaco, ângulos σ grandes geram cavacos com maiores espessuras (h) e menor largura (b). Ao contrário, os ângulos σ pequenos produzem cavacos com menores espessuras (h) e maiores larguras (b) conseqüentemente aumentam o ângulo de ponta de corte (ϵ_r), elevando sua resistência mecânica e a dissipação do calor, ou seja, produz cavaco mais fino e mais largo, considerando um mesmo avanço (f) (Figura 2.15).

Considerando-se as condições de corte deve-se procurar fabricar uma broca com um ângulo de folga grande, para com isso evitar o esmagamento de material, ou ainda um assentamento da superfície principal de folga da broca. Um limite superior para o ângulo de folga, no entanto, está dado pela redução da resistência da cunha e a tendência a vibrações que ocorrem na broca.

O desgaste VB é influenciado consideravelmente pelo ângulo de folga. Se o ângulo tender a zero, o desgaste VB na superfície de folga aumenta devido aos caldeamentos na região de contato aumentando o atrito (SCHROETER E WEINGAERTNER, 2002).

O aumento do ângulo de folga (α_f) provoca a diminuição do desgaste VB da ferramenta e aumenta desta forma sua vida, porém, seu aumento excessivo fragiliza a aresta da cunha cortante da ferramenta (DINIZ et al., 2006).

c) **Ângulo de saída (γ_f):**

É o ângulo entre a superfície de saída e o plano de referência, medido no plano de trabalho da cunha cortante (FERRARESI, 1977; NBR 6163, 1990), (Figura 2.18).

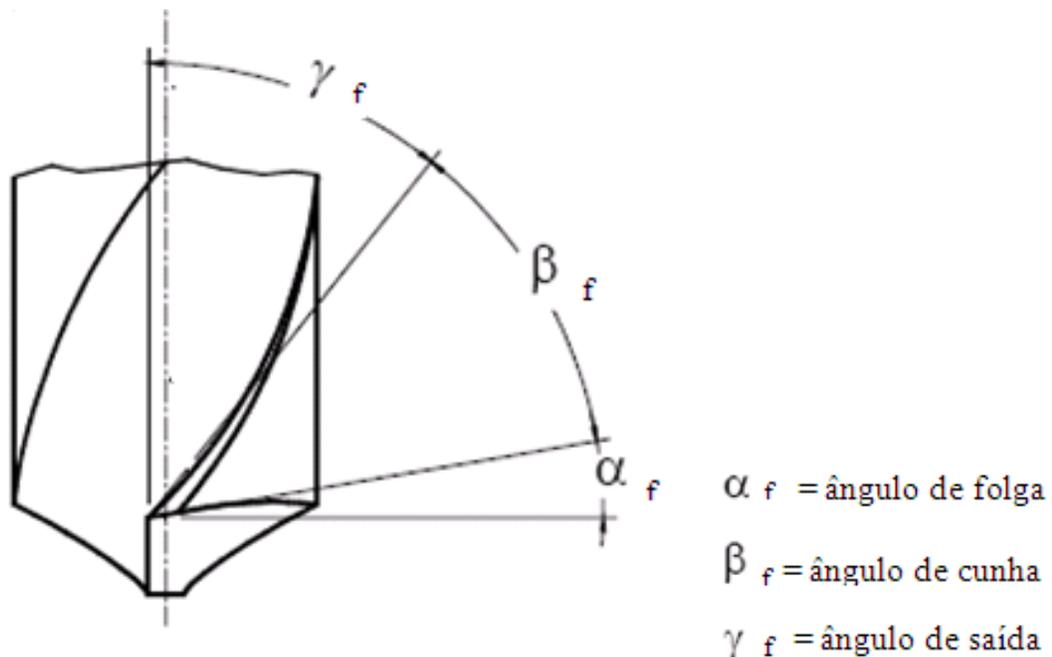


Figura 2.18 - Ângulo de ponta numa broca helicoidal (SCHROETER et al., 1999 apud CASTILLO, 2005).

Maiores avanços provocam cortes mais pesados, exigindo menores ângulos de saída. Quanto menor o avanço, maior pode ser o ângulo de saída (STEMMER I, 2005).

Para avanços muito pequenos, normalmente ocorre o contrário, pois a zona de pressão se situa muito próxima a aresta principal de corte, fazendo com que este sofra maior aquecimento e desgaste. Ângulo de saída pequeno resulta num melhor acabamento (STEMMER I, 2005).

Este ângulo está diretamente relacionado ao processo de formação do cavaco, quanto maior o seu valor menor tende a ser o trabalho de separação do cavaco da peça, reduzindo então a pressão de corte e influenciando diretamente no desgaste da ferramenta. O fator limitante nesse caso é a fragilização da cunha da ferramenta com o aumento do valor do ângulo de saída (DINIZ et al., 2006).

Ângulos de saída negativos são empregados em ferramentas de metal-duro no corte de materiais de difícil usinabilidade e em cortes interrompidos, como no fresamento. O principal objetivo do ângulo de saída negativo é fazer com que a sollicitação da ferramenta, perto da aresta principal de corte, seja quase que exclusivamente de compressão. As desvantagens do ângulo de saída negativo são: menor qualidade da superfície usinada, diminuindo este com o aumento da velocidade de corte; necessidade de maior força e potência de usinagem e maior calor gerado na ferramenta. Ainda, o ângulo negativo faz com que o contato entre o cavaco e a ferramenta se dê mais afastado da aresta principal de corte, quando o avanço for escolhido não muito pequeno (STEMMER I, 2005).

Para broca helicoidal este ângulo varia de um valor negativo, no centro da broca, a um valor igual ao ângulo de hélice, produzindo assim condições diferentes de remoção de cavaco ao longo da aresta principal de corte. Ângulos de saída negativos, aliados a baixas velocidades de corte, diminuem a ação de corte na região central da ferramenta, conduzindo a extrusão lateral do material. Para brocas de canal reto este ângulo é nulo, e o efeito de extrusão do material se comporta de forma similar.

e) **Ângulo da aresta transversal (Ψ):**

Apresentado na Figura 2.19, definido pelo ângulo de folga (α_f), no momento da geração do cone de revolução durante a afiação, é o menor ângulo formado entre as arestas principais de corte e a aresta transversal (STEMMER II, 2005).

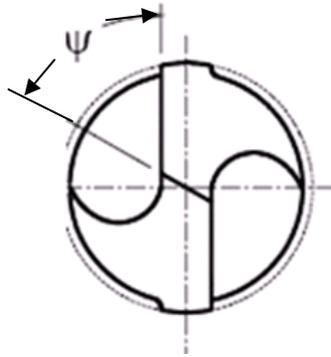


Figura 2.19 - Ângulo da aresta transversal (SCHROETER et al., 1999 apud CASTILLO, 2005).

d) **Ângulo de hélice (δ):**

Definido como o ângulo da helicóide dos canais da broca helicoidal, ou ainda, como o ângulo formado pela aresta secundária de corte e o eixo axial da ferramenta (MOCELLIN, 2002). A escolha do ângulo δ varia conforme as características do material a ser usinado e, segundo a norma alemã DIN 1836 (NOVASKI, 1996), são três os tipos recomendados:

-Tipo N (do alemão Normal=normal), passo normal, indicado para aços ligados e não ligados, ferros fundidos cinzento e maleável, níquel e ligas de alumínio de cavacos curtos (STEMMER II, 2005);

-Tipo H (do alemão Hart=duro), passo longo, para materiais duros e frágeis, tais como ferros fundidos com dureza superior a 240 HB, latão, borracha dura, latão, fibra, baquelite, marmore e outros (STEMMER II, 2005);

-Tipo W (do alemão Weich=mole), passo curto, indicado para materiais moles de cavacos longos, como, por exemplo, o alumínio e suas ligas de cavaco longo, cobre, ligas de zinco, nylon, etc. (STEMMER II, 2005).

A forma e o ângulo de hélice da broca helicoidal definem o ângulo de saída (γ_f), que não é constante ao longo da aresta principal de corte e sim apresenta o seu valor máximo na ponta de corte da broca e diminui no sentido de centro da broca e se torna negativo na passagem para a aresta transversal. Para critério de distinção, no entanto, usa-se apenas o ângulo de saída (γ_f) que com precisão suficiente coincide com o ângulo de hélice.

Na Figura 2.20 está representado o ângulo de hélice de acordo com as características do material a ser usinado (quebra de cavacos) e designado em grupos principais.

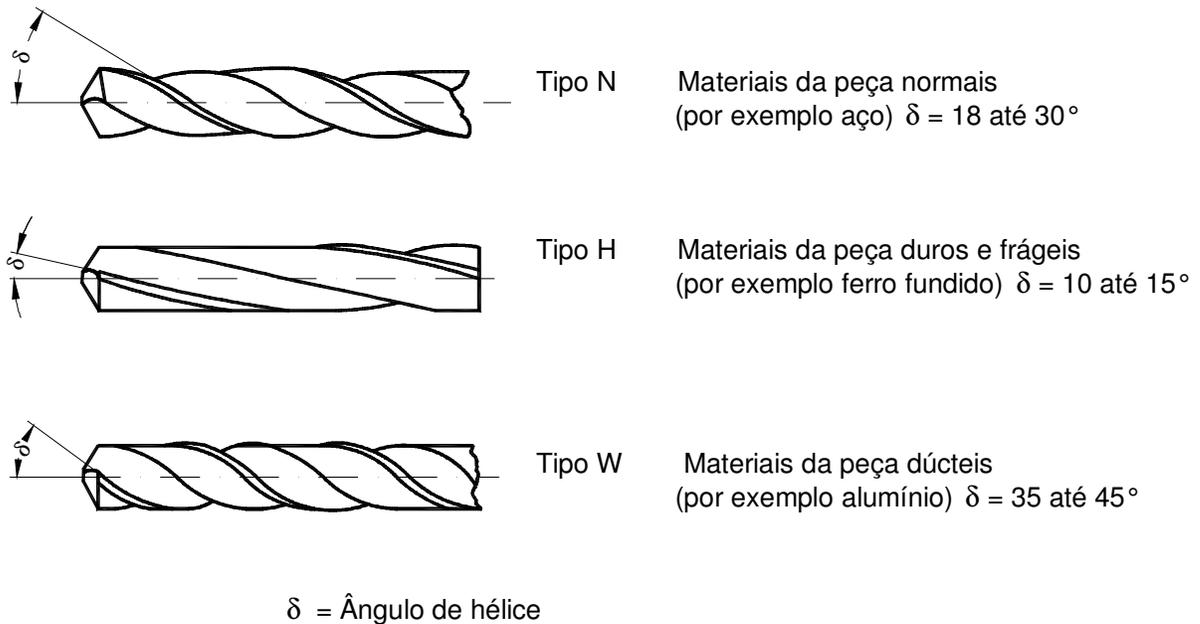


Figura 2.20 - Brocas helicoidais para diversos materiais DIN 1836 (SCHROETER E WEINGAERTNER, 2002).

O ângulo de saída (γ_f) e o ângulo de hélice (δ) na broca de canal reto são nulos.

Como segundo a definição, as arestas principais de corte se mostram no sentido do avanço, a aresta transversal torna-se uma parte integrante da aresta principal, mesmo que, em decorrência do ângulo de saída negativo este praticamente não apresenta corte e sim deforma o material plasticamente e o extruda na direção das partes cortantes da aresta principal de corte.

A Figura 2.21 mostra a geometria da parte cortante de uma broca helicoidal segundo NBR 6163 NB 205 (1990).

2.2.4 Tipos de afiação de broca

O processo de afiação é realizado através de ferramentas abrasivas para a construção e manutenção das arestas principais de corte das brocas para que estas possam ser utilizadas no processo de furação. A afiação é um dos fatores responsáveis pela qualidade dos furos e uma geometria adequada de afiação reduz os esforços de corte no processo de furação. O tipo de afiação de broca mais conhecido e aplicado é a afiação em cone de revolução ou simplesmente afiação cônica. O princípio da afiação cônica consiste em posicionar a ponta da broca em frente ao rebolo observando a formação do ângulo de ponta. Nesta posição a broca gira em torno do seu eixo que está deslocado para formar o ângulo de folga. Este tipo de afiação apresenta como vantagem a facilidade de fabricação e o seu bom comportamento na furação da maioria dos materiais usinados (DINIZ et al., 2006).

A necessidade de introdução de melhorias ao processo de furação levou ao aprimoramento de novas formas de geometria de afiação considerando-se que, não existe afiação apropriada para obtenção constante do melhor resultado em todas as aplicações (CORRÊA, 1996).

Só uma afiação cuidadosa, executada em uma máquina especial, ajustada para uma tarefa específica, pode garantir uma usinagem econômica. Segundo Ferraresi (1977) afiação é um processo mecânico de usinagem por abrasão no qual é dado o acabamento das superfícies da cunha cortante da ferramenta, com o fim de habilitá-las a desempenhar sua função. Desta forma, são obtidos os ângulos finais da ferramenta.

No parágrafo subsequente serão analisadas as afiações especiais de brocas e suas áreas de aplicação:

- *Afiação com duplo tronco de cone*: Para a grande maioria das aplicações a afiação com duplo tronco de cone é a forma mais consistente e adequada (SCHROETER E WEINGAERTNER, 2002). A superfície principal de folga (A_{α}) da ferramenta é uma parte da superfície de um tronco de cone, Figura 2.22. As vantagens destas brocas são a facilidade de sua fabricação, sua reafiação e sua pequena susceptibilidade a sollicitações mecânicas elevadas.

Como desvantagens citam-se o pequeno efeito de auto-centragem e os erros de forma e posição associados. A aresta transversal aumenta naturalmente com o aumento do diâmetro da

broca e do núcleo da broca, de forma que o aumento das forças de avanço tem um efeito negativo sobre a precisão de trabalho.

Neste caso, e sempre quando são feitas exigências especiais a uma broca, a ponta da mesma recebe uma afiação especial que pode complementar a afiação de duplo tronco de cone (por exemplo, a redução da aresta transversal) ou levar a uma configuração completamente nova da ponta da broca (por exemplo, ponta de centragem, ...).

A aresta transversal trabalha em péssimas condições: velocidade de corte muito baixa, ângulo de saída negativo, sendo responsável por grande parte do esforço consumido no avanço da ferramenta (30 a 65%), deve por isso ser mantida o menor possível. Segundo Micheletti (1980) e Mattes (2009) a força de avanço surge principalmente devido à ação da aresta transversal podendo chegar a valores da ordem de 50%.

O desempenho das brocas helicoidais evoluiu de forma significativa com o surgimento de novos procedimentos e afiações. Algumas afiações especiais são utilizadas (Figura 2.22):

Forma A: Afiação de duplo tronco de cone com redução da aresta transversal melhora consideravelmente a capacidade de centragem da broca e reduz a força axial (força de avanço), como decorrência da redução da aresta transversal a aproximadamente $0.1x D$ (utilizado principalmente para brocas tipo N a partir de 14 mm).

Forma B: Afiação de duplo tronco de cone com redução da aresta transversal e ângulo de saída corrigido leva a possibilidade de adaptar o ângulo de saída para aplicações específicas. Normalmente o ângulo de saída é reduzido a 10° , que leva a uma estabilidade bastante grande da cunha sem dificultar o transporte do cavaco pela diminuição do ângulo de hélice da broca. A afiação B é utilizada para altas solicitações, como por exemplo, para a usinagem de aço com alto teor de manganês, ou na furação de chapas finas que fatalmente seriam puxadas para dentro do furo na saída da broca.

Forma C: Afiação de um duplo tronco de cone com afiação em cruz sobre a aresta transversal, eliminando completamente a aresta transversal. É adequado de sobremodo para furações profundas. O efeito de esmagamento produzido pela aresta transversal é eliminado por duas partes cortantes na região da aresta transversal, com isso obtém-se características de corte melhoradas da broca. Também aqui obtém-se uma boa capacidade de centragem e uma redução da força de avanço.

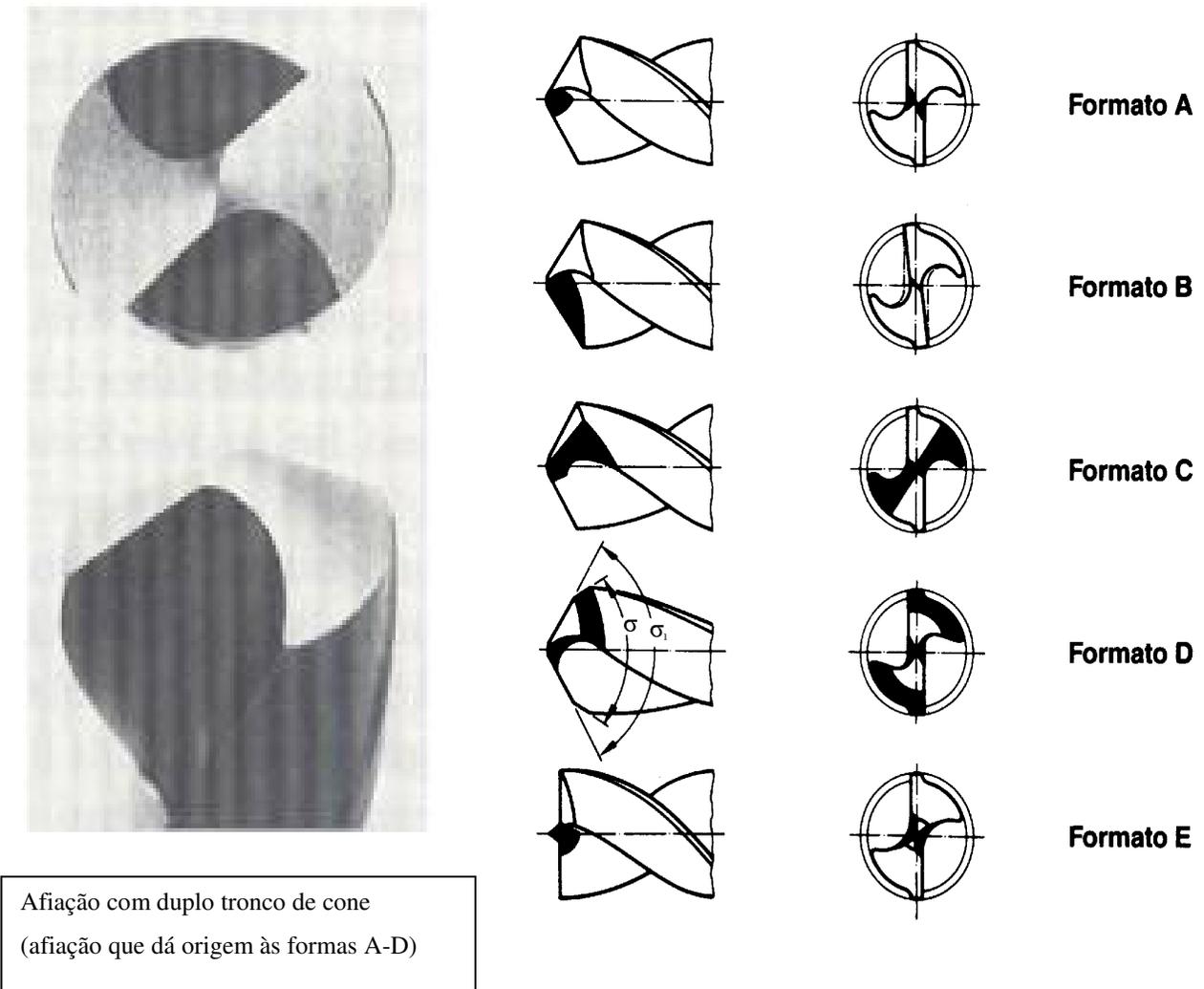


Figura 2.22 - Formas especiais de afiações de brocas A até E, em comparação com a afiação duplo tronco de cone (SCHROETER E WEINGAERTNER, 2002; STEMMER II, 2005).

Forma D: Afição com duplo tronco de cone com redução de cone transversal e ponta de corte chanfrada, desenvolvido especialmente para a usinagem de ferro fundido cinzento, cuja carepa dura abrasiva ataca as pontas de corte da ferramenta. Aqui, uma segunda afiação com duplo tronco de cone com ângulo de ponta menor leva à solução, pois desta forma obtém-se uma melhora na dissipação do calor e reduz-se o desgaste pelo aumento do comprimento da aresta cortante.

Forma E: Ângulo de ponta de 180° com ponta de centragem é utilizado quando é necessária uma furação centrada ou quando se deseja fabricar furos circulares e sem rebarbas na furação de chapas. Após a penetração total do cone de centragem as duas parcelas da aresta principal cortantes atingem simultaneamente a superfície a ser cortada em todo seu comprimento e com isso as pontas de corte se apóiam sobre a parede do furo já no início da furação. A saída da broca ocorre também instantaneamente em todo o comprimento da aresta principal de corte, levando a formação de uma chapinha redonda plana com pequena formação de rebarba.

Vários estudos visam elaborar propostas de geometria de afiações. Nesta dissertação é proposto avaliar a geometria de corte da broca de canal reto com afiação chamada *esférica* frente à tradicional afiação chamada *normal* nos critérios de fim de vida estipulados, buscando identificar os benefícios da utilização da afiação *esférica* comparativamente com a *normal*.

As novas geometrias não são muito conhecidas quanto o desempenho em diversas situações. Por estas razões, é mais simples e mais econômico, para o fabricante, suprir o mercado apenas com brocas afiadas convencionalmente e deixar para o usuário realizar as mesmas, segundo as suas aplicações específicas. A afiação esférica produz menos carga por área, menor calor e o dissipa mais facilmente, os avanços podem ser aumentados contribuindo para a produtividade onde a vida da ferramenta é fator preponderante (NOVASKI, 1996).

Arestas curvilíneas reduzem os esforços presentes na furação e produzem condições propícias para possibilitar o aumento da vida da ferramenta (NOVASKI, 1996).

Segundo Corrêa (1996), as vantagens da afiação esférica são (DONARRSKI, 1984, apud CORRÊA, 1996):

- melhor dissipação do calor durante o processo de furação, devido à distribuição de temperaturas em suas arestas de corte;
- baixa pressão de corte por área nas arestas de corte.

Na escolha do tipo de afiação deve-se procurar a melhor combinação de economia, vida da broca, qualidade do furo e adequação à máquina utilizada, se máquina com Controle Numérico Computadorizado (CNC) ou convencional (DEONÍSIO, 1996).

Com o advento de afiadoras CNC's ficou facilitado o desenvolvimento e a obtenção das geometrias especiais.

2.2.5 Parâmetros de corte no processo de furação

Os parâmetros de corte são as grandezas que definem a maneira com que o processo se realiza. As grandezas de corte no processo de furação são aquelas que devem ser ajustadas na máquina, direta ou indiretamente, para a retirada do cavaco conforme segue:

a) Velocidade de corte (v_c):

É a velocidade instantânea do ponto de referência da aresta cortante, segundo a direção e sentido de corte (FERRARESI, 1977). A velocidade de corte está relacionada com o diâmetro do furo e com a rotação da ferramenta, e mantém uma relação direta com o material usinado, vida da ferramenta, tempo de usinagem, acabamento superficial e a potência consumida pela máquina-ferramenta (STEMMER I, 2005).

Em velocidades de corte elevadas o atrito faz com que a aresta de corte ultrapasse a temperatura admitida pelo material da ferramenta, ocasionando uma perda da capacidade de corte.

A velocidade de corte é sempre referida ao diâmetro da broca e é calculada conforme Equação 2.1:

$$v_c = \pi \cdot D \cdot n / 1000 \quad (\text{m/min}) \quad (2.1)$$

Onde: D = diâmetro da broca, (mm);

n = rotações por minuto, (rpm).

b) Velocidade de avanço (v_f):

A velocidade de avanço é a velocidade instantânea da ferramenta segundo uma direção e sentido do avanço (FERRARESI, 1977).

O cálculo da velocidade de avanço se define pela Equação 2.2 (SCHROETER E WEINGAERTNER, 2002):

$$v_f = f \cdot n \quad (\text{mm/min}) \quad (2.2)$$

Onde: f = avanço, (mm/rot);

n = rotações por minuto, (rpm).

c) Avanço(f):

O avanço (f) é o percurso linear de avanço por revolução ou em cada volta, numa direção paralela ou coincidente com o eixo do furo (FERRARESI, 1977). O crescimento do avanço facilita a quebra e, conseqüentemente, a remoção do cavaco de dentro do furo. Existe um limite para o crescimento do avanço determinado pelas características da máquina e a resistência estrutural da ferramenta. Acima de um valor determinado, o avanço pode causar a quebra da broca ou a paralisação do avanço da máquina (DINIZ et al., 2006).

Os avanços possíveis dependem do tipo de material da peça e do diâmetro da broca. Os avanços são dados em mm/rotação. O avanço de corte f é medido sempre no plano de trabalho.

No caso de ferramentas que possuem mais de um dente distingue-se o avanço por dente (f_z), que é o avanço de cada dente medido na direção do avanço da ferramenta definido pela Equação 2.3:

$$f = f_z \cdot z \quad (\text{mm/rot}) \quad (2.3)$$

Onde: f_z = avanço por dente, (mm/dente);

z = número de dentes da ferramenta.

d) Profundidade de corte ou largura de corte (ap):

Conforme a Figura 2.23 a profundidade de corte (ap) é a profundidade de penetração da aresta principal ou é a largura de penetração da aresta principal de corte. Na furação em cheio, corresponde à metade do diâmetro da broca, (DINIZ et al., 2006).

Segundo Ferraresi é a profundidade ou largura de penetração da aresta principal de corte, medida numa direção perpendicular ao plano de trabalho. Largura de corte na furação é o diâmetro da broca dividido por dois e é sempre aquela que, multiplicada pelo avanço de corte f , origina a área de secção de corte (FERRARESI, 1977).

e) Espessura de corte (h):

Conforme a Figura 2.23, a espessura de usinagem é proporcional ao avanço e é medida perpendicular à aresta de corte, derivadas das grandezas de corte e obtidas através da medição do cavaco ou obtidas através do cálculo, conforme a Equação 2.4:

$$h = f/2 \cdot [\text{sen}(\sigma/2)] \quad (\text{mm}) \quad (2.4)$$

Onde: σ = ângulo de ponta da ferramenta (graus);

f = avanço da ferramenta (mm/rot).

A espessura do cavaco, para um mesmo avanço, diminui com a redução do ângulo de ponta. Isto faz com que a força de corte seja distribuída em um comprimento maior da aresta de corte diminuindo o desgaste da ferramenta e aumentando sua vida, isto é, o tempo necessário entre afiações.

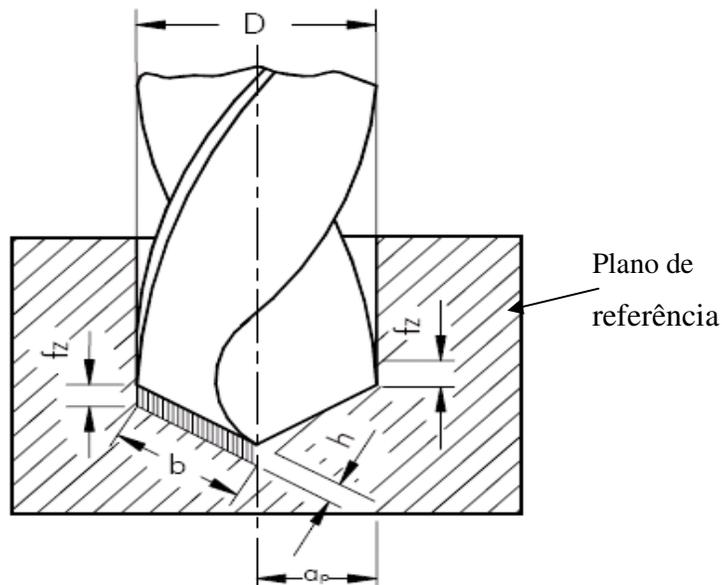


Figura 2.23 – Representação da largura e profundidade de corte na furação e plano de referência para brocas (STEMMER I, 2001).

f) Comprimento de corte (b):

A largura de usinagem corresponde ao comprimento de cada aresta principal para o caso de furação em cheio.

O comprimento de corte (b) é o comprimento de cavaco a ser retirado, medido na superfície de corte, segundo a direção normal à direção de corte (Figura 2.23). É medida na intersecção da superfície de corte com o plano normal à velocidade de corte, passando pelo ponto de referência na aresta de corte (Equação 2.5) (FERRARESI, 1977):

$$b = D / [2 \cdot \text{sen}(\sigma / 2)] \quad (\text{mm}) \quad (2.5)$$

Onde: D =diâmetro da ferramenta (mm);

σ = ângulo da ponta da ferramenta (graus).

Plano de referência da ferramenta para brocas é o plano que passa pelo eixo de rotação e pelo ponto escolhido na aresta principal de corte e perpendicular à direção de corte (Figura 2.23).

É de grande influência na vida da ferramenta as condições operacionais durante o processo de usinagem, particularmente os valores de velocidade de corte e avanço.

Sabe-se que, o aumento exagerado do avanço pode ocasionar trepidações maiores ao processo de usinagem e, portanto comprometer a vida da ferramenta. Caso esse aumento esteja associado a um aumento da velocidade de corte, as possibilidades dos esforços de corte se tornarem grandes a ponto de superar os limites de resistência do material da ferramenta e provocar o colapso da mesma serão muito grandes.

Porém recomenda-se que o inverso também não ocorra, ou seja, velocidades de corte muito baixas podem provocar fenômenos indesejáveis, tais como a formação de arestas postiças de corte, comprometendo dessa maneira a vida da ferramenta (DINIZ et al., 2006).

Em todos os processos de remoção de cavaco, características de processo como a formação de cavacos, saída dos cavacos, forças de corte, desgaste e o resultado do trabalho são consideravelmente influenciados pela geometria da ferramenta, por isso, esta geometria deve ser adaptada ao material da peça, ao material da ferramenta e às condições específicas da máquina-ferramenta.

2.2.6 Desgaste da ferramenta

Em furação, os desgastes usualmente mensurados são os das arestas principais de corte (VB), na superfície principal de folga e o de cratera na superfície de saída, sendo utilizados como critério de fim de vida de uma ferramenta (SCHROETER et al., 1999 apud CASTILLO, 2005).

O desgaste é definido como uma perda de material progressiva nas faces de corte da broca, devido à interação física entre a ferramenta de corte e a peça. Depois de um certo limite, o desgaste da ferramenta pode causar uma falha catastrófica com considerável prejuízo na peça e mesmo na

máquina ferramenta. O desgaste altera a geometria original da ferramenta de corte, modificando a área de contato na interface cavaco-ferramenta (MARTINS, 2008).

Os esforços mecânicos presentes durante o processo de usinagem, os atritos entre peça e ferramenta, cavaco e ferramenta e as vibrações do conjunto máquina-ferramenta, ferramenta e peça de trabalho ocasionam desgastes, que levam ao fim de vida da ferramenta através da quebra ou lascamento da aresta de corte (CORRÊA, 1996).

A medição do desgaste das arestas por abrasão é utilizada como um dos critérios para determinar o final da vida de uma ferramenta devido ao comportamento gradual do desgaste. Conforme mostrado na Figura 2.24, o desgaste da ferramenta no processo de furação é o resultado da ação de vários fenômenos distintos e ocorre em diversas áreas como nas superfícies principais de folga, nas superfícies de saída do cavaco, na aresta transversal, nas pontas de corte e guias laterais da broca na aresta secundária de corte.

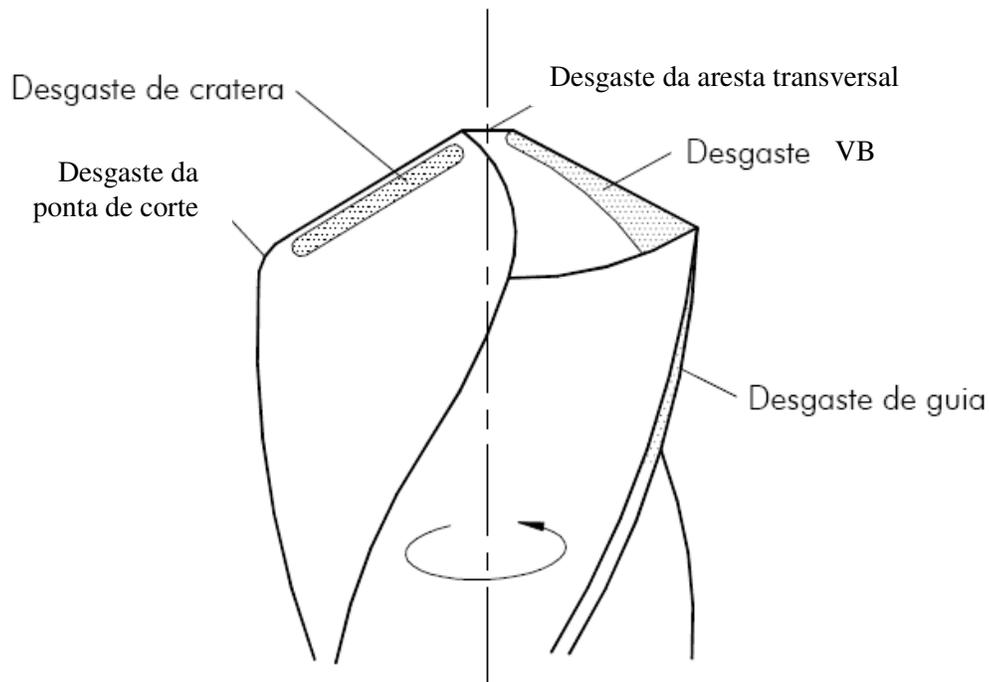


Figura 2.24 - Desgaste de uma broca helicoidal (KÖNIG, 1997 apud CASTILLO, 2005).

O desgaste na broca helicoidal apresenta algumas características significativas:

- desgaste VB: aumenta imprecisões dimensionais e atrito;
- desgaste de cratera: remoção de material por abrasão e difusão;
- desgaste de guia: não gera aumento do momento;
- desgaste da aresta transversal: arredondamento da ponta e possível lascamento das zonas de transição, e
- desgaste na ponta de corte: variação dimensional e de forma do furo.

Alguns autores definem o desgaste sob três formas diferentes: VB, Kb e VBF (Figura 2.25) (STEMMER I, 2005).

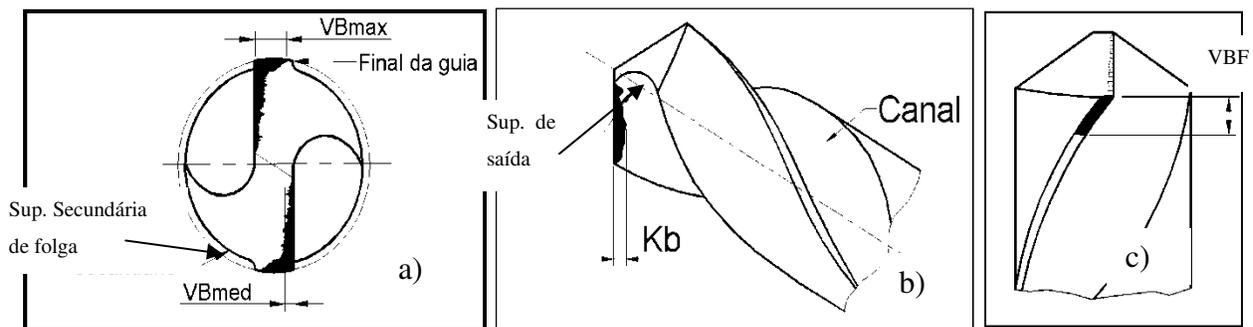
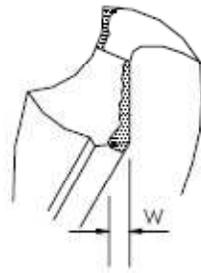


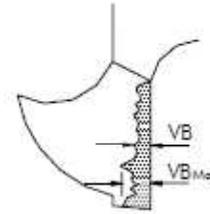
Figura 2.25 - Tipos de desgaste **a)** VB (desgaste da aresta principal na superfície principal de folga); **b)** Cratera Kb; **c)** VBF (desgaste na aresta secundária de corte) ou guias (BORK, 1995 apud BOSSARDI, 2008).

Em situações práticas, o tempo em que uma ferramenta de corte perde sua capacidade de produzir peças com dimensões e qualidades superficiais desejadas determinam seu fim de vida (MATTES, 2009).

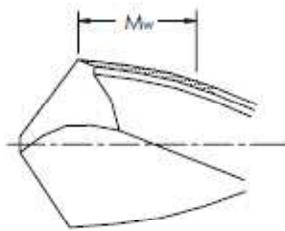
Ainda conforme Castillo (2005) pode ter seis tipos diferentes de desgastes (Figura 2.26):



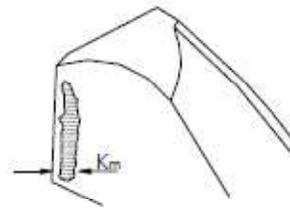
Desgaste da ponta de corte



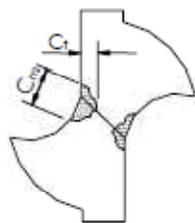
Desgaste da aresta de corte



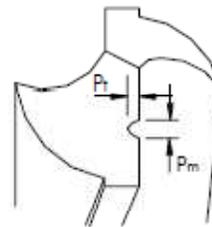
Desgaste de guia



Desgaste de cratera



Desgaste da aresta transversal



Lascamentos da aresta de corte

Figura 2.26 – Tipos de desgaste de brocas (KANAI, 1978 apud CASTILLO, 2005).

O desgaste de cratera corresponde à dimensão K_m , a qual é a medida do ponto mais afastado do lado oposto da cratera em relação a aresta de corte. Ocorre na superfície de saída da ferramenta, tendo como origem o atrito cavaco / ferramenta. Pode provocar o enfraquecimento da aresta de corte da ferramenta e rompimento da mesma, ocasionando seu fim de vida.

A ferramenta de furação requer elevada resistência aos esforços mecânicos que aceleram seu desgaste e reduzem sua utilização devido ao desgaste chamado de desgaste da aresta transversal. O desgaste da aresta transversal pode ser medido em relação a aresta de corte (altura) C_t , e em relação a aresta de corte (largura) C_m , conforme Figura 2.26. Também é conhecida pela sigla VBQ é uma sigla traduzida do alemão que significa: desgaste na aresta transversal - *Verschleissmarkenbreite auf die Querschneid* (NOVASKI, 1996).

O desgaste da broca ocorre principalmente ao longo da aresta de corte principal conforme Figura 2.27. Também chamada comumente como desgaste frontal ou flanco, aqui foi chamado de desgaste VB. Ocorre na superfície de folga principal da ferramenta. É originado pelo atrito entre ferramenta peça na zona primária de corte e normalmente ocorre em todas as condições de usinagem. A medida final do desgaste é, normalmente, considerada como o resultado da média do desgaste das arestas de corte. O desgaste da aresta principal de corte na superfície principal de folga conhecido pela sigla VB é considerado o desgaste de maior grandeza nas arestas de corte. É uma sigla traduzida do alemão que significa: desgaste nas arestas principais de corte - *Verschleissmarkenbreite* (NOVASKI, 1996).

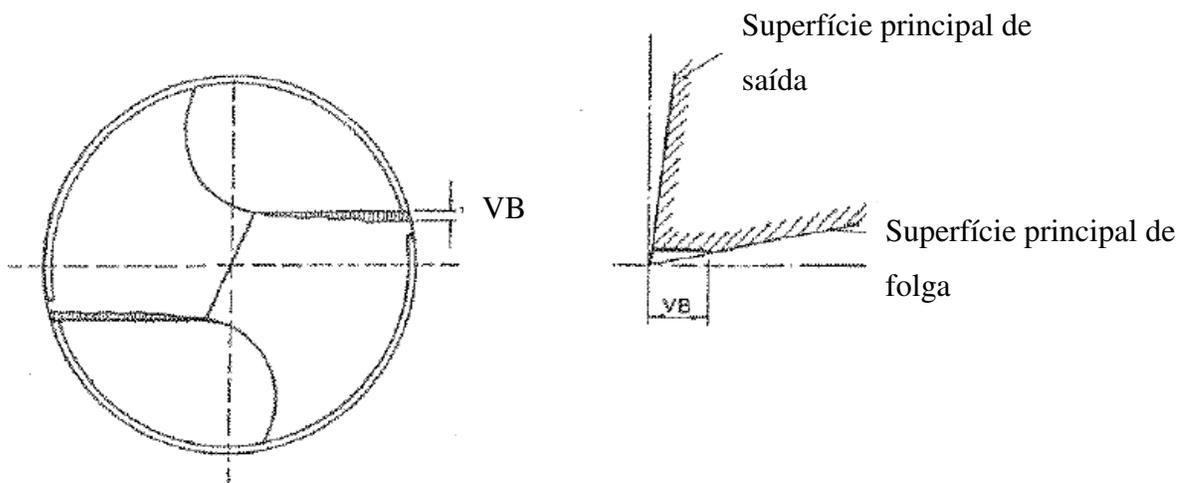
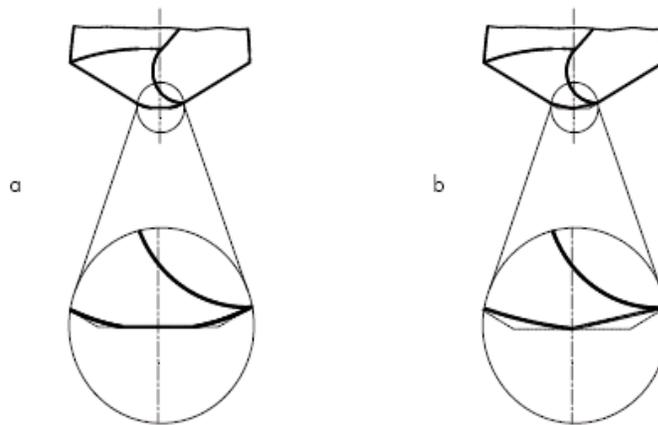


Figura 2.27 - Representação do Desgaste VB, da aresta principal de corte (NOVASKI, 1996).

Uma das zonas mais críticas da broca é a zona da aresta transversal, onde ocorrem danos a partir do primeiro contato com o material a usinar. As grandes solicitações mecânicas, ao mesmo tempo em que as velocidades de corte que nesse ponto tendem a zero, levam a um desgaste progressivo pelo esmagamento do material. Estes esforços podem causar lascamentos e conseqüente destruição da aresta transversal, podendo provocar caldeamento da ferramenta e quebra da mesma (MATTES, 2009) (Figura 2.28).

Quando o desgaste na aresta transversal é maior que o das arestas principais de corte, existe então, uma indicação do uso de um avanço acima do desejado (FERRARESI, 1977 apud NOVASKI, 1996; MIRANDA, 2003).



a) Desgaste da aresta transversal;

b) Arredondamento da aresta transversal

Figura 2.28 - Desgaste da aresta transversal (SCHROETER, 1999 apud CASTILLO, 2005).

2.2.7 Materiais para brocas

As condições severas de trabalho de uma broca fazem exigências especiais ao material da ferramenta, quanto à sua dureza, tenacidade e resistência ao desgaste e à insensibilidade à temperaturas alternantes. Como o aço rápido, até certo ponto, preenche essas exigências e, além

disto, é um material de fácil reprocessamento, ele é um dos materiais mais empregados para a fabricação de brocas.

Brocas maciças de metal duro e brocas com pastilhas soldadas ou fixadas por parafusos ainda não conseguiram eliminar as aplicações com brocas de aço rápido (SCHROETER E WEINGAERTNER, 2002). Mesmo assim, na fabricação moderna, o uso de brocas maciças de metal duro é cada vez mais freqüente em relação ao aço rápido. As vantagens do metal duro são sua boa homogeneidade, decorrente do processo de fabricação por metalurgia do pó, a elevada dureza, resistência à compressão e resistência ao desgaste a quente. O metal duro apresenta uma dureza à 1000° C idêntica à do aço rápido à temperatura ambiente (FERRARESI, 1977).

Estas características positivas deste material permitem que no emprego de brocas maciças de metal duro se tenha um aumento de produtividade considerável. Geralmente pode-se aumentar a velocidade de corte em até três vezes. Além disto, pode-se aumentar o avanço em até 30%. Além destes aumentos possíveis nas condições de corte a profundidade total de furação pode ser ampliada por 3 vezes.

Devido à dureza elevada e por causa da menor tenacidade em relação ao aço rápido, o emprego de brocas maciças de metal duro só faz sentido e é econômico em máquinas ferramentas que preencham condições mínimas de precisão, potência de acionamento, refrigeração e rigidez. Um exemplo para as exigências de precisão é o batimento no processo de furação. O batimento global, medido nas arestas de corte da broca, se compõe da soma dos batimentos da árvore, da interface, do mandril e da ferramenta. A maior parte deste batimento na prática industrial é de responsabilidade do sistema de fixação da ferramenta (SCHROETER E WEINGAERTNER, 2002). Se exigências mínimas não podem ser garantidas, as brocas de aço rápido, mais baratas, continuam sendo utilizadas.

A experiência mostra que a furação com brocas helicoidais não deve ser incluída nos processos que levam a uma qualificação boa da superfície. Comparando o processo de furação com o torneamento, verifica-se que a furação com brocas helicoidais leva a uma rugosidade grande na parede do furo, como consequência da velocidade de corte relativamente baixa e da pequena resistência à torção e flexão da ferramenta (SCHROETER E WEINGAERTNER, 2002).

A qualidade do furo é melhor com brocas de metal duro que nos furos obtidos com brocas de aço rápido. Os motivos para esta melhora na qualidade são a maior velocidade de corte e a

maior rigidez do metal duro. Esta última propriedade citada minimiza a expansão radial e as vibrações torcionais da ferramenta (SCHROETER E WEINGAERTNER, 2002).

2.2.8 Mecanismos causadores do desgaste das ferramentas

Devido às solicitações térmicas e mecânicas elevadas, o desgaste da ferramenta se desenvolve relativamente rápido. Diversos são os mecanismos causadores de desgaste que agem simultaneamente na ferramenta, em alguns casos não é possível serem distinguidos entre si.

Desgaste de ferramenta durante o corte não somente diminui a vida da ferramenta, mas, também, leva a deterioração da qualidade da peça, induz tensões residuais e alterações de microestrutura, etc. A condição tribológica da interface cavaco-ferramenta é controlada pelo crescimento da interface, que origina a adesão e fricção. Adesão se define como uma medida da resistência ao escoamento da interface, isto é, a tensão necessária para comprimir as asperezas e conduzi-las ao estado plástico e está associada à ocorrência da aresta postiça de corte (APC). Fricção é uma medida da resistência ao cisalhamento da interface, isto é, a tensão necessária para cisalhar as asperezas causando movimento relativo na interface. Desgaste abrasivo predomina, quando as condições na interface cavaco-ferramenta são de escorregamento causando geralmente o desgaste na aresta de corte VB (AMORIM, 2002).

Segundo Trent (2000), esses mecanismos de desgaste podem ser gerados por uma ou por várias combinações de mecanismos de desgaste: aresta postiça de corte, deformação plástica, adesão, difusão, abrasão ou oxidação. O desgaste depende de muitos fatores: do material da peça, do tipo de operação de usinagem, condições de corte, geometria da ferramenta e o uso de lubrificantes.

A taxa de desgaste por atrito não é diretamente relacionado com a dureza da ferramenta, o mais importante fator é o tamanho do grão, ligas de metal duro com grãos finos são mais resistentes que grãos maiores (TRENT, 2000).

Os principais mecanismos de desgastes são: abrasão mecânica, aderência, difusão, oxidação (DINIZ et al., 2006; FERRARESI, 1977; MICHELETTI, 1980). Na Figura 2.29 são mostradas as causas de desgastes na usinagem em função da temperatura de corte.

Por maior que seja a dureza e a resistência ao desgaste das ferramentas de corte, e por menor que seja a resistência mecânica da peça trabalhada, a ferramenta de corte sofrerá desgaste (MACHADO, 1999 apud PAIVA JUNIOR, 2007) conforme explicado a seguir:

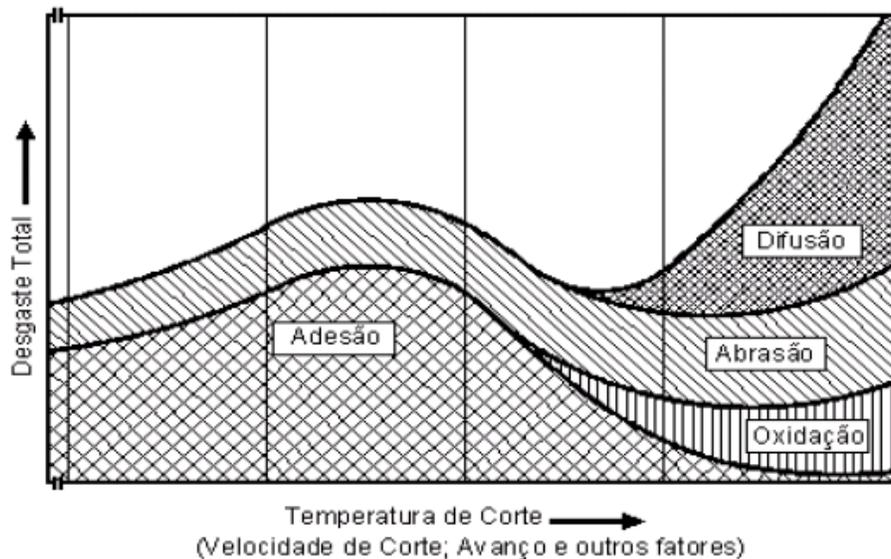


Figura 2.29 - Causas de desgaste na usinagem (KÖNIG, 1997 apud BOSSARDI, 2008).

- **Abrasão mecânica**

A abrasão mecânica é uma das principais causas de desgastes da ferramenta. O desgaste da aresta principal de corte VB na superfície principal de folga e o desgaste de cratera na superfície de saída, podem ser gerados pela abrasão, porém, o desgaste VB é mais intenso, já que a superfície de folga atrita com um elemento rígido que é a peça, enquanto que a superfície de saída atrita com um elemento flexível e ou fragmentado que é o cavaco. A presença de carbonetos em peças de ferro fundido ou de partículas de areia, provenientes do molde de fundição, são especialmente nocivas para a vida da ferramenta. A abrasão mecânica é gerada pela presença de partículas duras no material da peça e pela temperatura de corte. Isto faz com que a dureza da ferramenta diminua (STEMMER I, 2005; CASTILLO, 2005). Abrasão mecânica é o arrancamento de finas partículas de material, como consequência do atrito sob alta pressão e temperatura entre a peça e a ferramenta. Esta forma de desgaste se torna mais intensa com o aumento do número de inclusões e partículas duras no material usinado, carbonetos e óxidos (MATTES, 2009).

O grão fino eleva a resistência à abrasão e pode reduzir a rugosidade da ferramenta e, conseqüentemente, reduz a formação da aresta postiça de corte (APC) (FERRER, 2006). Nos casos em que o material de trabalho contém partículas duras, tais como na superfície das peças fundidas, o desgaste por abrasão acontece iminentemente. Sob condições de deslizamento na interface peça/ferramenta, onde a aderência acontece em forma intermitente, a abrasão pode ocupar um papel mais importante que sob condições de completa aderência (TRENT, 2000 apud FERRER, 2006).

- **Difusão**

A difusão entre ferramenta e cavaco é um dos fenômenos microscópios ativados pela temperatura na zona de corte. A difusão no estado sólido consiste na transferência de átomos pertencentes de um material para o outro, constituídos de elementos que apresentam afinidades entre si (DINIZ et al., 2006; FERRARESI, 1977).

Estas reações químicas, no caso do metal duro, formam carbonetos complexos (Fe WC_{26}), que são menos resistentes e rapidamente removidos por abrasão.

A difusão é responsável principalmente pelo desgaste de cratera em altas velocidades de corte, já que é na superfície de saída da ferramenta que se têm condições necessárias para a difusão, isto é, alta temperatura e tempo de contato cavaco-ferramenta.

- **Oxidação**

Segundo Diniz (2006), a oxidação ocorre em altas temperaturas e na presença de ar e água (contidas nos fluídos de corte), que geram oxidação para a maioria dos metais. O tungstênio e o cobalto formam durante o corte filmes de óxidos porosos sobre a ferramenta, que são levados pelo atrito, gerando desgaste.

Os materiais de ferramenta que não contém óxido de alumínio desgastam-se mais facilmente por oxidação. Este tipo de desgaste gerado pela oxidação forma-se especialmente nas extremidades do contato cavaco-ferramenta, devido ao acesso do ar nesta região, sendo esta uma possível explicação para o surgimento de desgaste de entalhe (DINIZ et al., 2006; FERRARESI, 1977).

- **Adesão**

A aderência é formada por duas superfícies metálicas quando em contato sob cargas moderadas, ou seja, baixas temperaturas e baixas velocidades de corte. Forma-se entre elas um extrato metálico que causa a aderência.

O fenômeno da aderência está presente na formação da aresta postiça de corte, mas pode-se ter desgaste por aderência sem a formação da aresta postiça (DINIZ et al., 2006; FERRARESI, 1977).

- **Lascamento**

É resultante da quebra de pequenos fragmentos da aresta principal de corte durante a operação, ocorrendo quando o limite de resistência do material da ferramenta é ultrapassado em áreas localizadas devido a vibrações ou impactos. Ao contrário dos desgastes na aresta principal de corte VB e de cratera, que retiram continuamente partículas muito pequenas da ferramenta, no lascamento as partículas maiores são retiradas de uma só vez. Este tipo de problema ocorre principalmente em ferramentas com material frágil e/ou quando a aresta de corte é pouco reforçada.

- **Fissuras transversais, longitudinais ou em forma de pente**

Surtem durante o corte interrompido, onde a aresta principal de corte da ferramenta é submetido a solicitações térmicas e mecânicas alternadas.

- **Deformação plástica da aresta de corte**

É um tipo de avaria da ferramenta (DINIZ et al., 2006; FERRARESI, 1977). A pressão aplicada à ponta da ferramenta, somada com a alta temperatura, gera deformação plástica da aresta de corte. Tais particularidades provocam deformações na forma do cavaco e a deterioração do acabamento na superfície da peça. A aresta de corte é deformada plasticamente se a ferramenta dispõe de uma resistência à deformação muito pequena, mas tem uma tenacidade suficiente.

- **Desgaste por aderência e arrastamento- *attrition***

Este mecanismo ocorre, geralmente, em baixas velocidades de corte, onde o fluxo de material sobre a superfície de saída da ferramenta se torna irregular. A aresta postiça de corte pode aparecer, e se ela for instável o contato com a ferramenta se torna menos contínuo. Sob estas condições, fragmentos microscópios são arrancados da superfície da ferramenta e arrastados junto ao fluxo de material. Em geral, a zona de escorregamento, o corte interrompido, profundidade de corte variável, entre outros, promovem o fluxo de material e, portanto, favorecem a participação do mecanismo de desgaste por *attrition*. Como este mecanismo se processa em nível de grãos, no microscópio, as áreas desgastadas por *attrition* têm uma aparência áspera (MACHADO, 2009 apud DA SILVA, 2010).

2.2.9 Características da broca de canal reto

Pouco estudada e de baixa utilização no mercado, quando comparada com a broca helicoidal, a broca de canal reto apresenta número crescente de usuários quando se detecta certas peculiaridades do processo de furação em empresas usinadoras.

São projetadas para furação em cheio e caracterizam-se por uma boa resistência à torção. As brocas de canais retos são utilizadas principalmente para furação profunda de ferros fundidos e ligas de alumínio, sendo seu uso limitado a furos de 15 vezes o diâmetro de comprimento (STEMMER I, 2005).

A broca de canal reto assemelha-se à broca-canhão, por possuir cortes retos e canais de refrigeração, porém difere-se daquela por apresentar duas arestas de corte, dois canais, guias duplas e ser inteiriça em metal duro.

O uso de brocas de canal reto é indicado para materiais de cavacos curtos, como o ferro fundido e normalmente gera um bom alinhamento e acabamento do furo produzido.

Uma vantagem relevante da broca de canal reto sobre a broca helicoidal reside na sua maior resistência à torção, pois esta última tende a “desenrolar-se” quando solicitada durante a operação de furação. Comparada com a broca espiral de metal duro, a alta resistência a torção da broca de canal reto permite aumentar a velocidade de corte.

Para furação profunda, em condições instáveis e HSC (*high speed cutting*), recomenda-se uso de brocas de canal reto com ângulo de saída negativo, a fim de prevenir vibrações, comuns neste tipo de operação. Além disto, brocas com o ângulo de saída negativo atingem melhores valores de qualidade do que aquelas cujo ângulo mencionado é nulo, quando em furação profunda, (GUHRING, 1996 apud GOMES, 2009).

Os processos de furação com relações de profundidade L do furo e diâmetro D da ferramenta maiores do que cinco ($L/D > 5$), são denominados de processos de furação profunda (DINIZ et al., 2006).

As brocas de canais retos possuem uma geometria característica, com algumas variações em relação às brocas helicoidais. A geometria de uma broca de canal reto é resumida na Figura 2.30. Observa-se que o ângulo de saída para a broca de canal reto é nulo ($\gamma_f=0^\circ$).

Broca de canais retos

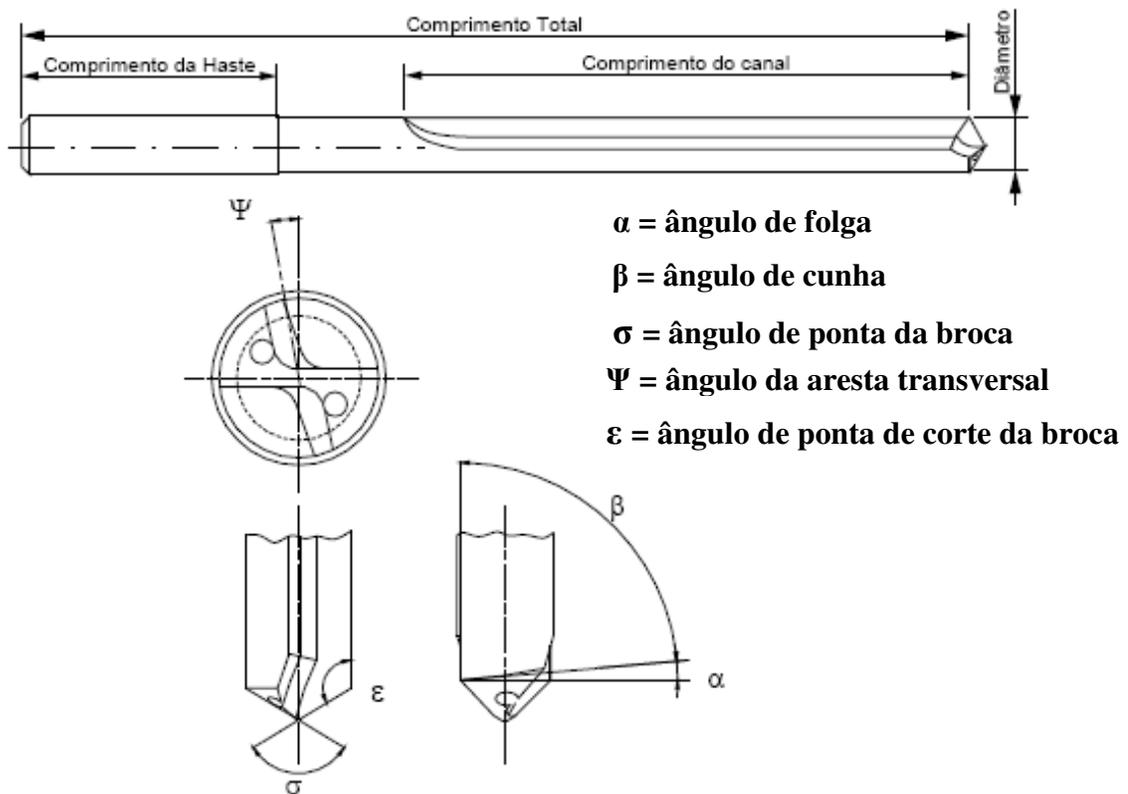


Figura 2.30 – Geometria de broca de canais retos (STOETERAU, 2010).

Devido à sua maior rigidez, as brocas de canal reto apresentam bons resultados de erros de forma (circularidade e cilindridade), segundo fabricante de ferramentas.

2.2.10 Desvios de fabricação na furação

Não é possível fabricar peças sem variação dimensional. Tanto nos processos de furação como nos de usinagem de forma geral, a falta de rigidez da máquina ferramenta, do dispositivo de usinagem, a perda da aresta cortante de uma ferramenta e outros fatores influenciam diretamente a

qualidade final da peça e acabam por provocar desvios dimensionais, de forma e posição (AGOSTINHO et al.,1977; NOVASKI, 1994).

A precisão de qualquer furo produzido por furação depende de muitos fatores, incluindo o processo utilizado, a peça e a máquina usadas, parâmetros de usinagem e a rigidez do conjunto utilizado. A precisão é também dependente da geometria da ferramenta utilizada (KONIG, 1997 apud CASTILLO, 2005).

Para a obtenção de furos aceitáveis devem-se seguir tolerâncias, as quais podem ser de forma e dimensionais. As tolerâncias dimensionais estão relacionadas com a medida de diâmetro nominal e a medida real encontrada no furo, e as tolerâncias de forma estão relacionadas com a geometria dos furos (MATTES, 2009).

Para furação têm-se:

a) Desvios de forma- definidos como o grau de variação das superfícies reais com relação aos sólidos geométricos que os definem teoricamente, tais como retas, planos, círculos, cilindros, perfis e superfícies (MIRANDA, 2003; AGOSTINHO et al.,1977).

São classificados como desvios *macrogeométricos*, dentre os mais significativos para furação, tem-se circularidade, cilindridade, planeza, retineidade, etc. (NOVASKI, 1994).

- Circularidade (Figura 2.31): as conhecidas ovalizações, ou seja, as diferenças do círculo real para o círculo teórico esperado no processo de fabricação. Esses desvios são comuns por má fixação da peça a ser usinada (CORRÊA, 1996).

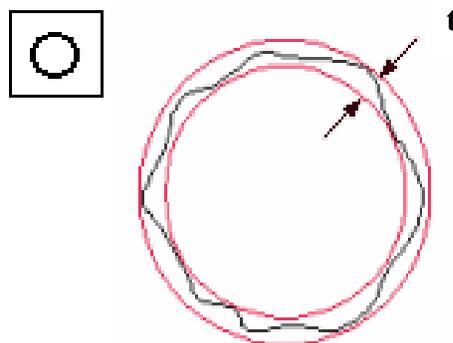


Figura 2.31 – Representação da Tolerância t de circularidade.

Segundo Corrêa (1996) normalmente a tolerância de circularidade para furos a partir de IT 9 (qualidade ISO de rugosidade superficial) deve ser igual à metade da tolerância de fabricação (dimensional).

Ocorrem quando a seção circular de um furo é distorcida em relação à forma ideal. Formas tais como triangular, irregular ou oval são comumente observadas. A precisão dos mancais do fuso e a afiação da ferramenta são essenciais para a minimização destes erros. O erro de circularidade pode ser também reduzido aumentando a taxa de avanço e usando uma ferramenta com um corpo rígido (WICK, 1988, apud BOSSARDI, 2008).

- Cilindricidade (Figura 2.32): são as diferenças de circularidade através de uma seção do cilindro por um plano perpendicular à geratriz. Ocorrem na furação profunda, quando a superfície a ser furada está fixada inadequadamente ou existe diferença de comprimento das arestas de corte (CORRÊA, 1996).

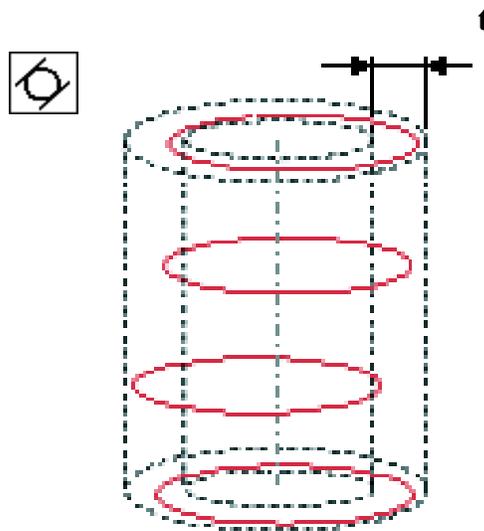


Figura 2.32 – Representação da Tolerância t de cilindridade.

É uma característica geométrica com uma tolerância entre dois cilindros que possuem características geométricas coaxiais e é considerada como correto se a diferença entre as distâncias radiais for igual ou menor do que a tolerância especificada (MITUTOYO, 2005 apud BOSSARDI, 2008).

b) Desvios de posição- são definidos como o grau de variação entre as diversas superfícies reais com relação ao seu posicionamento teórico. Exemplo: perpendicularidade, paralelismo, coaxialidade, ovalização, conicidade, excentricidade, ângulos, simetria e posicionamento (AGOSTINHO et al.,1977).

c) Desvios dimensionais- são as diferenças para mais ou para menos da medida nominal de uma peça indicada no desenho. Na verdade, devido à impossibilidade prática da obtenção seqüencial de valores nominais de medida, estabeleceu-se limites admissíveis de uma medida, com valores mínimos e máximos, as tolerâncias, como são conhecidas (CORRÊA, 1996).

A variação dimensional entre peças de um mesmo lote são influenciadas pela máquina ferramenta, o dispositivo de fixação e localização da peça, o sistema de fixação da ferramenta de corte, as peças em bruto e o ambiente de trabalho. Todos estes fatores variam continuamente, conduzindo a variação no processo de fabricação e conseqüentemente nas dimensões finais das peças fabricadas (AGOSTINHO et al., 1977).

Na furação os desvios (erros e imperfeições) podem variar de diversas maneiras dependendo das condições do processo, como ilustra a Figura 2.33.

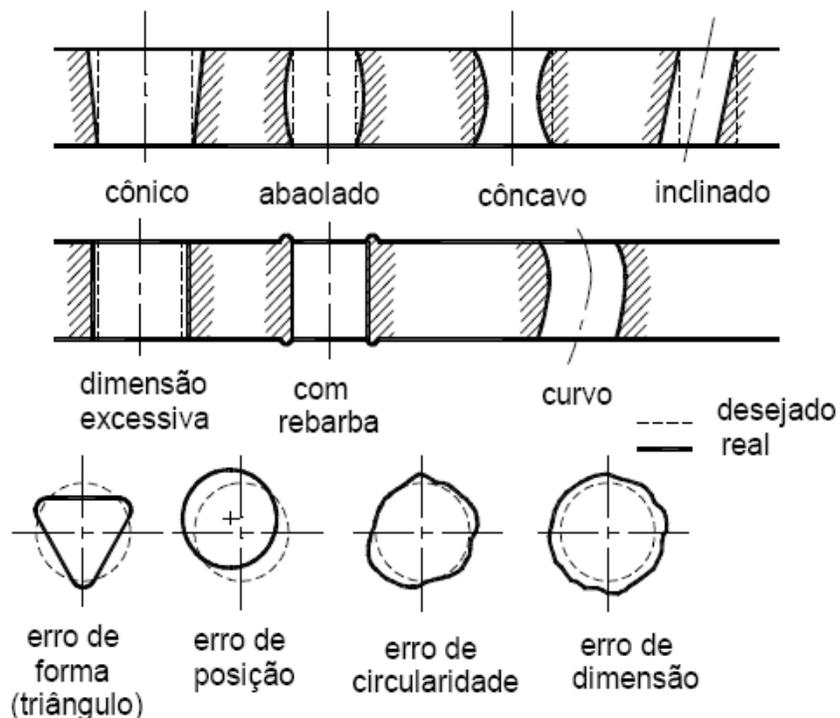


Figura 2.33 - Erros comuns no processo de furação (KÖNIG, 1997 apud CASTILLO, 2005).

d) Desvios microgeométricos: mais conhecido como rugosidade de superfícies (NOVASKI, 1994). Definem-se como a totalidade de todas as diferenças da superfície ideal geométrica da peça em questão. Nos processos de furação convencionais a grandeza de valores esperados varia de 1,60 a 6,30 Ra (μm) (FERRARESI, 1977).

A qualidade que deve ser ligada a classe correspondente deve levar em consideração as máquinas operatrizes, dispositivos de usinagem, ferramenta de corte disponíveis para a usinagem. Genericamente pode-se classificar para o processo de furação a qualidade IT 10 a IT11, (AGOSTINHO et al., 1977).

Classes IT são qualidades da norma ISO (International Organization for Standardization) de rugosidade superficial que poderão ser obtidas por diferentes processos de usinagem. A faixa varia de IT1 para lapidação ou superacabamento a IT11 para furação (FERRARESI, 1977).

2.2.11 Furação em ferro fundido

Para a furação de materiais de difícil usinagem, tais como o ferro fundido, foram desenvolvidas novas geometrias que facilitam a remoção dos cavacos da área de corte e reforçam as arestas e pontas da broca. Estas brocas com novas geometrias possuem além da aresta transversal de corte afinada pela afiação em cruz, pequenos chanfros nas extremidades das arestas de corte ou ainda a ponta de corte em forma de raio. Estas novas afiações para brocas ganharam impulso com o desenvolvimento das máquinas de comando numérico, uma vez que estas afiações exigem geometrias complexas com estreita tolerância geométrica e dimensional (DINIZ et al., 2006).

O ferro fundido é menos resistente do que o aço, contudo, deve ser usinado com ângulo de saída menor, isto porque a pressão exercida pelo cavaco sobre a ferramenta se dá mais próxima da aresta de corte que na usinagem do aço (cavaco longo). Por isso a cunha de corte deve ser menos aguda (STEMMER I, 2005).

Materiais que serão usinados com dificuldade deslocam a zona de maior pressão para próximo a aresta de corte da ferramenta, exigindo um menor ângulo de saída, como por exemplo: ferro fundido e suas ligas, aço inoxidável, aços rápidos e aços ferramenta recozidos etc. O

comprimento de contato cavaco-ferramenta é pequeno, logo espessura do cavaco (h) é pequena, a força de corte (F_c) é baixa, logo a potência (P_c) é baixa.

Os flocos de grafita, que podem ser largos e ocupar uma área apreciável na extensão dos planos de cisalhamentos, também contribuem para reduzir a força de corte F_c , ver Tabela 2.2.

Tabela 2.2 - Forças de corte medidas durante a usinagem de ferro fundido perlítico com flocos de grafita, comparado com aço médio carbono, numa operação de torneamento (TRENT, 2000).

Forças de corte em Ferro Fundido / Aço médio carbono				
v_c (m.min ⁻¹)	Ferro fundido		Aço médio carbono	
	F_c (N)	F_f (N)	F_c (N)	F_f (N)
30	222	232	520	356
61	245	285	490	364
91	245	320	445	325
122	267	338	422	313

Avanço f : 0,16mm.rev⁻¹

prof.corte: 1,25mm

Segue algumas características de usinabilidade dos FoFos:

1) Nota-se que as forças de avanço (F_f) dos FoFos são maiores que as forças de corte, e próximas dos valores de (F_f) para os aços conforme Tabela 2.2. Isto pode ser frequentemente constatado na usinagem dos FoFos cinzentos e a melhor explicação para o fato é a constatação de menor quantidade de deformação plástica no plano primário (onde acontece a deformação plástica do material, dando origem ao cavaco), que no plano secundário de cisalhamento (onde o lado inferior do cavaco já formado se movimenta sobre a superfície de saída da ferramenta). A usinagem dos aços não apresenta os mesmos resultados, isto é, as forças de corte são normalmente maiores que as forças de avanço.

2) Os FoFos de baixa resistência (ferrita + grafita) são os que apresentam melhores características de usinabilidade e permitem velocidade de corte (v_c) mais altas.

3) Para os FoFos perlíticos as velocidades de corte são menores e decrescem com aumento de dureza e resistência.

4) A maioria dos FoFos são ferríticos ou perlíticos e a usinabilidade vai depender da resistência e da ductilidade (ou fragilidade).

5) A grafita é considerada um lubrificante sólido, inibindo a aderência, embora não exista evidências claras que ela promova sua eliminação por completo.

6) A APC (aresta postiça de corte) se forma a baixas velocidades e ela persiste a velocidades maiores que quando usinando os aços (TRENT, 2000).

7) A velocidades de corte mais altas, a APC desaparece e o desgaste de cratera por difusão pode tornar um problema maior. Neste caso, deve-se usar um metal duro com granulação fina, contendo adições de Carboneto de Titânio (TiC) e Carboneto de Tântalo (TaC).

8) Ferramentas de metal duro revestidas permitem maiores velocidades de corte e vida mais longas das ferramentas.

9) A distribuição de temperatura nas ferramentas de corte difere daquelas usadas para usinar aços. Como o cavaco não é contínuo a máxima temperatura é observada bem próxima a aresta de corte. Assim, a velocidade de corte máxima é limitada pela deformação plástica por compressão (TRENT, 2000).

10) O desgaste que predomina é por *attrition* e abrasão, e quanto mais fino os grãos de metal duro da classe K, maior a vida da ferramenta (Figura 2.34). A redução do tamanho do grão resulta numa melhora das propriedades do material, um aumento de dureza, resistência ao desgaste e tenacidade da ferramenta (DINIZ, 2006; OLIVEIRA, 2008).

Para a usinagem de ferros fundidos as ferramentas de metal duro de classe K são mais utilizadas, e a vida é geralmente limitada pelo desgaste VB. À velocidades de corte relativamente baixas (mas maiores que quando usinado aços) uma APC se forma e ela é mais estável e se destaca da ferramenta com uma frequência menor que a APC dos aços. Nestas condições, o desgaste por *attrition* geralmente prevalece. Às altas temperaturas ou em altas taxas de remoção do material, a APC desaparece e a cratera e o desgaste na aresta de corte na superfície de folga se desenvolvem normalmente, por abrasão e difusão. A maior temperatura é observada na região próxima à aresta de corte, que em combinação com altas tensões de compressão limitam a taxa de remoção de material, devido à deformação plástica da aresta de corte, (MACHADO et al., 2009 apud DA SILVA, 2010).

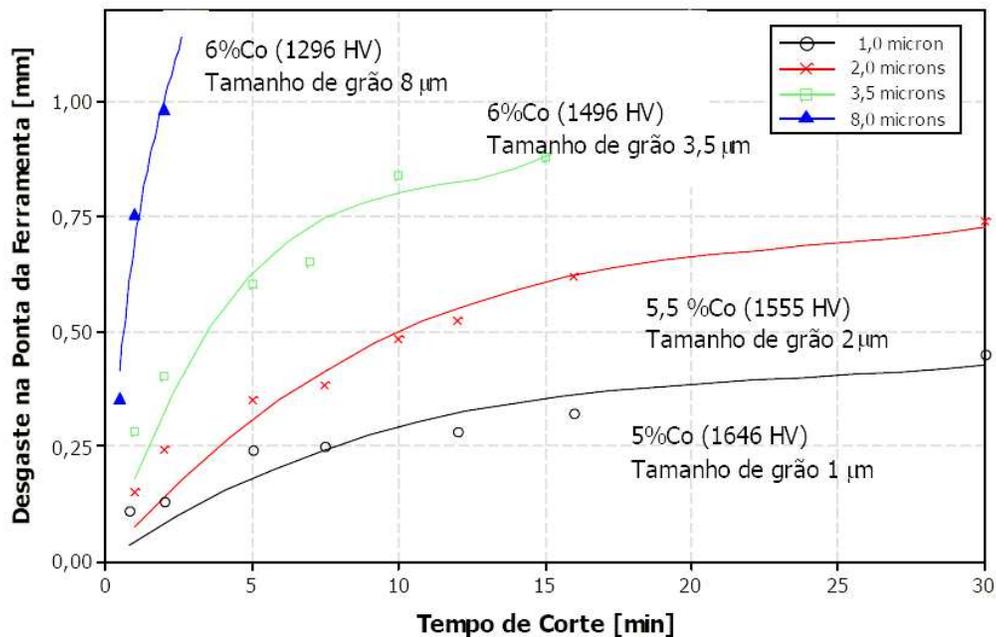


Figura 2.34 - Desgaste na ponta em ferramentas de metal duro com diferentes tamanhos de grão no corte de ferro fundido numa operação de torneamento (TRENT, 2000; OLIVEIRA, 2008).

11) Os ferros fundidos com grafita (cinzento, nodular, vermicular) são considerados materiais de boa usinabilidade, porém apresentam diferenças entre si. Os melhores resultados de usinabilidade são obtidos com os ferros fundidos cinzentos. Estes materiais apresentam grafita (cerca de 10% em volume) em forma de veios, o que facilita a ruptura do cavaco. De um modo geral, a usinabilidade decresce à medida que se caminha para classes de maior resistência, devido ao aumento da quantidade de perlita na matriz.

12) Em ferro fundido cinzento com matriz perlítica, as melhores condições de ruptura do cavaco são verificadas com grafita tipo A e matriz de perlita grosseira, que correspondem a boas condições para propagação de trincas à frente da região de geração do cavaco. Outra característica importante é a presença de sulfeto de manganês (cerca de 0,5% em volume), partícula que atua como lubrificante na interface ferramenta/cavaco, e que está presente nos ferros fundidos cinzentos.

Na usinagem de metais e ligas como ferro fundido, origina-se um cavaco curto. Com este comportamento dos materiais sob usinagem, a principal causa do desgaste das ferramentas de metal duro é o atrito que se desenvolve na superfície principal de folga, a medida que se processa a usinagem. (CHIAVERINI, 2005).

O desgaste por abrasão ocorre como resultado da presença de partículas duras na interface cavaco-ferramenta, a medida que o cavaco se move sobre a superfície da ferramenta desgastando-a por ação mecânica. As partículas duras podem ser provenientes da peça ou da ferramenta.

As formas de desgaste das ferramentas dependem essencialmente do tipo da ferramenta, material usinado, das condições de corte e do tipo de usinagem (NOVASKI, 1991).

Segundo König (1977) apud Bossardi (2008) as características de usinabilidade dos ferros fundidos variam conforme a quantidade e forma da grafita. A presença da mesma reduz o atrito entre ferramenta e peça, diminuindo a estrutura básica metálica. Conseqüentemente gera uma melhor usinabilidade comparando-se aos aços e ferros fundidos sem grafita.

Não só a grafita, mas a estrutura básica metálica dos ferros fundidos também exerce uma grande influência na usinabilidade. Aqueles possuem maior resistência e dureza, caracterizam-se predominantemente pelo aumento do teor de perlita, e com isso normalmente apresentam uma péssima usinabilidade (BOSSARDI, 2008).

2.2.12 Forças na furação

Após a determinação dos parâmetros de corte, velocidade de corte e avanço para a ferramenta devem ser verificados em relação à potência e ao momento disponíveis na árvore da máquina.

Caso a potência da árvore não seja suficiente deve-se reduzir a velocidade de corte. A redução da velocidade de corte além de um valor mínimo deve ser considerada para que seja evitada a faixa de formação de aresta postiça. Para esses casos a velocidade de corte mínima seria pré-fixada e reduções sucessivas seriam feitas pela redução do avanço reduzindo assim a potência requerida.

A cinemática do processo de furação ocorre da seguinte maneira: uma força F é aplicada perpendicular à superfície da peça com uma rotação. Auxiliada pela geometria da ferramenta, esta rotação imprime uma velocidade de corte (v_c) na ponta de corte da ferramenta, que impõe também a velocidade de saída de cavaco. A velocidade de avanço (v_f) é determinada pela força (F). A rotação, juntamente com a força (F), determina a velocidade efetiva de corte (v_e) (MARTINS et al., 2010).

Os principais fatores que influenciam as forças de corte são, (KÖNIG, 1997 apud CASTILLO, 2005; FERRARESI, 1977):

- Material da peça;
- Revestimento da ferramenta;
- Geometria da ferramenta de corte;
- Parâmetros de corte;
- Tipo e pressão do fluido de corte;
- Desgaste da ferramenta.

O estudo das forças aplicadas à broca durante a usinagem pode ser abordado considerando-se separadamente as seguintes ações (MICHELETTI, 1980; CASTILLO, 2005):

- Forças aplicadas às arestas principais;
- Forças decorrentes do atrito nas guias;
- Forças que atuam sobre a aresta transversal.

Uma broca é submetida aos esforços de compressão (força de avanço) e torção (momento torçor). Se os esforços em cada aresta de corte da broca não forem iguais, o que normalmente ocorre, aparecerá uma força resultante radial diferente de zero, que provoca uma flexão na broca, (CAPUANO, 2004).

A força de usinagem F que atua sobre as arestas principais durante a usinagem pode ser decomposta em três componentes: força de corte F_c , força de avanço F_f e força passiva F_p , como mostra a Figura 2.35.

Durante a furação há a interação de forças de avanço e de corte, conforme mostrado na Figura 2.35. A força F_p é uma componente da força de usinagem, causando uma sollicitação lateral na região espiral da ferramenta, no sentido de curvar a ferramenta. Quando da aplicação do esforço, a região em espiral está pressionada e tende a curvar-se. Brocas muito longas e de pequeno diâmetro ou pequena espessura de núcleo, sob sollicitação de tais esforços, podem desviar-

se durante a operação da concentricidade desejada, mesmo a baixas forças laterais, além da vibração iminente (GUHRING, 1996 apud GOMES 2009).

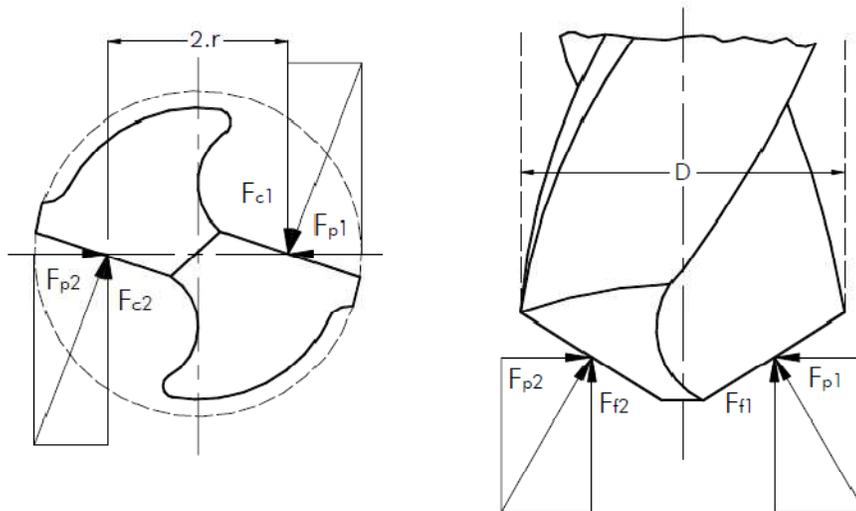


Figura 2.35 - Forças na broca helicoidal (Segundo: Spur) (SCHROETER E WEINGAERTNER, 2002).

Descrições das forças na furação:

a) Força de corte (F_c): corresponde à parcela da força de corte F_{c1} conforme Figura 2.35 que atua em cada uma das arestas de corte e é decorrente da resistência ao corte do material usinado, tendo grande influência sobre o momento torçor que atua na furação (STEMMER I, 2005).

b) Força de avanço (F_f): é a resultante da soma das parcelas das reações ao avanço da aresta de corte e da aresta transversal. Como a aresta transversal atua no sentido de extrudar material para as arestas principais, a parcela da respectiva força de avanço pode ser igual ou até mesmo maior que a força de avanço das arestas principais de corte. É importante conhecê-la para se ter certeza que o eixo da máquina é capaz de suportar a operação (CASTRO, 2001 apud CASTILLO, 2005). A força de avanço F_f é ocasionada pela resistência ao corte do material (penetração da ferramenta) no sentido do avanço. Esta força surge principalmente devido à ação da

aresta transversal, quando esta apresenta um corte deficiente. Segundo Castillo (2005), geralmente a aresta transversal tem uma contribuição ao momento torçor inferior a 2%, provoca o esmagamento do material, empurrando-o para a região das arestas principais. Sua influência à resistência ao avanço é muito maior, podendo alcançar valores da ordem de 50% (MICHELETTI, 1980; CASTILLO, 2005). Tais valores de resistência ao avanço estão influenciados pelo comprimento e pela inclinação da aresta transversal. Aumentando o comprimento deste, tem-se um incremento na força de avanço na furação do aço. Esse incremento é mais modesto no ferro fundido e praticamente nulo para ligas de alumínio e latão (MICHELETTI, 1980; CASTILLO, 2005).

c) Força passiva (F_p): atua em uma parcela da aresta principal. As forças passivas atuantes nas arestas tendem a se anular mutuamente. É desprezível quando comparada com as forças de corte e de avanço (CASTRO, 2001 apud CASTILLO, 2005). Contudo, para afiações assimétricas das arestas ou mesmo em brocas não-simétricas, tais como brocas canhão, BTA e Ejektor, essas forças são importantes. As forças passivas F_p atuantes nas duas arestas principais anulam-se mutuamente devido à simetria das arestas principais em relação ao eixo central. A falta de simetria pode ocasionar forças passivas de intensidades diferentes, que causam a flexão da broca durante o processo (KÖNIG, 1997 apud CASTILLO, 2005).

d) Momento torçor (M_t): as forças atuantes nas arestas principais da ferramenta são responsáveis pelo momento torçor, contribuindo entre 70 e 90% do valor do mesmo, (STEMMER I, 2005).

Na broca helicoidal uma força age sobre a região espiral, no sentido de que a broca seja extraída. A vantagem disto está no fato de que a força de extração age como uma pré-carga na região espiral, aumentando, portanto a estabilidade dinâmica da broca. Sendo assim, brocas muito longas e de pequenos diâmetros ou espessuras de núcleo somente apresentariam flexão quando sujeitas a altos esforços laterais e não mais sob valores baixos (GUHRING, 1996 apud GOMES, 2009).

Para velocidades de corte extremamente baixas ou extremamente altas, no entanto, tem-se um aumento considerável da força de avanço e do momento torçor, que é crítico para pequenos diâmetros de brocas.

As arestas principais de corte e a aresta transversal são as partes da broca com maior contribuição para a composição do momento torçor e força de avanço na furação em cheio (CAPUANO, 2004).

Pesquisas específicas mostraram que a qualidade superficial da parede do furo é pouco influenciada pelo tipo da afiação da ponta da broca. No entanto, a precisão de forma e de medida do furo depende basicamente da simetria da afiação da ponta, uma vez que com isto se obtém uma eliminação mútua dos componentes da força passiva de cada uma das parcelas da parte cortante da aresta principal (SCHROETER E WEINGAERTNER, 2002).

Pode ocorrer uma força radial que solicita a broca helicoidal e o fuso da máquina de forma estática à flexão, levando a um aumento concêntrico do diâmetro do furo, de forma que a precisão do furo é piorada. As forças radiais geralmente são decorrentes de imprecisões na afiação da aresta de corte, como:

- comprimentos desiguais da parcela cortante da aresta principal;
- ângulos de posição desiguais;
- ângulos de folga desiguais;
- assimetria da redução da aresta transversal;
- assimetria nos canais das hélices;
- diferenças da afiação nas partes cortantes da aresta principal, bem como
- erros de batimento circular (SCHROETER E WEINGAERTNER, 2002).

Segundo Schroeter e Weingaertner (2002) a comparação das forças na furação com as do torneamento (mantendo-se demais condições de contorno constantes) mostram que tem-se forças de corte e de avanço mais elevadas na furação. Este aumento é decorrente do atrito dos cavacos nas paredes da ranhura de saída dos cavacos e na parede do furo e decorrente ainda do comprimento da aresta transversal que influencia consideravelmente em sua relação com a aresta principal o valor das forças totais. Outra razão é que as velocidades de corte indicadas para a furação são consideravelmente menores do que indicadas para o torneamento. Quanto mais estreito for o espaço para os cavacos, mais aumenta o momento torçor e a força de avanço necessária. O aumento da força de avanço, em relação ao torneamento, é devido às parcelas de atrito das guias na parede do furo bem como aos fenômenos de extrusão na região da aresta transversal (SCHROETER E WEINGAERTNER, 2002).

Uma broca é submetida aos esforços de compressão (força de avanço) e torção (momento torçor). Se os esforços em cada aresta de corte da broca não forem iguais, o que normalmente ocorre, aparecerá uma força resultante radial, que provoca uma flexão na broca (CAPUANO, 2004).

2.2.13 Critério de fim de vida da ferramenta

Define-se vida de uma ferramenta o tempo que a mesma trabalha efetivamente (deduzidos os tempos passivos), até perder a sua capacidade de corte, dentro de um critério previamente estabelecido. A perda desta capacidade geralmente é avaliada pelo grau de desgaste da ferramenta (FERRARESI, 1977).

A vida da ferramenta depende do material da ferramenta, propriedades da peça a ser usinada, dos parâmetros de usinagem e o fluido de corte, conforme (NOVASKI, 1983). Também depende das condições da máquina e tipo de processo.

A vibração tem influência na vida da ferramenta, pois a cada “pulso” o esforço de corte é alterado, causando impacto nas arestas de corte, podendo gerar alguma avaria ou até a sua quebra (CAPUANO, 2004).

A vida da ferramenta é geralmente expressa em minutos, porém em certos casos, como exemplo na furação, prefere-se defini-la pelo percurso de avanço dado na Equação 2.7 (FERRARESI, 1977):

$$L_a = f \cdot n \cdot T \quad (\text{mm}) \quad (2.7)$$

Onde:

L_a = vida da ferramenta medida em percurso usinado, em mm;

T = vida da ferramenta, em minutos;

f = avanço, em mm/rotação;

n = rotação, em r.p.m.

À medida que a ferramenta vai se desgastando, observam-se variações no processo de usinagem. A temperatura se eleva progressivamente, a força de corte e a potência consumida aumentam, as dimensões da superfície se alteram e o acabamento da superfície piora. Em ferramentas de metal-duro, por exemplo, o aumento das forças de corte, no caso de um desgaste excessivo, provoca o lascamento e destruição total da aresta de corte. A utilização de uma ferramenta até este ponto é desaconselhável, pois será necessário um longo trabalho de reafiação com remoção de uma extensa camada de material, antes que se possa restabelecer uma aresta de corte adequado (STEMMER I, 2005).

Infelizmente, não existe uma única relação entre o desgaste da ferramenta, a qualidade e as dimensões da superfície usinada. Tentar medir o desgaste da ferramenta incrementaria os tempos não-produtivos. Por este motivo, em grandes produções industriais, como consequência das dificuldades de medição e interpretação dos desgastes, é adotado como critério de fim de vida o número de peças usinadas por afiação ou ferramenta. Tal número é definido através de teste inicial e deve ser empregado um fator de segurança, o que pode levar a custos adicionais de usinagem.

Em laboratórios, o critério muito utilizado é o desgaste, devido à facilidade de ser quantificado. O desgaste VB é freqüentemente utilizado como critério de fim de vida pela sua influência direta com a rugosidade da superfície do material usinado e as dimensões da peça. A escolha dos critérios de fim de vida depende de vários fatores, tais como exigências da usinagem (precisão de medidas, grau de acabamento), material da ferramenta, processo, etc., sendo os mais comuns (STEMMER I, 2005; FERRARESI, 1977):

- Falha completa da ferramenta;
- Falha preliminar da ferramenta;
- Largura da marca de desgaste VB;
- Vibrações intensas da peça ou da ferramenta;
- Profundidade da cratera;
- Deficiência no acabamento da superfície;
- Formação de rebarbas;
- Variação na forma dos cavacos;
- Alteração das dimensões da peça;
- Força de corte, torque ou potência;
- Aumento da força de avanço;

- Aumento da temperatura da aresta de corte.

Conforme Novaski (1989) os critérios para troca de ferramenta dependem do tipo de operação. Na operação de desbaste é comum utilizar como critério de fim de vida a forma do cavaco, ruído, desgaste da ferramenta, lascamentos visto com lupa, aumento das forças de usinagem e quebra. Na operação de acabamento o critério principal seria a rugosidade.

Os efeitos do desgaste podem levar ao fim de vida ou até ao colapso da ferramenta. O fim de vida é caracterizado pelo aumento progressivo do desgaste da ferramenta com o aumento da profundidade de furação, de forma que a partir de uma certa profundidade total o resultado de trabalho não corresponde mais às expectativas. O fim de vida absoluto é caracterizado pela inutilização total da ferramenta por queima da aresta de corte ou quebra da ferramenta.

Outros critérios de fim de vida, ainda muito utilizado, são as variações dimensionais e de forma que têm a sua causa na maior velocidade na periferia da broca, levando ao desgaste máximo nas pontas de corte e nas guias da broca.

A velocidade de corte baixa na região da aresta transversal, onde uma flutuação elevada de ocorrência da aresta postiza leva a um efeito automático de redução da aresta transversal, não se pronuncia de forma negativa (significativa) sobre o processo no que se refere a variações significativas dimensionais e de forma.

O avanço tem uma influência menos pronunciada sobre o desgaste que a velocidade de corte, não levando a características de desgaste específicas (SCHROETER E WEINGAERTNER, 2002).

A vida da ferramenta de corte é ainda mais comumente especificada na prática industrial em (STEMMER I, 2005):

- Tempo de máquina;
- Tempo efetivo de corte;
- Número de peças usinadas.

Deve-se estabelecer um critério que permita retirar a ferramenta antes de sua quebra, com certa margem de segurança. Infelizmente o numero de fatores que toma parte no desgaste da ferramenta é tão grande que não se pode estabelecer uma regra única para predeterminar a vida da ferramenta durante a usinagem (FERRARESI, 1977).

Nos experimentos deste trabalho, aplicou-se inicialmente o mesmo critério de vida utilizado na produção, através do tempo efetivo de corte em minutos, pois se acredita que este parâmetro já

utilizado e de conhecimento no meio fabril, caracteriza melhor a idéia a vida da ferramenta no processo de furação. Após isso foi utilizado o critério do desgaste VB para a melhor elaboração e análise do processo.

2.2.14 Considerações sobre condições econômicas de corte

A velocidade de corte é determinada de acordo com a vida pré-estabelecida para um certo desgaste da ferramenta e pode ser calculada de acordo com a equação de Taylor ou de tabelas correspondentes (SCHROETER E WEINGAERTNER, 2002).

Com o aumento da velocidade de corte ou do avanço, o tempo de máquina diminui, abaixando conseqüentemente a parte do custo de fabricação devido à máquina. Porém, diminui simultaneamente a vida da ferramenta, ocasionando um aumento da parte do custo devido à ferramenta. Desta forma, devem existir condições de usinagem, nas quais o custo total de fabricação seja mínimo. A solução numérica está ligada a uma série de dados, nem sempre fáceis de se obter na indústria (FERRARESI,1977).

A reafiação correta e no momento oportuno é um fator essencial no uso de brocas. De modo geral, não se recomenda deixar a reafiação até que as brocas estejam totalmente desgastadas sem condições de corte. Quanto mais desgastada a broca, mais material terá que ser removido para restaurar as suas condições de corte, o que implica em maior gasto de material e de mão de obra na reafiação (STEMMER II. 2005).

O ponto de desgaste econômico é atingido quando na reafiação não é preciso remover mais do que 0,5mm do comprimento da broca para restaurar as condições de corte (STEMMER II, 2005).

Na determinação dos parâmetros de corte deve-se levar em conta os limites do sistema peça-máquina-ferramenta. As dificuldades para esses limites se referem muitas vezes à descrição das dimensões do cavaco através da espessura “h” e da largura “b”, que necessitam ser convertidos nos parâmetros de máquina e ferramenta, o avanço e a velocidade de corte correspondentemente às relações geométricas válidas para o determinado processo.

Para alcançar o máximo de produtividade possível num determinado tempo de vida, deve-se escolher um avanço de corte maior possível. Através de um grande avanço de corte reduz-se os tempos principais.

Na escolha do avanço deve-se levar em conta, além do avanço máximo e mínimo permitido pela máquina, restrições do ponto de vista da ferramenta (SCHROETER E WEINGAERTNER, 2002).

Também na otimização de processos de usinagem individuais, as condições limite referentes ao processo de produção, como por exemplo, a disponibilidade da máquina ou os tempos de ciclo em linhas de produção, necessitam ser levados em conta na determinação de parâmetros de processo.

Considerando o custo de salário e custo de máquina ferramenta muito mais altos que os custos de ferramenta, tem-se uma diminuição dos custos com o aumento da velocidade de corte e respectiva diminuição da vida da ferramenta. Mas em algumas situações onde não é a operação ou máquina gargalo da linha, a vida da ferramenta teria maior importância no custo da produção, ou seja, a disponibilidade da máquina ou os tempos de ciclo em linhas de produção necessitam ser levados em conta na determinação de parâmetros de processo.

Segundo Ferraresi (1977) o custo de produção ou custo total de fabricação é determinado pelo custo por peça que engloba: custo de matéria prima, custo da usinagem, custo da mão de obra, custo de ferramenta (depreciação, troca e afiação), custo de máquina (depreciação, manutenção, espaço ocupado, energia consumida), custo de controle de qualidade, custos indiretos de fabricação.

Dentro do custo, há uma parte considerável do custo direto de usinagem que depende em especial da velocidade de corte ou avanço, ou seja, do tempo de usinagem que são os custos de mão de obra, custo de máquina e custo das ferramentas. Os demais custos podem ser admitidos constantes em primeira aproximação (FERRARESI, 1977).

A necessidade de uma diminuição da vida da ferramenta para máquinas caras ou máquinas gargalo de produção pode ser entendida observando-se as dependências de custo. Condições de corte baixa levam a vidas longas, poucas trocas de ferramentas e baixo custo de ferramentas. Por outro lado tem-se longos tempos de usinagem, que levam a um custo de salário elevado e alto custo de utilização de máquinas ferramenta em relação ao volume usinado. Essa relação entre valores de corte e grandezas de custo relacionadas ao âmbito de trabalho está na Figura 2.36.

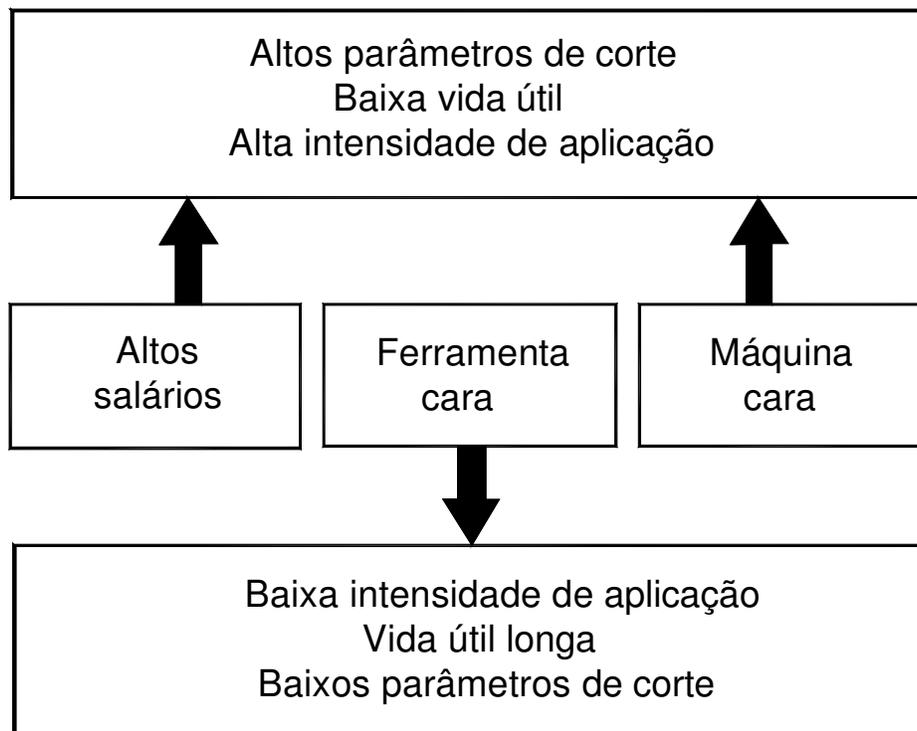


Figura 2.36 - Influência dos parâmetros de corte em função das grandezas de custo (SCHROETER E WEINGAERTNER, 2002).

São vários os custos envolvidos na produção de uma peça, podendo ser classificados em duas categorias: aqueles envolvidos com o processo propriamente dito (máquina, operador, ferramentas) e aqueles que não envolvem diretamente o processo, tais como: matéria-prima, mão de obra indireta, etc. Portanto, analisando apenas a primeira categoria de custos tem-se que o custo de usinagem por peça é dado pela Equação 2.8 (FERRARESI, 1977; NOVASKI, 1989):

$$C_p = C_{us} + C_{um} + C_{uf} \quad (\text{R}\$) \quad (2.8)$$

Onde:

C_p - custo de usinagem por peça;

C_{us} - custo de mão de obra de usinagem;

C_{um} - custo da máquina (depreciação, manutenção, energia consumida, etc.);

C_{uf} - custo da ferramenta.

Não somente pela mudança do material ou cobertura, mas também uma melhora da geometria de corte da ferramenta pode levar a uma melhora nas características de corte e com isso permitir vidas maiores ou a utilização de velocidades de corte mais elevadas.

De acordo com o processo de fabricação deve-se escolher o objetivo da otimização. No desbaste pode-se trabalhar com duas grandezas de otimização: minimização dos custos de fabricação (C_p) e minimização do tempo de fabricação (t_c) em minutos. No acabamento, no entanto, geralmente são requeridos outros tipos de otimizações. Aqui, a manutenção de tolerâncias dimensionais estreitas, certas características de qualidade superficial e outras condições devem ser mantidas para garantir a funcionalidade do componente e em decorrência disso são critérios de maior importância.

Como foi visto, dependendo do objetivo a ser alcançado, a função de valores otimizados é derivada da equação de *tempo* de produção ou da equação dos *custos* de produção.

Existem diferentes maneiras de expressar os custos de usinagem e uma das mais utilizadas é o custo das ferramentas por peça (NOVASKI, 1989).

Neste trabalho se levará em conta os custos de produção que dependem dos custos de ferramenta por peça produzida.

O custo da ferramenta na operação de usinagem está ligado à capacidade de produção durante sua vida T . Uma ferramenta terá custo menor quanto maior for a sua produção, expressa em número de peças usinadas no tempo T . Como é sabido, a vida T tem como determinante o desgaste da ferramenta. Todo o processo que vise aumentar T deverá, a princípio, diminuir o desgaste da ferramenta, aumentando-se a vida T , a capacidade de produção e com esta o custo operacional torna-se menor (FERRARESI, 1977).

Custo ferramenta, por peça é dado pela Equação 2.9 (FERRARESI, 1977):

$$C_{uf} = \frac{V_{fi} + (C_{af} \cdot N_a)}{N_f} \quad (2.9)$$

Onde:

C_{uf} - custo da ferramenta/peça

N_f - numero de peças produzidas por ferramenta

V_{fi} - valor inicial de aquisição da ferramenta

C_{af} - custo da afiação

N_a - número de afiações da ferramenta

O aumento da produtividade e redução de custos reais requer ferramentas certas, adequadas às circunstâncias (máquina e material). Em seguida, as condições de corte mais eficientes para a ferramenta precisam ser determinadas (DE VOS, 2008).

A velocidade de corte onde se situa a máxima razão de lucro localiza-se entre a velocidade de mínimo custo e máxima produção (NOVASKI, 1989).

Condições de corte mais elevadas significam custos mais elevados de ferramentas por etapa de processamento, mas esse aumento é compensado pelos custos mais baixos de máquina por etapa de processamento. Somando tudo (custo total de usinagem) surge uma combinação de condições de corte com custos mínimos totais de usinagem.

Para condições de corte mais baixas, os custos de usinagem aumentam devido aos custos mais altos de máquina em geral. Se as condições de corte são muito elevadas, os custos de usinagem aumentarão, uma vez que os custos de ferramentas aumentam mais rapidamente do que a queda dos custos de máquina (DE VOS, 2008).

O comportamento do custo de fabricação e o comportamento dos custos isolados em dependência da velocidade de corte estão mostrados na Figura 2.37. Com o aumento crescente da velocidade de corte os custos de fabricação não podem ser reduzidos continuamente. Em decorrência da diminuição da vida da ferramenta com o aumento da velocidade de corte, o número de trocas de ferramentas se torna mais freqüente, com o que se tem um crescimento do custo de ferramenta. Para velocidades de corte muito elevadas, em decorrência disto, a parcela de custo de ferramenta pode ser considerada como fator principal de custos na fabricação.

Na figura 2.37 esta representada os custos de fabricação por peça por C_p onde: (1) custos de preparação e secundários (custo fixo); (2) custos de máquina e operador (principal); (3) custos de ferramenta.

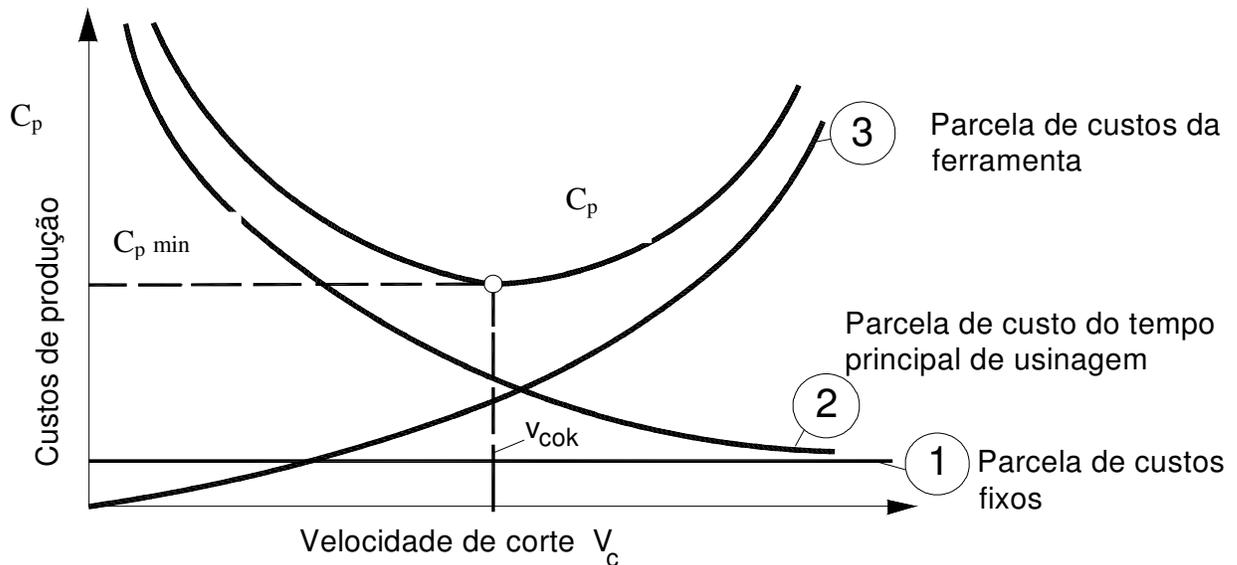


Figura 2.37 - Comportamento do custo de fabricação e das parcelas isoladas de custos em função da velocidade de corte e representação do custo mínimo ($C_p \text{ min}$) em função da velocidade de corte de custo ótimo (V_{cok}) (SCHROETER E WEINGAERTNER, 2002).

2.2.15 Determinação e otimização dos parâmetros de corte

No processo de usinagem dos componentes do motor, a furação é uma das operações com maior tempo efetivo de corte, o que influencia diretamente os custos globais do processo.

Na determinação dos parâmetros de corte e otimização desses pode-se empregar informações de diversas fontes:

- Catálogos com recomendações de parâmetros de corte fornecidos por fabricantes de ferramentas,
- Resultados de ensaios da literatura e de relatórios de pesquisa,
- Parâmetros de corte de informações internas de fábrica,
- Informações de corte de bancos de dados.

Muitas vezes o agrupamento de materiais de peça feitos de forma grosseira fornecem condições de corte que acabam sendo anti-econômicas porque as recomendações são feitas independentemente da seção de usinagem e do comportamento de desgaste. As recomendações não se referem também ao custo de máquina ferramenta.

Os parâmetros de corte para brocas: avanço f , e velocidade de corte v_c devem ser consideradas de forma distinta quando relacionadas ao efeito de otimização.

A velocidade de corte apresenta uma faixa bastante ampla que pode ser empregada para otimização do processo. A velocidade de corte tem uma influência considerável sobre a vida da ferramenta que por sua vez influi nos custos de ferramenta e nos tempos de troca de ferramenta.

Influenciadas pelo custo crescente de máquinas-ferramenta e salários, bem como pela diminuição do tempo de troca de ferramenta, as velocidades de corte econômicas levam a vidas de ferramentas cada vez mais curtas.

Catálogos de empresas e livros em geral são relacionados apenas com o produto. A maioria dos fabricantes de ferramenta oferece catálogos eletrônicos que permitem a determinação dos parâmetros de corte diretamente através da escolha de uma determinada ferramenta. Resultados mais exatos, no entanto podem ser obtidos de pesquisas, que na maioria dos casos são relacionados com condições específicas e dificilmente podem ser transferidos para outros casos de usinagem com outros graus de dificuldade.

Na elaboração de planos de trabalho em indústrias muitas vezes são utilizadas fontes internas que se baseiam em dados obtidos na literatura e em valores armazenados internamente em bancos de dados das empresas. Geralmente esses dados são embasados na experiência de longos anos de operadores e preparadores de planos de trabalho.

Normalmente os valores apresentados em tabelas e recomendações valem para condições de corte estáveis para peças pré-usinadas. Para a usinagem de peças com uma certa influência na camada limite, como por exemplo peças forjadas, laminadas ou fundidas, os valores recomendados devem ser reavaliados. Este procedimento também deve ser adotado para corte interrompido, torneamento interno, condições de corte instáveis e peças de usinagem difícil, bem como para condições precárias de máquinas ferramenta.

Na Tabela 2.3 vêem-se recomendações conforme Schroeter e Weingaertner, (2002) para parâmetros para furação de ferro fundido cinzento para brocas helicoidais de aço rápido e metal duro.

Tabela 2.3 - Recomendações para furação de ferro fundido cinzento com grafita lamelar com brocas helicoidais de aço rápido com cobertura e metal duro (SCHROETER E WEINGAERTNER, 2002).

Material de corte	Material da peça	HB	Profundidade de corte l (mm)	Diâmetro do furo d (mm)								Vel.de corte v_c (m/min)
				2,5	4	6,3	10	16	25	40	63	
				Avanço f (mm)								
Aço Rápido	GG10 - GG25	<220	< 5 x d	0,08	0,12	0,20	0,28	0,38	0,50	0,63	0,85	16 até 25
			5-10 x d	0,06	0,10	0,16	0,22	0,30	0,40	0,50	0,70	12 até 20
			> 10xd	0,05	0,08	0,12	0,18	0,25	0,32	0,40	0,56	12 até 20
	GG30 - GG40	>220	< 5 x d	0,06	0,10	0,16	0,22	0,30	0,40	0,50	0,70	12 até 20
			5-10 x d	0,05	0,08	0,12	0,18	0,25	0,32	0,40	0,56	10 até 16
Metal Duro	GG10 - GG25	<220	< 5 x d	0,04	0,06	0,10	0,14	0,19	0,25	0,32	0,45	24 até 40
			> 5 x d	0,05	0,07	0,10	0,12	0,14	0,16	0,22	0,31	63 até 100
	GG30- GG40	>220	< 5 x d	0,03	0,05	0,08	0,11	0,15	0,20	0,25	0,36	25 até 40
			> 5 x d	0,05	0,07	0,10	0,12	0,14	0,16	0,22	0,31	31 até 63

Testes realizados diretamente na peça em trabalho apresentam vantagens, não havendo necessidade de gastar matéria prima extra nem custos referentes a testes fora do meio industrial e são mais precisos. O registro adequado do experimento é essencial em um trabalho de otimização. Livros e banco de dados são úteis para sugerir pontos iniciais para operação, mas devem ser complementados por testes de vida da ferramenta sob condições reais de trabalho (NOVASKI, 1989).

Vários fatores influenciam a vida da ferramenta, porém a velocidade de corte é o principal, posteriormente tem-se o avanço e em seguida a profundidade de corte, que no caso da furação é constante. Outros fatores, embora secundários, tais como temperatura, vibração do conjunto ferramenta peça e fatores externos ao processo, como o tipo de material, dureza, vazão e tipo de fluido de corte, influenciam na vida da ferramenta (CAPUANO, 2004).

3 PROCEDIMENTOS EXPERIMENTAIS

O experimento foi realizado no setor de usinagem de Bloco de Motores HS na fábrica de motores diesel da MWM International, em Canoas/RS, em um Centro de Usinagem Horizontal Mazak na operação 115 na seqüência do processo. O processo específico estudado é uma operação de furação realizada na face pré-usinada no bloco do motor de ferro fundido. Este experimento foi realizado diretamente no chão de fábrica de forma que todos os resultados obtidos refletem a realidade encontrada no ambiente industrial. Fez-se os ensaios na furação do ferro fundido cinzento FC25, material de cavaco quebradiço e mais fácil usinabilidade comparado com as outras classes de ferro fundido.

Através da avaliação da furação, pela medição da circularidade, cilíndricidade, diâmetro e desgaste VB da broca foi verificado o comportamento da ferramenta e do furo em vários momentos antes da troca.

Foram realizadas três séries de experimentos. No primeiro experimento foi feito o levantamento dos resultados dimensionais e geométricos dos furos e análise do desgaste da broca na geometria *normal* com os parâmetros do processo original e após repetindo o mesmo levantamento com a broca proposta de geometria chamada *esférica*. Após coletados os dados, foram comparados os resultados entre as duas situações. Com isto foi obtido um melhor entendimento do comportamento de ambas as geometrias da ferramenta neste processo.

O processo de furação foi realizado com brocas inteiriças de metal duro com canal reto e refrigeração interna. A broca em questão é uma broca escalonada com três diâmetros distintos, mas a análise se deteve apenas na ponta. O sistema ferramenta-suporte-fuso de fixação na máquina foi considerado rígido e a avaliação do batimento da ferramenta foi realizada na própria máquina não ultrapassando a 0,02 mm. A medição foi feita com relógio apalpador de escala milesimal na haste da ferramenta quando fixado no fuso da máquina, e a rigidez da fixação do bloco no dispositivo hidráulico foi avaliada através da inspeção visual e considerada adequada.

Foram avaliadas na usinagem inicialmente quatro brocas de geometria de ponta *normal* e cinco brocas de geometria de ponta *esférica*. Para cada broca e em cada intervalo de tempo de 37

minutos eram feitas medições do desgaste VB na aresta principal de corte por intermédio de uma lupa com escala milimetrada e medições de circularidade, cilíndricidade e diâmetro do furo usinado numa máquina tridimensional do laboratório de metrologia até atingir o critério de fim de vida estipulado para este processo em 185 minutos de corte efetivo.

Após estes resultados foram avaliadas no segundo experimento quatro brocas *esféricas* a partir das condições de fim de vida do primeiro experimento. Para estas quatro brocas continuou-se a usinagem com objetivo de analisar os limites de vida nos mesmos parâmetros de corte originais, controlando o desgaste VB até um limite de 0,3 mm como critério de fim de vida.

Após, foi realizado o terceiro experimento usando a broca de geometria *esférica* com duas velocidades de corte mais altas, até atingir o fim de vida estipulado em 0,3 mm de desgaste VB.

Para os três experimentos foram avaliadas qual a condição melhor para a produção, com menor custo de produção, levando em consideração apenas os custos da ferramenta.

Na seqüência apresentam-se mais detalhes dos experimentos.

3.1 Corpo de prova / bloco do motor

O corpo de prova usado neste ensaio foi o bloco do motor em ferro fundido cinzento FC 25, de resistência à tração de 25 kgf/ mm², fornecido pela empresa Tupy Fundições Ltda. A Tabela 3.1 apresenta as propriedades mecânicas exigidas em projeto.

Tabela 3.1- Especificações de projeto constantes no desenho do bloco do motor.

Material	Norma	Resistência à Tração	Dureza de Face	
			Cabeçote	Demais regiões
FC 25	RES21FC01	184 N/mm ²	200 a 255 HB	187 a 255 HB

O bloco utilizado nos testes é destinado à fabricação do motor Diesel NGD3.0 , (especificação de projeto do número de desenho 70280126). A microestrutura especificada é de

ferro fundido cinzento perlítico com teor de ferrita menor que 5% em sua matriz. A grafita deve apresentar características conforme a norma American Society of Testing and Materials (ASTM) tipo A e B, tamanhos quatro a seis. A classificação FC 25 é da norma brasileira ABNT – NBR6589 que determina algumas propriedades mecânicas:

Resistência à tração e ao cisalhamento: 250N/mm² mínimo ou 25 kgf / mm²;

Resistência à flexão: de 350 a 490 N/mm² ou 35 a 49 kgf / mm²;

Resistência à compressão: de 700 a 1000 N/mm² ou 70 a 100 kgf / mm²;

Dureza Brinell de pré-carga HB30: entre 180 e 240 HB;

Módulo de elasticidade: entre 105000 e 120000 N/m².

As características do material dos blocos utilizados nos experimentos foram fornecidas pela Fundição Tupy, e mostra uma variação no carbono equivalente entre 3,71 e 4,27. Como estes valores são inferiores ao ponto eutético (4,3%) o material é considerado hipoeutético.

A designação FC ou GG, provém da sua classificação em diferentes normas FC (ABNT) ou GG (DIN - Deutsches Institut fur Normung), seguidas de seu limite de resistência à tração (MPa ou bar), por exemplo: FC-25 ou GG25. A composição da liga esta na Tabela 3.2.

Tabela 3.2 - Composição química do bloco do motor fornecida pela Fundição Tupy.

Composição	%
Carbono Total	3,10 a 3,45
Silício	1,85 a 2,45
Manganês	0,60 a 0,90
Enxofre	Mx. 0,12
Fósforo	Mx. 0,15
Níquel	Mx. 0,25
Cromo	0,10 a 0,30

Na análise metalográfica é considerado um ferro fundido cinzento de grafita lamelar com matriz metálica do tipo perlítica. Grafita forma I, tipo A, tamanho 4 e 5.

As Tabelas 3.3 e 3.4 informam as características especificadas e encontradas após ensaios de dureza (HB) e tração para o bloco fundido.

Tabela 3.3 - Dureza Brinell (HB) do bloco.

DUREZA NA SUPERFÍCIE				DUREZA NO NÚCLEO			
Mn.espec.	Mx.espec.	Mn.	Mx.	Mn.espec.	Mx.espec.	Mn.	Mx.
200	255	217	235	200	255	212	212

Tabela 3.4 - Resistência a tração do Bloco (MPa)

Especificado	Valor medido	Valor mx. Medido
184	244	280

3.2 Máquina-ferramenta

A máquina-ferramenta utilizada no ensaio de usinagem foi o Centro de Usinagem horizontal em 3-eixos Mazak modelo FH-6800 com comando Mazatrol Fusion 640 M, e magazine de ferramentas com capacidade para 40 ferramentas fabricado pela empresa Mazak , com os movimentos de translação X,Y realizados pela mesa e o movimento Z realizado pelo fuso.

A Figura 3.1 ilustra o sistema de fixação da peça no dispositivo da máquina-ferramenta.

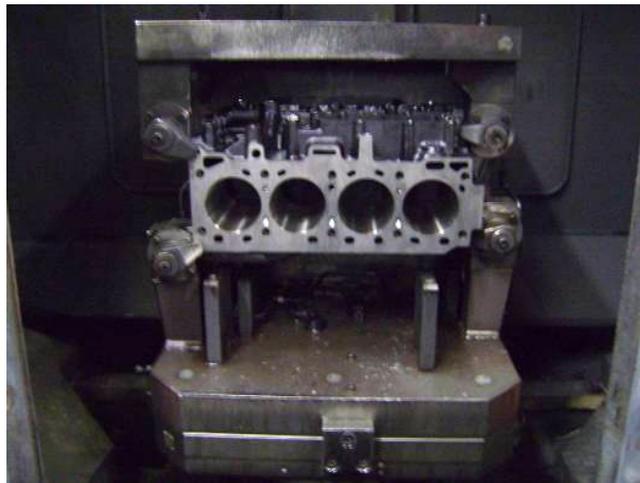


Figura 3.1- Bloco fixado no dispositivo da máquina.

A qualidade na fixação da peça é garantida por dispositivo hidráulico de fixação fácil e rápida e não apresentado vibrações que poderiam prejudicar os testes.

As principais características técnicas do Centro de Usinagem estão listadas na Tabela 3.5, possuindo ainda sistema de refrigeração interna necessário para furação e com o acoplamento da ferramenta ao fuso na norma (International Organization for Standardization) ISO 50.

Tabela 3.5- Informações técnicas referentes ao centro de usinagem Mazak .

	Frequência de giro	35 a 10.000 rpm	
	Potência	37 kW	10.000 rpm
	Torque	120 kgf.m	7.000 rpm
		53,6 kgf.m	10.000 Nm
	Pressão de refrigeração no fuso 15.0 MPa		
	Nºferramentas	40	
	Avanço máximo	40 m/min	
	Curso Máximo de Deslocamento das Guias		
	X	Y	Z
	1050mm	800 mm	880mm
	Sistema de fixação I S O 50		
	Capacidade de ferramentas no Magazine		40 ferramentas
	Número de paletes		2
	Mesa Giratória		
	Capacidades	500 mm	500 kg

3.3 Ferramentas de corte

Nesses ensaios, foram utilizadas brocas escalonadas de metal duro de canal reto sem cobertura com refrigeração interna, com duas arestas de corte, de diâmetro 10,5 mm na ponta e haste com diâmetro de 18 mm. São fabricadas por uma empresa especializada de ferramentas com

o código de desenho 985 na classe de metal duro K10, conforme características apresentadas na Tabela 3.6.

Tabela 3.6 - Características técnicas referentes ao Metal duro utilizado nas ferramentas testadas.

Composição Química Metal Duro EMDT 100	
Tungstênio	93%
Cobalto	6%
Outros carbonetos	1%
Dados físicos Metal Duro EMDT 100	
Densidade ISO3369	14,80 +-0,10g/cm ³
Dureza ISO3878	1790+-40 HV 30
Resistência Ruptura Transversal	>3000N/mm ²
Tamanho grão	<0,8 um

Nota-se o tamanho do grão do metal duro é classificado como grão muito fino (grão menor que 1,5 μm) na classificação não normalizada de um fabricante de ferramentas. Atualmente já se tem grãos abaixo de 0,1 μm (nano-grão) conseguindo com isto vantagens importantes, pois quanto menor o tamanho do grão, mais tenaz, maior dureza e resistência ao desgaste apresentam as ferramentas, sendo possível sua aplicação em condições de instabilidade do processo, (GUHRING, 2002 apud CASTILLO, 2005; MATTES, 2009).

Os ângulos e dimensões da ponta das brocas testadas foram:

Ângulo de ponta da broca $\sigma=130^\circ$;

Ângulo de folga $\alpha=8^\circ$;

Ângulo da aresta transversal aproximadamente $\Psi=55^\circ$;

Comprimento da aresta transversal 0,80mm;

Largura da guia 0,6 a 0,9mm.

Foram avaliadas as brocas com a geometria de afiação de ponta cônica *normal* (Figura 3.2) que estavam sendo utilizadas na produção e brocas com a geometria de ponta de afiação cônica *esférica* desenvolvida para este trabalho (Figura 3.3).

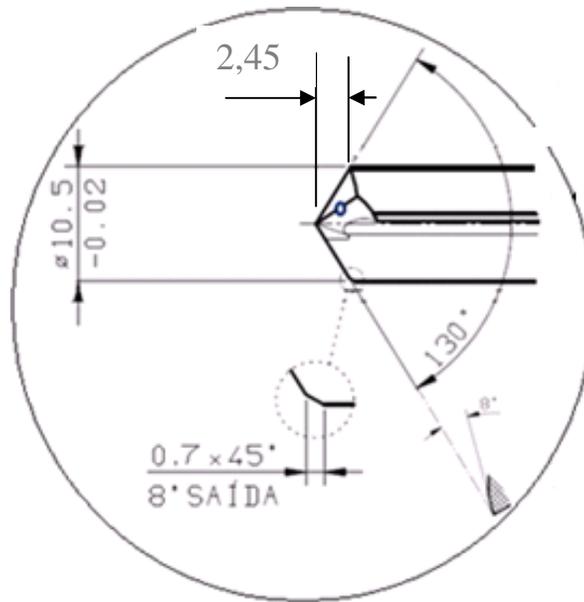


Figura 3.2 – Detalhe da ponta da broca com geometria cônica *normal*.

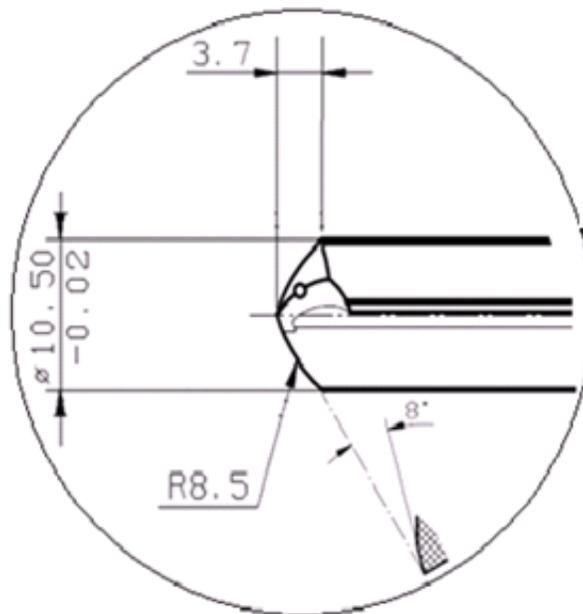


Figura 3.3 - Detalhe da ponta da broca com geometria cônica *esférica*.

A ferramenta é denominada de T3 para a máquina e apresenta um tempo no processo de corte de 1,07 minutos conforme a Tabela 3.7. O tempo efetivo de corte é de 0,93 minutos por bloco para os parâmetros originais de processo conforme Tabela 3.8. Em cada bloco são feitos 10 furos com profundidade nominal de 58 mm.

Tabela 3.7: Tempo padrão cronometrado de cada ferramenta no Centro Usinagem Mazak.

Tempos de Processo Bloco 3.0 para Centro Usinagem Mazak			
Ferramenta	Descrição da Operação	tempo total (min.)	tempo individual (min)
T3	Furar face do cabeçote	1,07	1,07
T4	Furar guias do cabeçote	1,17	0,1
T5	Alargar guias da face do cabeçote	1,37	0,2
T18	Furar guias das capas do mancal	2,11	0,74
T19	Alargar guias das capas do mancal	2,35	0,24
T16	Furo para rosca M14 fixação dos mancais	3,43	1,08
T24	Desbaste dos alojamento dos selos dianteiro e traseiro	4,05	0,62
T25	Acabamento do alojamento dos selos dianteiro, traseiro.	4,26	0,21
Troca pallet		4,5	0,24
Tempo total de usinagem			4,5

Tabela 3.8: Parâmetros de usinagem originais utilizado no 1° e 2° experimentos.

Parâmetros de processo originais

Velocidade de corte	$v_c = 112 \text{ m/min}$
Velocidade de avanço / Avanço	$v_f = 679 \text{ mm/min}$ $f = 0,2 \text{ mm/rot}$
Rotação (frequência de giro)	$n = 3395 \text{ min}^{-1}$

Observa-se que aproximadamente 24% do tempo total de operação do bloco nesta máquina é de furação com a broca que está sendo testada. Isso reforça a importância deste estudo em se tratando de um possível ganho em tempos de produção ou redução de custos na furação. A máquina não é considerada gargalo de produção, mas o custo das brocas é significativo dentro do custo das ferramentas.

O sistema de fixação da ferramenta é feito por intermédio de um suporte com mandril hidráulico de cone ISO 50 com batimento máximo de 0,02mm medidos na haste da ferramenta quando montado no fuso da máquina. A ferramenta é pré-setada num equipamento da marca Zoller.

O mandril de fixação da ferramenta é hidráulico e utiliza um reservatório de óleo para equilibrar a pressão de fixação em torno da haste da ferramenta. Apertando um parafuso, aumenta-se a pressão do óleo, fazendo com que uma bucha de expansão prenda a haste da ferramenta (MARTINS et al., 2010).

Para se ter ainda mais acuracidade nos resultados utilizou-se em todas as ferramentas testadas o mesmo mandril de fixação, (Figura 3.4).



Figura 3.4 - Conjunto ferramenta/mandril hidráulico com cone de fixação ISO 50.

A geometria correta da afiação de corte de uma ferramenta é fundamental para um bom resultado no processo de usinagem, mas se o método de fixação, o porta-ferramenta e a interface de fixação da ferramenta com o eixo-arvore da máquina não tiver uma fixação rígida, sem

batimento radial, este processo poderá ser prejudicado e isso pode interferir na vida da ferramenta de corte (MARTINS et al., 2010).

3.4 Medição e avaliação do desgaste da broca

Para a avaliação quantitativa do desgaste das brocas foi utilizado uma lupa com escala milimetrada, com divisão de escala decimal (0,1mm) e capacidade de aumento de 8X, (Figura 3.5). Foi medido o desgaste da aresta principal em intervalos regulares de tempo até completar o fim de vida da ferramenta estipulado em cada experimento.

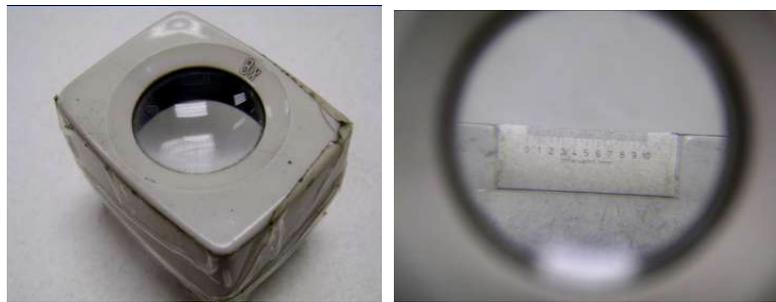


Figura 3.5 - Lupa com ampliação de 8X marca Sandvik.

Ficaram registradas e arquivadas eletronicamente as fotos das arestas das ferramentas em que foram analisados os desgastes. As fotos foram tiradas por uma máquina fotográfica marca Sony de resolução 7 Mpix.

3.5 Fluido de corte e controle

Como é sabido, os fluidos de corte são largamente empregados na usinagem em geral, com as finalidades de refrigerar e lubrificar o processo.

O fluido de corte tem diversas funções, como: prevenção da soldagem cavaco-ferramenta; retirada do cavaco da região de corte; proteção contra a corrosão; redução da dilatação; etc.

Na furação profunda de ferros fundidos (profundidade de corte maior que $5xD$), a aplicação do fluido de corte se torna fundamental, como meio transportador de cavacos. Com o cavaco fragmentado, que é uma característica do cavaco de ferro fundido, não existe continuidade necessária para percorrer os canais das brocas, podendo causar danos à integridade da ferramenta de corte.

O fluido usado no equipamento é o Ecocool MH1000 da Fuchs solúvel em água a 5%.

Para medir a concentração dos fluidos de corte durante a usinagem, foi utilizado um refratômetro óptico, modelo ATAGO N-1E (Figura 3.6).



Figura 3.6 - Refratômetro utilizado para manutenção da concentração do fluido ATAGO N-1E.

A pressão de fluido medido na ponta da ferramenta foi de 15 bar. Embora neste estudo não tenha-se observado as influências da pressão e o tipo do fluido de corte, sabe-se que é de extrema importância o bom funcionamento do sistema para a expulsão do cavaco no momento do corte .

3.6 Coleta de dados e análise

O método residiu em sucessivas medições do furo em uma máquina de medição tridimensional de marca DEA SCIROCCO e da análise da ferramenta em bancada por intermédio de uma lupa de escala decimal para cada tempo de corte estipulado.

Para os três experimentos realizados foram avaliados e coletados as dimensões dos furos usinados, circularidade, cilindridade e os desgastes VB das ferramentas em cada intervalo de tempo de 37 minutos, até o fim do tempo de vida da ferramenta que na condição inicial do primeiro experimento foi de 185 minutos de corte efetivo.

Foram definidos programas padronizados na tridimensional para medição de cilindridade, circularidade e diâmetro. Foram definidas quatro alturas distintas com 16 pontos distribuídos diametralmente medindo sempre no mesmo furo e na mesma posição do bloco obtendo uma boa confiabilidade de dados. Para a cilindridade foi medida em quatro profundidades, 20 mm, 32 mm, 42 mm, 52 mm e para circularidade foi medida na profundidade 32 mm. A máquina de medir coordenadas (Figura 3.7) utilizou cabeçote e apalpador eletrônico modelo Renishaw com esfera de rubi com diâmetro de 3 mm.



Figura 3.7 – Máquina de Medição Tridimensional marca DEA Scirocco.

O desgaste da ferramenta foi avaliado pela análise do desgaste VB na aresta de corte principal no diâmetro de 10,5 mm, com as quais são executados os furos de profundidade entre 57,45 mm a 58,20 mm aferidos por intermédio de um calibre padrão de profundidade e diâmetro conforme Figura 3.8.



Figura 3.8- Calibre padrão passa não passa do diâmetro e profundidade do furo.

Os dados foram coletados e preenchidos em planilha própria conforme Figura 3.9, criada para este estudo. A identificação inicial foi feita pelo operador do posto de trabalho. Quando atingia o tempo programado para análise era gerado um alarme visual automaticamente no Centro de Usinagem Mazak e o bloco era separado, identificado e junto com a ferramenta era encaminhado para as medições.

A broca foi analisada visualmente de forma geral os desgastes da aresta transversal, arestas secundárias de corte e guias. Foi medido o desgaste VB nas arestas principais de corte por intermédio da lupa coletando o desgaste de maior valor. Após a avaliação visual, medições do furo e medição do desgaste da ferramenta os valores foram digitados e armazenados eletronicamente e o bloco seguia a produção normal. A broca voltava para o processo dando continuidade na furação até atingir o fim de vida estipulado.

As medições de desgaste foram realizadas em bancada nos mesmos intervalos de tempos da medição dos furos na tridimensional e os valores e as fotos dos desgastes da ferramenta foram armazenadas eletronicamente em cada fase de medição.

Foi estipulado o critério de medição a cada 37 min para a coleta de informações por ser considerada uma frequência suficientemente confiável para este trabalho.

Na Figura 3.9 é apresentada a planilha utilizada para coleta de dados das medições dos furos e desgaste da aresta principal de corte das brocas nos intervalos de tempos especificados.

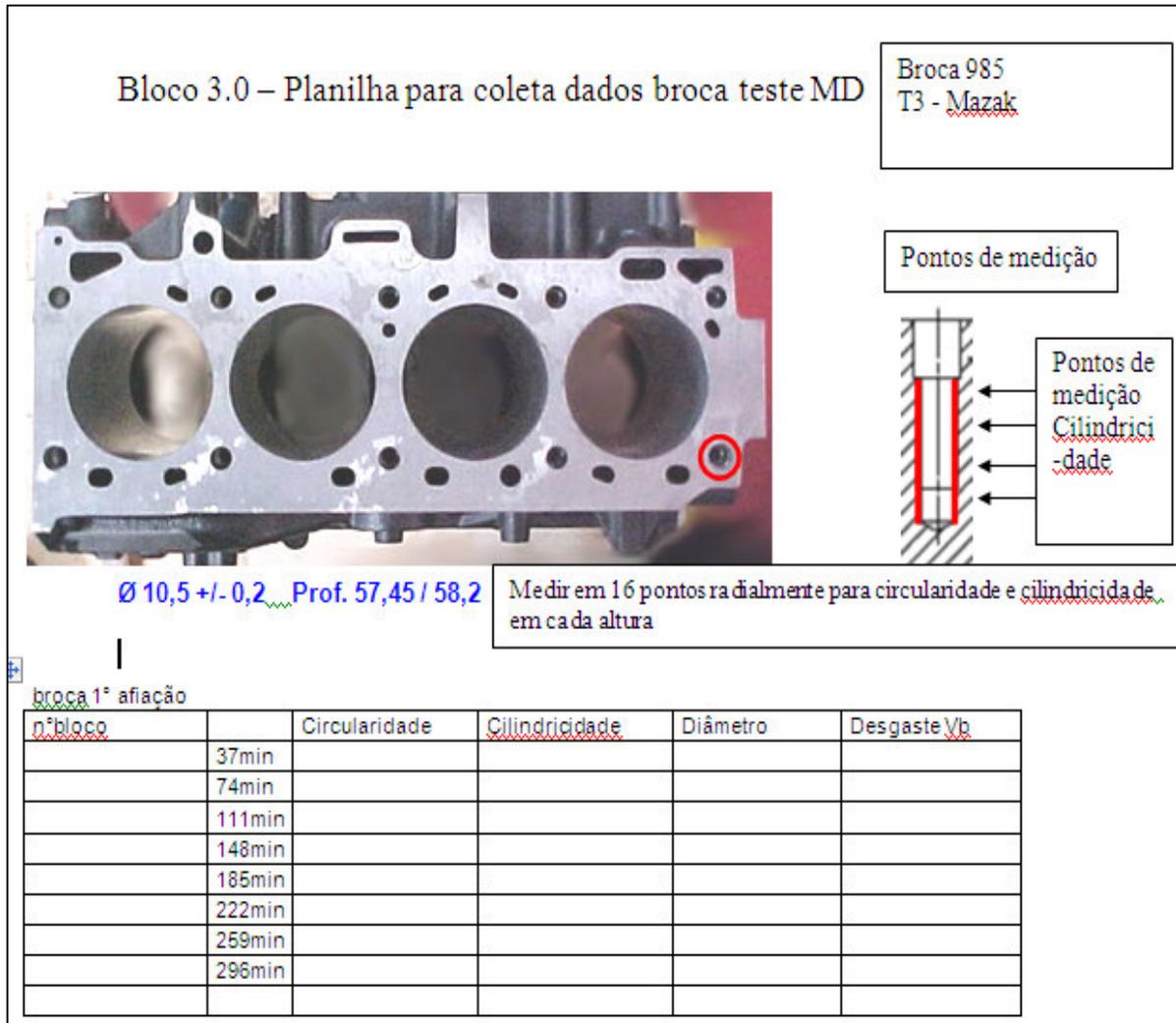


Figura 3.9 - Planilha de registro e orientação das medições do ensaio

Para o **primeiro** experimento foram testadas no total nove brocas (5 esféricas e 4 normais) e feitas cinco medições no intervalo de tempo regular de 37min até completar 185min de corte em cada broca nas duas geometrias de ponta.

No **segundo** experimento, com quatro brocas esféricas, a partir do primeiro experimento, continuaram-se os ensaios fazendo as medições dos furos e das deformações nas arestas principais

de corte da ferramenta a cada intervalo de 37 min de corte até que o critério de fim de vida de desgaste VB 0,3mm fosse atingido.

No **terceiro** experimento avaliaram-se três brocas *esféricas* com a velocidade de corte maior em 10% e três brocas com 20% maior que a condição inicial, com objetivo de conhecer o comportamento e propor uma possível redução dos tempos operacionais. Também foi avaliado o custo da ferramenta por peça nestas condições comparando com os experimentos anteriores.

Em todos os experimentos foi verificado o desgaste na aresta principal de corte VB em ambas as arestas de corte para cada ferramenta e foi tomado o de maior desgaste como representativo para os resultados. Tal procedimento foi adotado, mas não apresentou uma diferença significativa entre estas duas arestas de corte.

3.7 Condições operacionais dos ensaios

A furação se dá em uma superfície usinada plana e paralela ao plano determinado pelos eixos X e Y da máquina, sem pré-furo (furação em cheio). O movimento de avanço da ferramenta é dado pelo movimento Z do fuso da máquina.

Inicialmente foi feito o levantamento de dados da broca com a afiação cônica *normal* e depois com afiação *esférica* foi comparado o desempenho de ambas as brocas numa condição de corte original do processo.

Foram primeiramente aplicadas as condições de corte utilizadas na produção baseados em experimentos realizados anteriormente pela engenharia de processo. Para os ensaios com as duas geometrias da broca foram utilizadas a velocidade de corte (v_c) de 112 m/min e avanço (f) de 0,2 mm/rotação. Ou seja, para a mesma velocidade de corte e avanço foram testadas as duas geometrias de afiação de ponta. Ambas as geometrias da broca com os mesmos ângulos de folga α_f e de saída γ_f e mesmo comprimento da aresta transversal.

No primeiro experimento em ambas as geometrias, a cada 37 minutos de corte efetivo foi executada as medições, totalizando cinco medições a cada 25 metros aproximadamente de percurso usinado. Para o primeiro experimento, o critério de fim de vida foi de 185 minutos, equivalente a um percurso de 125 metros.

No segundo experimento retomou-se a furação com quatro ferramentas de afiação *esférica* a partir do tempo de corte de 185 min e avaliou-se até quanto tempo de corte poderia ser acrescido até chegar a um nível máximo de desgaste VB de 0,3mm. Este valor foi definido porque com este desgaste ainda permite um tempo de reafiação e quantidade de remoção de material da broca em condições economicamente vantajosas.

No terceiro experimento utilizando as brocas *esféricas* e com as velocidades de corte de 10% e 20% maiores, furou-se até chegar a um nível máximo aceitável para o desgaste VB de 0,3 mm. Foram feitas as medições dentro dos mesmos intervalos e seguindo os mesmos procedimentos de coletas de dados nos experimentos anteriores.

Os resultados dos ensaios e a discussão sobre os resultados obtidos estão colocados no capítulo a seguir.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Verificou-se que entre a broca *normal* e *esférica* o comportamento do desgaste foi muito diferente. Já a circularidade, a cilindricidade e o diâmetro não apresentaram variações significativas nos parâmetros do processo testadas. Conforme observado nos resultados dos testes, o critério variação do diâmetro, circularidade e cilindricidade não poderão ser utilizadas como critério de fim-de-vida devido à baixíssima variação encontrada em relação à grande tolerância permitida e especificada no projeto, pois a grande maioria das operações de furação, são operações de pré-usinagem para uma próxima operação, geralmente de mandrilamento, alargamento ou roscamento. Neste caso são furos para posterior processo de roscamento.

O desgaste na aresta transversal de corte não foi ponto de análise neste experimento, mas verificou-se que em ambas as geometrias testadas os desgastes foram aproximadamente iguais. É na aresta transversal que ocorre um pequeno processo de conformação do material e foi uma das preocupações iniciais nos testes para que esta deformação não interferisse nos resultados dos experimentos nas ferramentas testadas. Foram definidas na construção de ambas as geometrias das brocas testadas que a aresta transversal deveria ter 0,8 mm de comprimento, podendo ser considerado assim como uma aresta reforçada.

O desgaste na aresta transversal é sempre crítico, pois a broca trabalha em péssimas condições nesta região: velocidade de corte muito baixa, ângulo de saída negativo, sendo por isso responsável por grande parte do esforço consumido no avanço da ferramenta.

O desgaste de guias (arestas secundárias de corte) próximas à aresta principal de corte da broca apresentaram bem menos desgaste na de geometria de afiação *esférica*. Mas, não foram feitos as medições de altura e análise deste desgaste, apenas uma avaliação visual, pois não foi o objetivo do estudo e este tipo de desgaste não foi considerado significativo comparado com o desgaste da aresta principal de corte VB.

Na Figura 4.1 e Figura 4.2 são apresentadas as fotos das ferramentas com desgaste VB na afiação *normal* com 185 minutos equivalente a 125 metros de corte linear e na afiação *esférica* com 296 minutos equivalente a 200 metros de corte linear respectivamente nos parâmetros de corte

$v_c=112$ m/min e $f= 0,2$ mm/rot. Nota-se que existe um desgaste prematuro na aresta de corte da ferramenta de geometria *normal*.

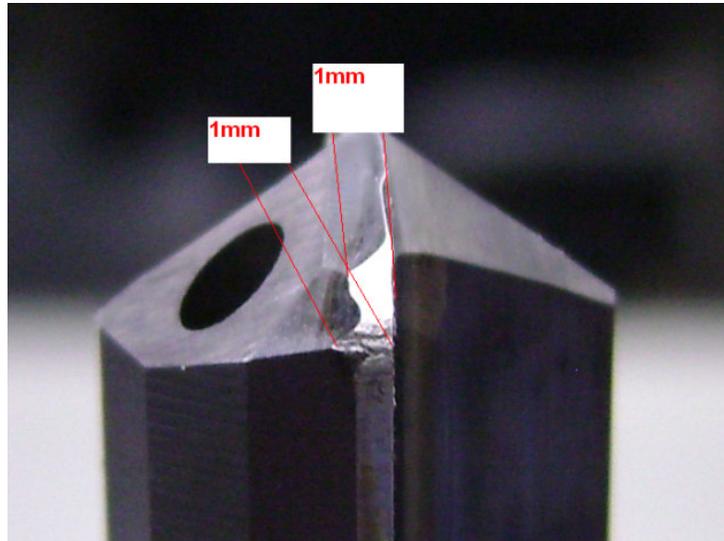


Figura 4.1 - Desgaste VB da ferramenta de geometria *normal* em função do tempo efetivo de corte de 185min (125 metros) com a $v_c=112$ m/min e $f=0,2$ mm/rot.

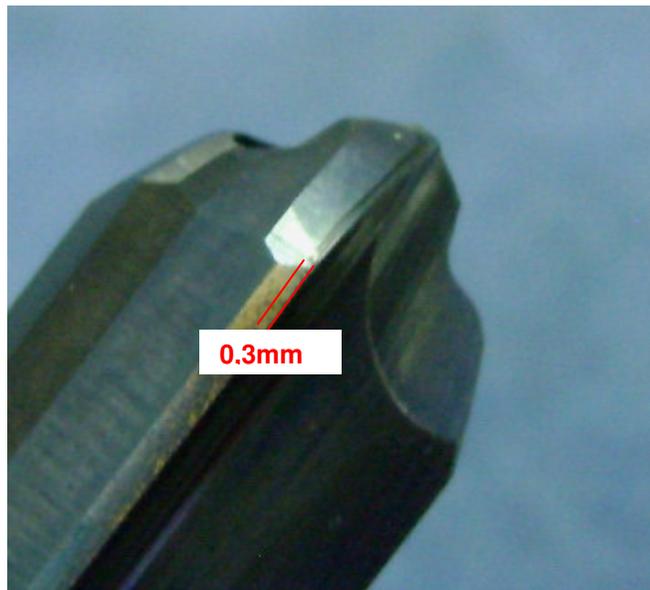


Figura 4.2 - Desgaste VB da ferramenta de geometria *esférica* em função do tempo efetivo de corte de 295min (200 metros) com a $v_c=112$ m/min e $f=0,2$ mm/rot,

A seguir são apresentados os resultados dos três experimentos realizados de forma mais detalhada para posteriormente chegar às conclusões e discussões pertinentes. Os valores ponto a ponto para cada característica monitorada nos ensaios encontram-se nos Apêndices desta dissertação.

4.1 Primeiro experimento

Neste primeiro experimento foram utilizados os dois tipos de afiação, a de geometria *normal*, também chamada de convencional normalizada, comparando os resultados obtidos com a nova proposta de geometria chamada de *esférica* utilizando os dados de corte predeterminado originalmente pelo processo conforme Tabela 4.1.

Tabela 4.1- Parâmetros de corte utilizados originalmente na produção.

Dados originais do processo

Velocidade de corte	$v_c = 112$ m/min
Vel. avanço/ Avanço	$v_f = 679$ mm/min $f = 0,2$ mm/rot

O objetivo deste primeiro experimento foi determinar qual das duas geometrias que apresenta um melhor rendimento e menor custo na produção.

Foram testadas quatro brocas de afiação *normal* e cinco brocas de afiação *esférica*. Os valores dos desgastes, circularidade e cilindridade apresentados nas figuras, são as médias das medições em intervalos de 37min até completar o tempo total de 185min, sendo este o critério de fim de vida da ferramenta neste experimento. Para os gráficos de variação do diâmetro é apresentado os valores de cada medição em cada broca.

Observando-se a Figura 4.3 e Figura 4.4 têm-se os resultados obtidos pela afiação *normal* e *esférica* em função do tempo total efetivo usinado versus desgaste VB até 185min de vida ou 125 metros de corte efetivo, estipulados no processo original.

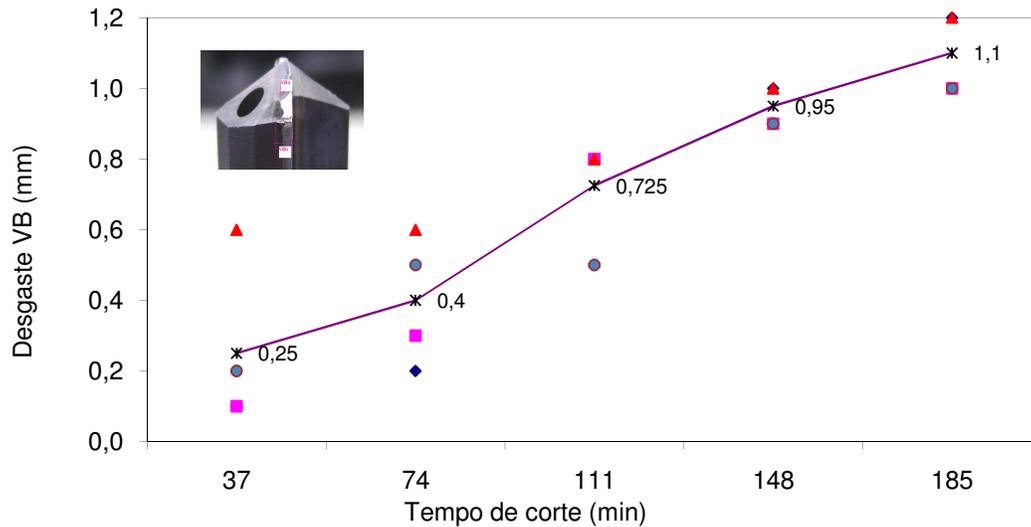


Figura 4.3 - Desgaste VB da ferramenta de geometria *normal* em função do tempo efetivo de corte com $v_c=112\text{m/min}$ e $f=0,2\text{mm/rot}$, (média de 4 brocas).

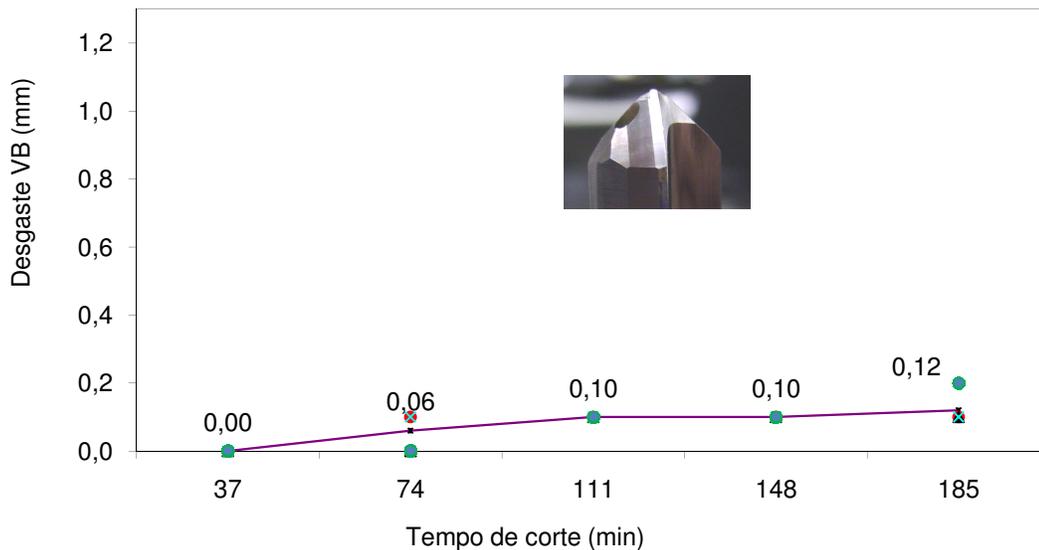


Figura 4.4 - Desgaste VB da ferramenta de geometria *esférica* em função do tempo efetivo de corte com $v_c=112\text{m/min}$ e $f=0,2\text{mm/rot}$, (média de 5 brocas).

Nota-se que a vida da broca *esférica*, levando em consideração o desgaste, é nitidamente superior a da ferramenta com afiação *normal*. O desgaste VB na broca *normal* foi aproximadamente dez vezes maior que a da ferramenta com afiação *esférica* para um mesmo tempo de vida da ferramenta nos parâmetros de $v_c=112\text{m/min}$ e $f=0,2\text{mm/rot}$. O desgaste VB da broca *esférica* atingiu 0,12 mm enquanto que na broca normal ficou com 1,10mm. Os valores representados nas figuras 4.3 e 4.4 foram as médias do desgaste VB das brocas testadas nos intervalos de tempo.

O melhor desempenho da broca com geometria *esférica* pode estar associada ao fato da mesma ter arestas principais de corte maiores. A broca com afiação *esférica* tem como característica geométrica de construção, arestas principais de corte curvilínea e são, portanto maiores em comprimento efetivo que as arestas principais de corte nas brocas com afiação *normal*. Essa característica apresenta como consequência o aumento da área de contato das arestas de corte com o material usinado tornando mais eficiente o processo, distribuindo melhor os esforços de corte e conseqüentemente o calor gerado o que resulta um menor desgaste na aresta principal de corte.

A variação do **diâmetro** do furo realizado pela broca de geometria *normal* é mais significativa comparada com a *esférica* conforme se observa nas Figuras 4.5 e 4.6.

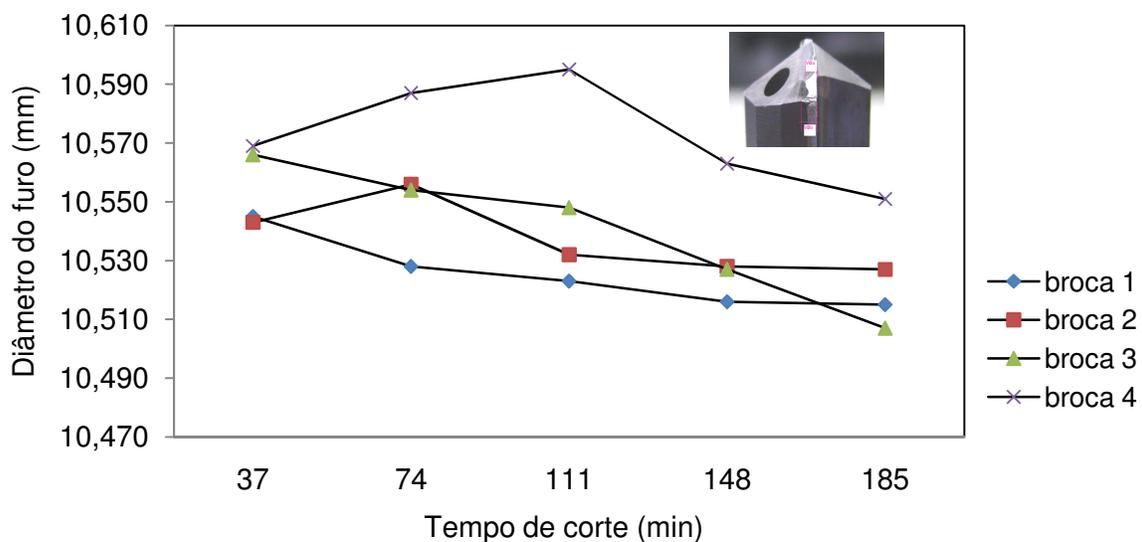


Figura 4.5 - Variação do diâmetro em função ao tempo efetivo de corte para cada broca de geometria *normal* ($v_c=112\text{ m/min}$ e $f=0,2\text{mm/rot}$).

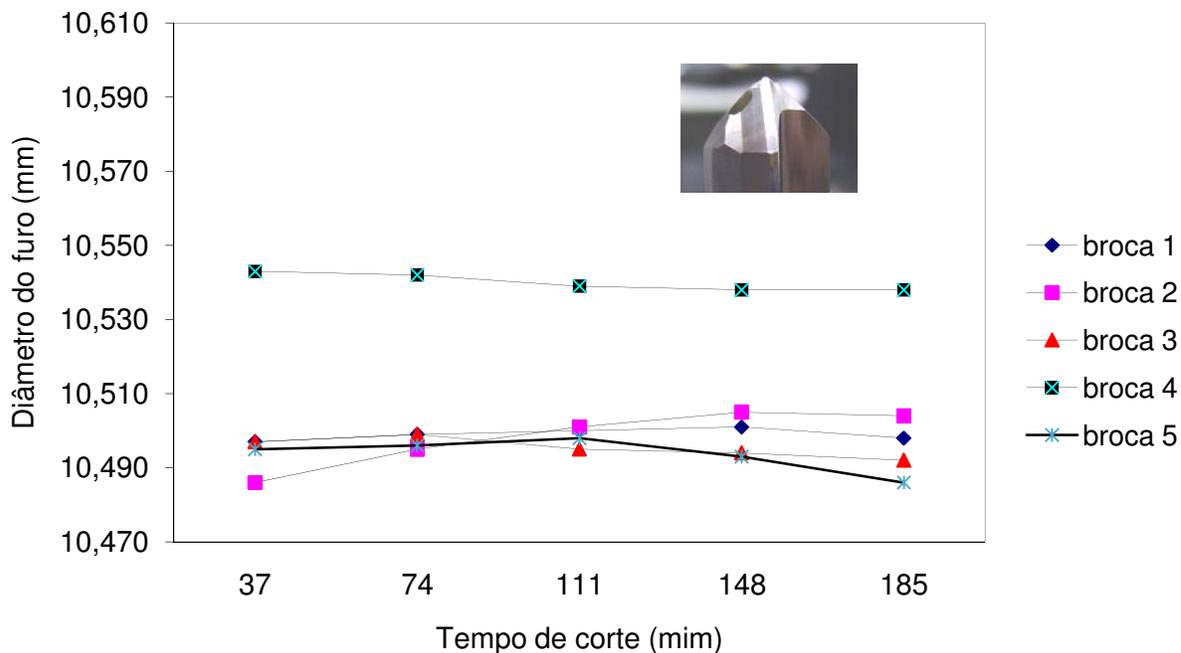


Figura 4.6 - Variação do diâmetro em função ao tempo efetivo de corte para cada broca de geometria *esférica* ($v_c=112$ m/min e $f=0,2$ mm/rot).

A amplitude da variação do diâmetro chega a 0,059 mm na broca *normal* e 0,019 mm na *esférica* nas mesmas condições de usinagem, dados de corte e tempo de corte. O que pode ser observado é uma maior instabilidade dimensional do furo com a broca *normal*.

O desgaste VB se concentrou bem próximo a aresta da ponta de corte na broca *normal* e comprova, conforme literatura, que a principal característica afetada pelo desgaste VB é o diâmetro do furo na qual pode-se observar que a broca de afiação *normal* sofreu variações maiores devido ao seu desgaste maior. Conseqüentemente os esforços, devido ao desgastes, também provocaram maiores vibrações e conseqüentemente interferiu na maior variação do diâmetro do furo com relação a broca *esférica*.

Nas Figuras 4.5 e 4.6, nota-se que em certos intervalos o diâmetro aumenta à medida que o desgaste VB também aumenta, o que a princípio não parece coerente, uma vez que o aumento do VB próximo as guias da broca implicaria na redução do diâmetro da broca e conseqüentemente do furo usinado. Isso se explica pelo fato de que com o aumento do desgaste nas arestas principais de corte aumenta a dificuldade de penetração da broca no material, bem como os esforços de corte.

Ainda, o fato de essa broca ser longa, mesmo apresentando uma característica de construção rígida, pode resultar uma pequena flexibilidade, o que acarreta uma tendência dessa broca fletir e/ou vibrar com esse esforço, ocasionando uma excentricidade na ponta da ferramenta que se refletirá no aumento do diâmetro do furo usinado.

Verifica-se que nesta condição de corte o furo realizado com a broca *esférica* tem uma menor variabilidade dimensional ou uma maior estabilidade dimensional comparada com a broca *normal*. Isto pode ser explicado porque o desgaste VB nesta geometria se limitou ao máximo a 0,3mm, o que ainda não influencia na variação do diâmetro.

A afirmação possível de se fazer pelas figuras anteriores é que a variabilidade do diâmetro ocorrido nos furos usinados é maior nas brocas com geometria *normal* devido também ao fato de que a medida que o desgaste avança, o atrito do cavaco com a aresta cortante eleva os valores de temperatura e pequenas variações de desgaste entre as arestas da broca são encontradas e em consequência disso há maior esforço radial da broca para manter a centragem no corte, aumentando dessa forma as vibrações na usinagem ocasionando variabilidade do diâmetro do furo, o que é observado principalmente na broca de geometria *normal*. Na superfície principal de folga da broca *normal* nota-se um arredondamento da ponta de corte no encontro da aresta principal de corte (S) e a aresta secundária de corte (S'). Este desgaste altera a geometria da broca resultando em arestas desiguais afetando as forças de corte e a qualidade dimensional e geométrica dos furos.

O desgaste das arestas de corte das brocas em afiação *normal* e *esférica* deve-se principalmente ao mecanismo abrasivo nas mesmas durante a usinagem dos furos aumentando desta maneira os atritos e conseqüentemente o desgaste VB.

A amplitude de variação da **circularidade** entre as duas geometrias de corte não variou significativamente, a *esférica* ficou com uma diferença entre a máxima e a mínima medida de 0,009mm e a *normal* com 0,007mm, Figuras 4.7 e 4.8.

Com a broca *esférica* houve uma variação ou oscilação maior da circularidade com uma amplitude pouco maior em relação a *normal*, provavelmente porque a tendência da broca com ponta *esférica* é de não ser autocentrante e assim poder sofrer estas variações.

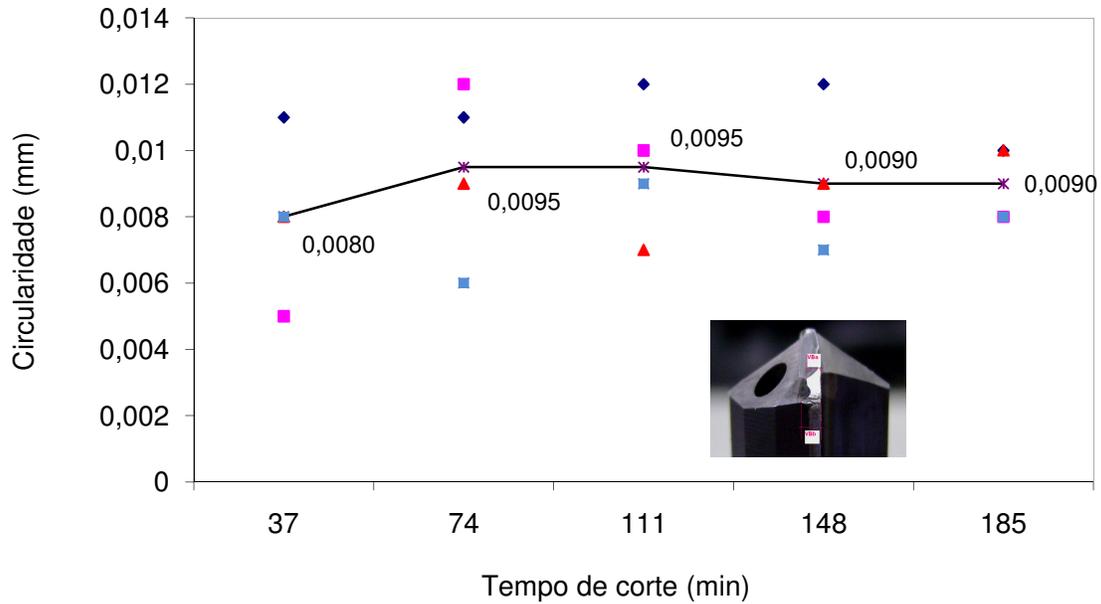


Figura 4.7 - Variação da Circularidade em função ao tempo efetivo de corte para a broca de geometria de ponta *normal* com $v_c=112\text{m/min}$ e $f=0,2\text{mm/rot}$, (média de 4 brocas).

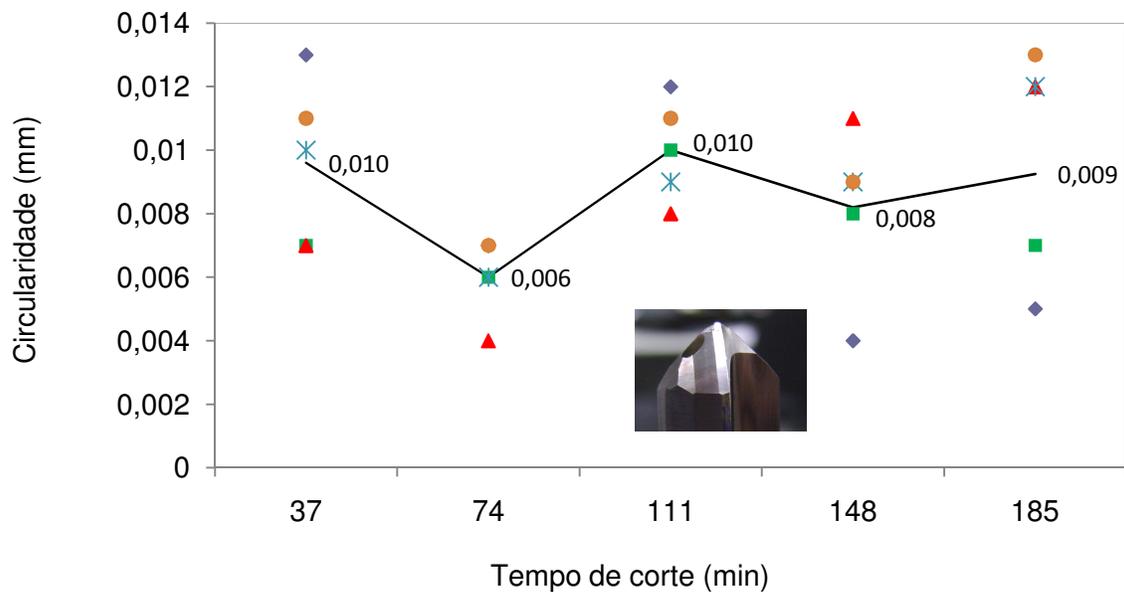


Figura 4.8 - Variação da Circularidade em função ao tempo efetivo de corte para a broca de geometria de ponta *esférica* com $v_c=112\text{m/min}$ e $f=0,2\text{mm/rot}$ (média de 5 brocas).

A amplitude de variação da **cilindricidade** entre as duas geometrias de corte não variou significativamente. A *esférica* ficou com uma diferença entre o máximo e o mínimo de 0,037mm e a *normal* com 0,051mm, apenas uma tendência de crescimento mais acentuada foi observado na geometria *normal* conforme Figuras 4.9 e 4.10.

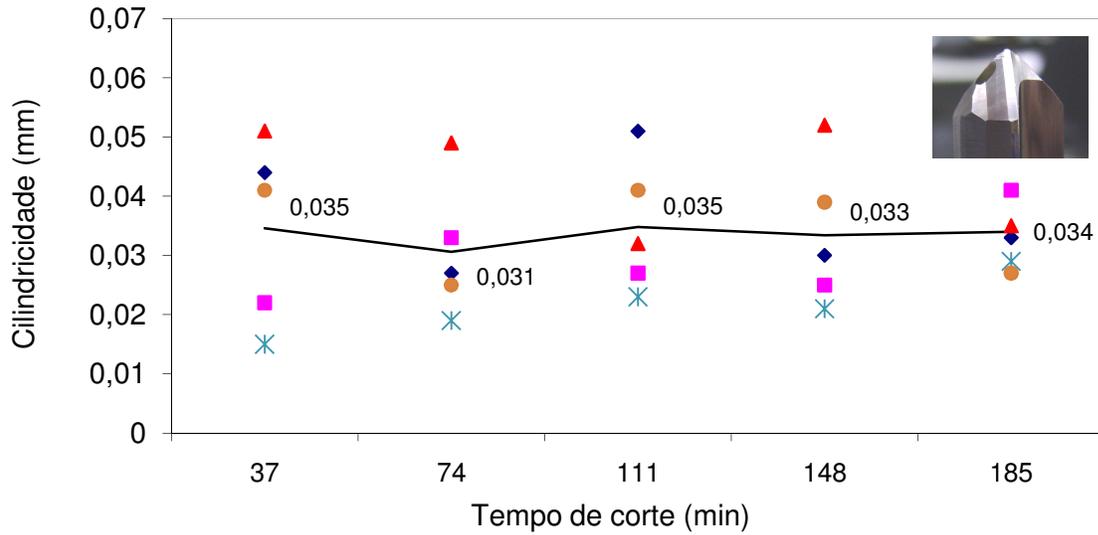


Figura 4.9 - Variação da Cilindridade em função ao tempo efetivo de corte para a broca de geometria *esférica*, $v_c=112\text{m/min}$ e $f=0,2\text{mm/rot}$, (média de 5 brocas).

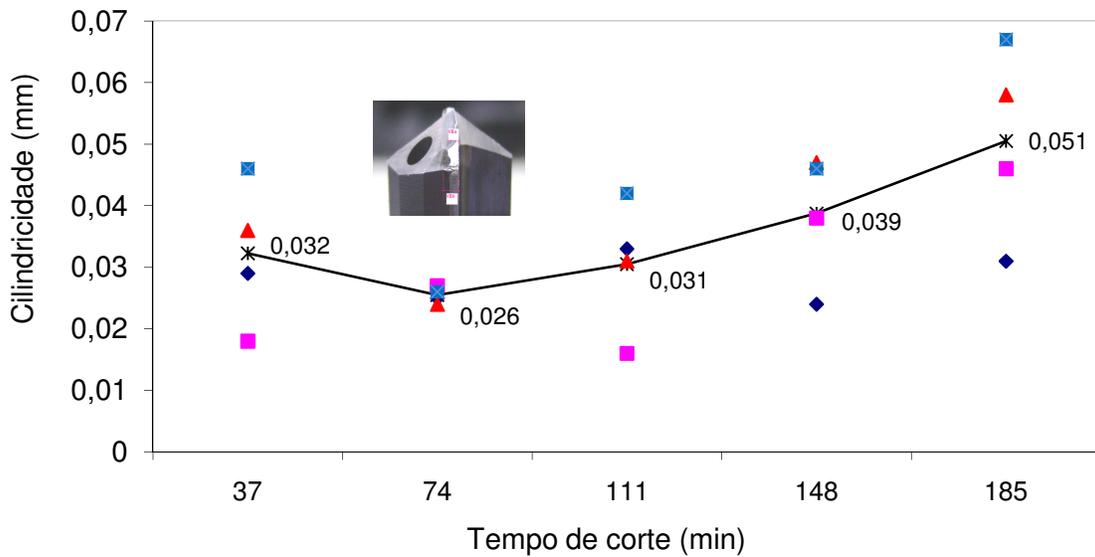


Figura 4.10 - Variação da Cilindridade em função ao tempo efetivo de corte para a broca de geometria *normal*, $v_c=112\text{m/min}$ e $f=0,2\text{mm/rot}$ (média de 4 brocas).

Esta pequena diferença e tendência se devem ao aumento significativo do desgaste VB na geometria *normal* o que pode gerar maiores vibrações e desvios da broca devido à variação de esforços de corte entre as arestas principais. Nota-se na Figura 4.10 que a partir de 74 minutos de corte, a cilindridade começou a aumentar, isto se deve ao fato observado na Figura 4.3 que neste tempo apresenta 0,4 mm de desgaste VB na geometria *normal*. Já a broca esférica a cilindridade permaneceu estável durante todo o tempo de corte até chegar ao fim de vida estabelecido com um desgaste VB de 0,3 mm. A geometria *esférica* é mais estável em termos de cilindridade, explicado devido ao pequeno desgaste VB, comprovando que a cilindridade esta relacionada com o desgaste da ferramenta.

Neste primeiro experimento, comparando ambas as geometrias nos parâmetros de corte originais, o ganho por peça levando em consideração o preço da ferramenta, o custo de afiação, o número de afiações possíveis (nº de vidas) e a produção total de blocos por ferramenta leva a considerar que com a afiação esférica conseguiu-se uma boa redução no custo da ferramenta por bloco produzido conforme Tabela 4.2.

Tabela 4.2 - Comparativo de custo/bloco para as brocas em ambas as geometrias para o 1º experimento ($v_c=112\text{m/min}$, $f=0,2\text{mm/rot}$, $T=185\text{ min}$).

1º Experimento

Geometria da ponta	f mm/volta	v_c m/min	Tempo vida por afiação min	VB	nº médio de afiações	Tempo de vida da broca em blocos	preço broca R\$	preço/afiação R\$	preço total R\$	custo/bloco R\$
<i>Normal</i>	0,2	112	185	1,1mm	7	1596	800	80	1360	R\$ 0,85
<i>Esférica</i>	0,2	112	185	0,1mm	20	4190	800	98	2760	R\$ 0,66

Observando na Tabela 4.2 vê-se que com os mesmos parâmetros de usinagem e tempo de vida por afiação, apenas alterando a geometria de ponta pode-se ter uma redução do custo da ferramenta por bloco em 22% em relação a afiação *normal*. Reduz-se de R\$0,85 para R\$0,66 o custo da ferramenta por peça produzida. Isto é devido ao aumento do tempo de utilização da ferramenta *esférica* no processo com o aumento de número de possíveis afiações, levando em consideração o preço original da ferramenta e o custo da afiação. A geometria normal pode chegar até sete afiações enquanto que a esférica é possível chegar até vinte afiações. O que limita o

numero de afiações é a quantidade necessária de material a ser retirado para recompor a geometria original e o comprimento mínimo da ferramenta exigida na operação.

Para o cálculo custo de usinagem por peça foi utilizado a Equação 4.1 conforme abaixo:

$$C_p = C_{us} + C_{um} + C_{uf} \quad (4.1)$$

Onde:

C_p - custo de usinagem por peça;

C_{us} - custo de mão de obra de usinagem;

C_{um} - custo da máquina (depreciação, manutenção, energia consumida, etc.);

C_{uf} - custo da ferramenta por peça.

Neste estudo iremos avaliar-se-á somente os custos relacionados com a ferramenta, logo os custos de mão de obra e custo máquina não entrarão no cálculo.

Custo ferramenta, por peça será dado na Equação 4.2:

$$C_{uf} = \frac{(V_{fi} + (C_{af} \times N_a)) \cdot t}{T \cdot (N_a + 1)} \quad (4.2)$$

Onde:

C_{uf} - custo total da ferramenta/peça;

t - tempo efetivo de corte/peça [min/bloco];

T - tempo de vida/afiação [min];

V_{fi} - valor inicial de aquisição da ferramenta (preço da broca);

C_{af} - custo da afiação (preço da afiação);

N_a - número de afiações da ferramenta;

4.2 Segundo experimento

No segundo experimento, utilizando a broca *esférica* e objetivando aumentar o tempo efetivo de corte por afiação, foi realizado o teste mantendo-se os parâmetros atuais e limitando o fim de vida em 0,3mm de desgaste VB. O resultado, conseqüentemente, foi o aumento da utilização da ferramenta por afiação e um menor número de paradas de máquina para troca de ferramenta na produção.

Foram utilizadas quatro brocas de afiação *esférica* e a partir da vida de 185 minutos de corte continuou-se a usinar com os mesmos parâmetros originais do processo. Foi feito o monitoramento do desgaste VB, do diâmetro do furo, da circularidade e cilindricidade a cada intervalo de 37min de corte até que chegasse a um desgaste VB= 0,3mm. Assim, conforme Figura 4.11, foi verificado que o tempo efetivo de corte alcançou 296 min até o critério de fim de vida o desgaste VB=0,3mm.

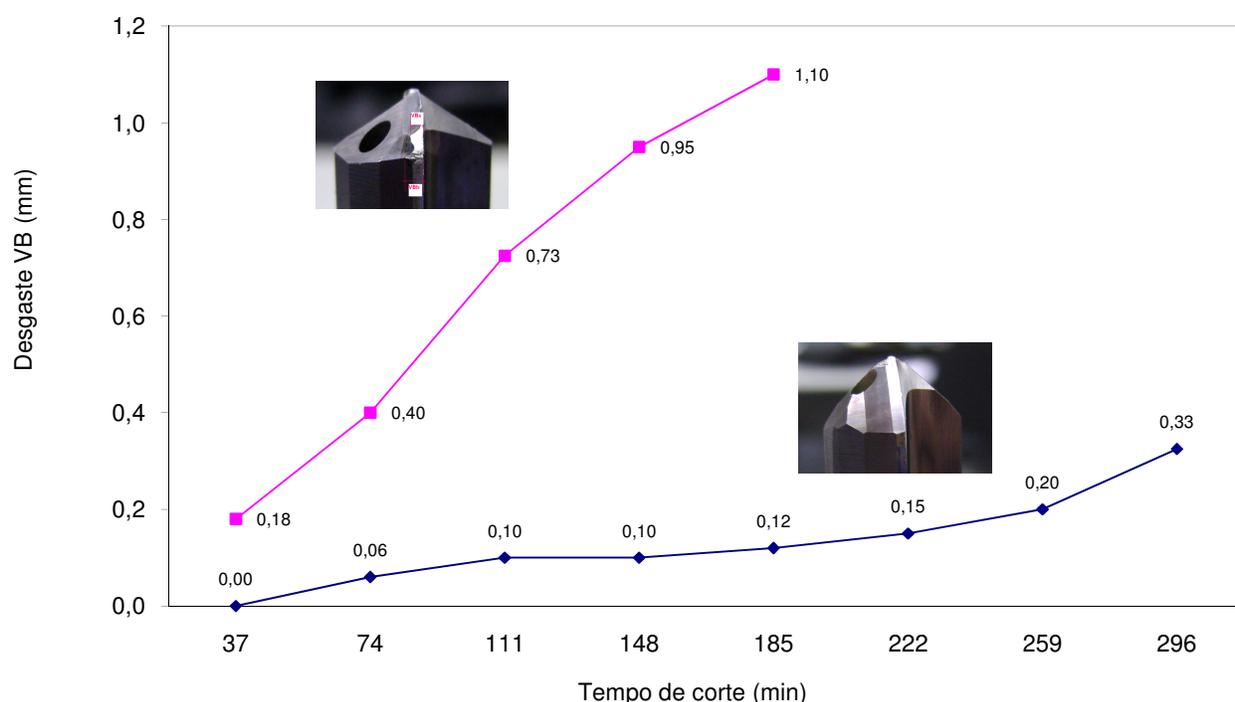


Figura 4.11 - Comparativo do desgaste VB da ferramenta de geometria *esférica* e *normal* em função do tempo efetivo de corte com $v_c=112\text{m/min}$ e avanço $f=0,2\text{mm/rot.}$

Os pontos levantados no gráfico do desgaste VB são as médias dos desgastes de cinco brocas até 185min e quatro brocas até os 296min de corte na geometria *esférica*.

Observa-se na Figura 4.11 que a ferramenta de geometria de ponta *esférica* atingiu uma vida 60% maior e com um desgaste quatro vezes menor que a geometria *normal* nas condições de corte originais do processo utilizados no primeiro experimento. Conseguiu-se chegar a 296minutos de corte efetivo ou 200 metros de percurso usinado somente com a mudança da geometria do corte da broca para um desgaste VB de 0,3mm.

A **circularidade**, não sofreu variações significativas conforme Figura 4.12. Manteve-se nos patamares semelhantes a do primeiro experimento, ou seja, sem tendência a um aumento ou diminuição no intervalo de tempo entre 185 min até 296min. Isto é justificado devido ao pequeno desgaste VB atingido pela broca que foi definido até o limite de 0,3mm máximo. Observando melhor o gráfico da circularidade, houve uma tendência de aumento a partir de 222min de corte, próximo a um desgaste VB de 0,2mm. Até 269 min houve esta tendência de crescimento, mas não se pode afirmar se este crescimento persistiria, pois será necessário uma continuidade deste teste para acompanhar a tendência e a dispersão dos resultados não permite chegar a essa conclusão.

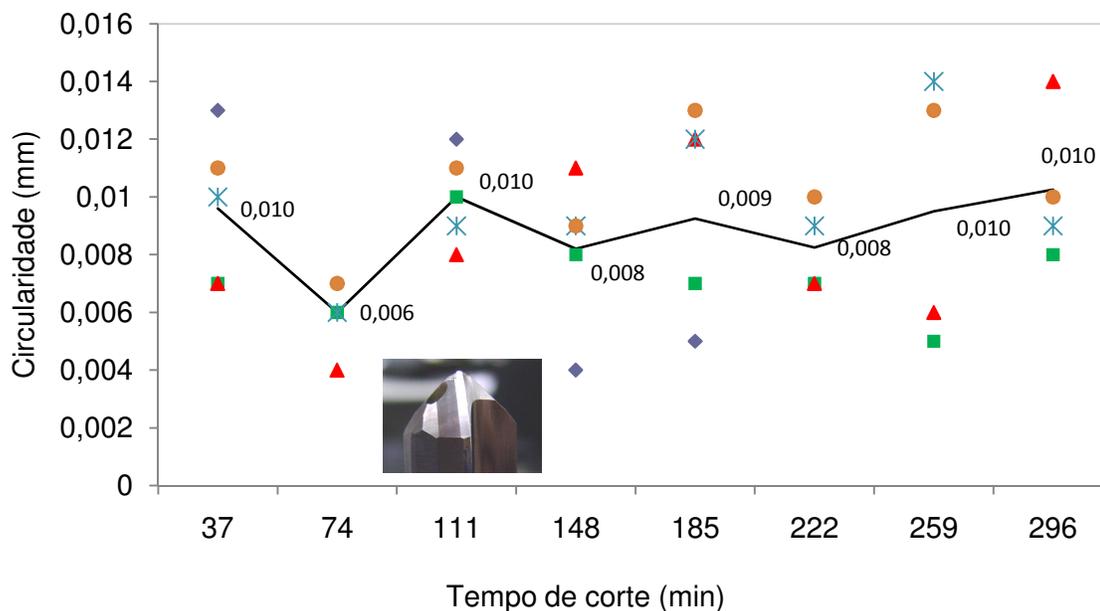


Figura 4.12 - Variação da Circularidade em função ao tempo efetivo de corte para a broca de geometria *esférica* com $v_c=112\text{m/min}$ e avanço $f=0,2\text{mm/rot}$.

Os resultados do gráfico mostram que com o aumento do desgaste da ferramenta até o limite de 0,3mm, manteve-se uma média do erro de circularidade de certa forma constante (estável), mas com certa dispersão nos resultados durante todo o tempo de corte.

A **cilindricidade** manteve-se sem variações significativas nas condições deste experimento conforme observado na Figura 4.13. Nota-se que o comportamento de tendência foi semelhante ao erro de circularidade, ou seja, houve uma estabilidade até o tempo de 296min de corte e com uma dispersão regular durante o processo.

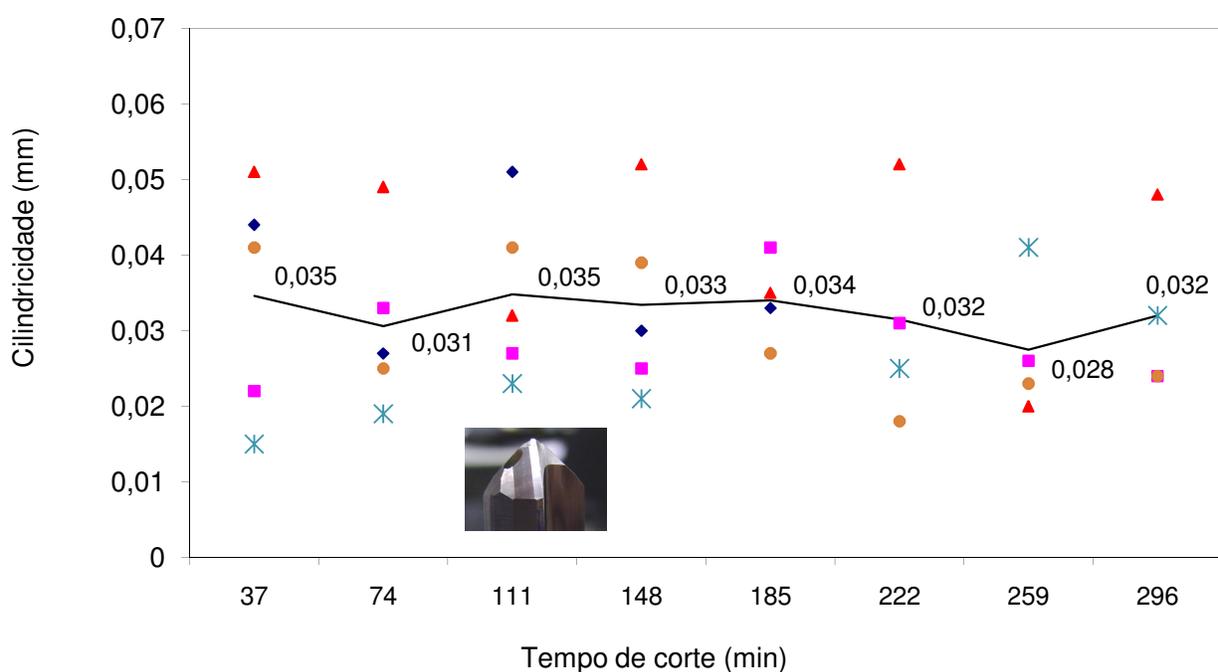


Figura 4.13 - Variação da Cilindricidade em função ao tempo efetivo de corte para a broca de geometria *esférica* com $v_c=112\text{m/min}$ e avanço $f= 0,2\text{mm/rot}$.

Conforme mostra a Figura 4.14 a variação do diâmetro, nesta condição de corte, é muito pequena ou insignificante realizado com a broca *esférica*. A broca de canal reto tem a característica de uma menor variabilidade dimensional ou uma maior estabilidade dimensional devido a sua maior rigidez e características geométricas de construção. Mesmo com a geometria de ponta *esférica* que segundo a literatura diz que tende sofrer desvios e logo possíveis variações

dimensionais, nos mostra uma boa repetibilidade dimensional. Neste caso a geometria esférica proporciona uma melhor estabilidade dimensional durante todo o tempo de vida.

Nota-se que a variação do diâmetro do furo não é um bom parâmetro para avaliação de fim de vida da ferramenta devido sua baixa sensibilidade à variação do desgaste VB.

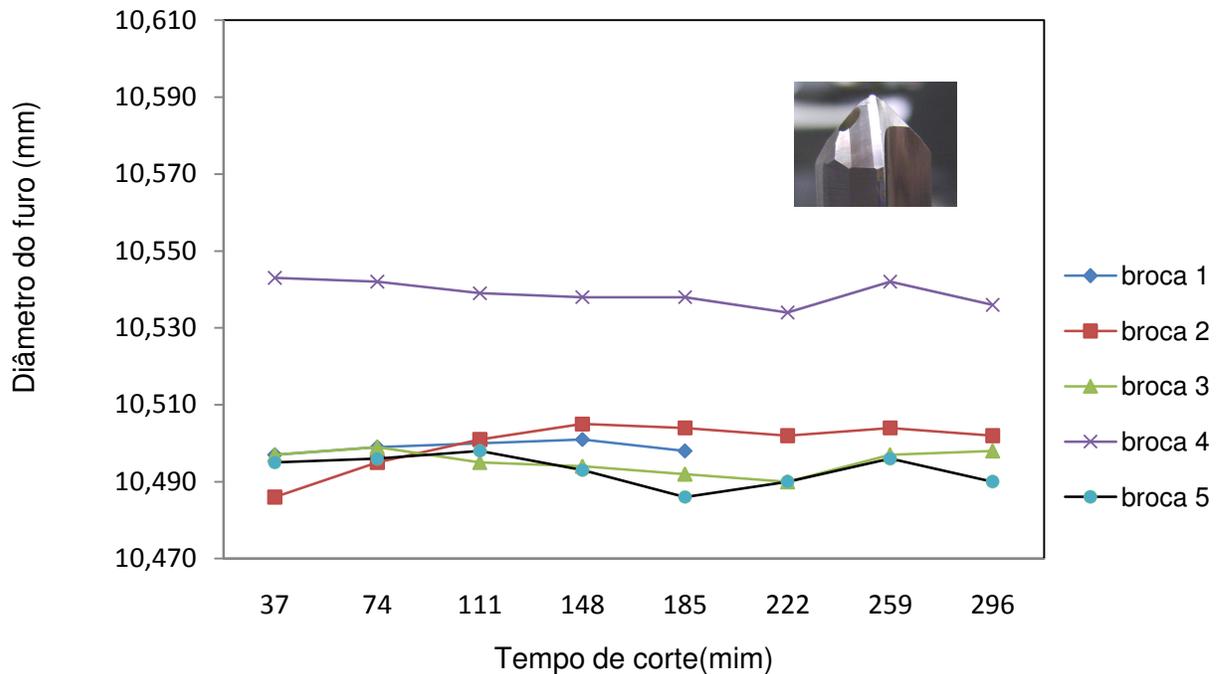


Figura 4.12 - Variação do diâmetro em função ao tempo efetivo de corte para cada broca de geometria *esférica* com $v_c=112\text{m/min}$ e avanço $f=0,2\text{mm/rot}$.

Neste 2º experimento com a visão de redução de custos levando em consideração o valor da ferramenta, o custo de afiação, quantidade de blocos produzidos por ferramenta e o número de afiações possíveis, conforme Tabela 4.3 apresenta uma relação de possíveis ganhos nos experimentos realizados.

Tabela 4.3 - Comparativo de custo/bloco para as brocas esféricas para o 2° experimento.

2° Experimento

Geometria da ponta	f mm/volta	vc m/min	Tempo vida por afiação min	VB	n° médio de afiações	Tempo de vida da broca em blocos	preço broca R\$	preço/afiação R\$	preço total R\$	custo/bloco R\$
<i>Esférica</i>	0,2	112	296	0,3mm	15	5107	800	98	2270	R\$ 0,44

Vê-se que o limitador em 0,3 de desgaste VB possibilitou ainda uma quantidade de afiação próxima ao do primeiro experimento, pois o desgaste da aresta transversal impossibilita que na afiação para a restauração do corte seja inferior a 0,5mm, limitando o número de afiação nestes patamares. Conclui-se que um desgaste de flanco menor que 0,3 mm se torna menos econômico conforme o primeiro experimento.

Foi observado que usando uma afiação *esférica*, com o fim de vida da ferramenta em 185min, conforme 1° experimento teve uma redução do custo de ferramenta em 22% comparado com a afiação *normal*. Aplicado um fim de vida da ferramenta para 296min de corte por afiação, conforme 2° experimento teve uma redução de 48% no custo de ferramenta por bloco. O custo da ferramenta passa de R\$0,85 para R\$0,44 por bloco, que é alcançada levando em consideração apenas os ganhos com o aumento da vida da ferramenta e custos de afiação sem levar em consideração os tempos e custos de paradas de máquina para troca de ferramenta. Caso fossem considerados os custos de paradas de máquinas para troca de ferramenta, os ganhos seriam maiores ainda. Além dos ganhos com o menor tempo de máquina parada para troca de ferramenta, tem-se menor tempo de pessoal da afiação envolvido na coleta e gerenciamento da broca, e menor volume de ferramentas consumidas para uma mesma produção possibilitando o uso destes recursos para outra aplicação.

4.3 Terceiro experimento

De acordo com o processo de fabricação deve-se escolher qual o objetivo da otimização. Pode-se trabalhar com duas grandezas de otimização: minimização dos custos de fabricação ou minimização do tempo de fabricação. Neste experimento o objetivo foi a redução do tempo de

fabricação com o aumento da velocidade de corte e comparar os custos de produção relativos a ferramenta com os experimentos anteriores.

Neste 3º experimento foi feito dois testes empregando velocidades de corte maiores em 10% equivalente a $v_c=123\text{m/min}$ e 20% com $v_c=134\text{m/min}$ em relação aos parâmetros iniciais do processo com o limitador de fim de vida o desgaste na aresta principal de corte $VB=0,3\text{mm}$. Foram utilizadas três brocas *esféricas* em cada uma das velocidades de corte. Foi empregada a mesma metodologia dos experimentos anteriores, mas agora considerando uma redução dos tempos de usinagem nestes parâmetros e assim poder avaliar os resultados de vida da ferramenta, circularidade, cilindridade, dimensional dos furos usinados e os custos envolvidos nesta aplicação. Manteve-se o mesmo avanço linear por volta ($f=0,2\text{mm/rot}$) e foi analisado principalmente os resultados do desgaste VB que foi o limitador da vida da ferramenta. A aresta transversal apresentou a mesma deformação que nos experimentos anteriores. O resultado como era de ser esperado foi o desgaste de origem abrasiva maior da ferramenta com uma diminuição da vida proporcional a velocidade de corte.

Na Figura 4.13 é apresentada a variação da **cilindridade** na velocidade de corte 10% e 20% maiores para a broca de geometria *esférica*.

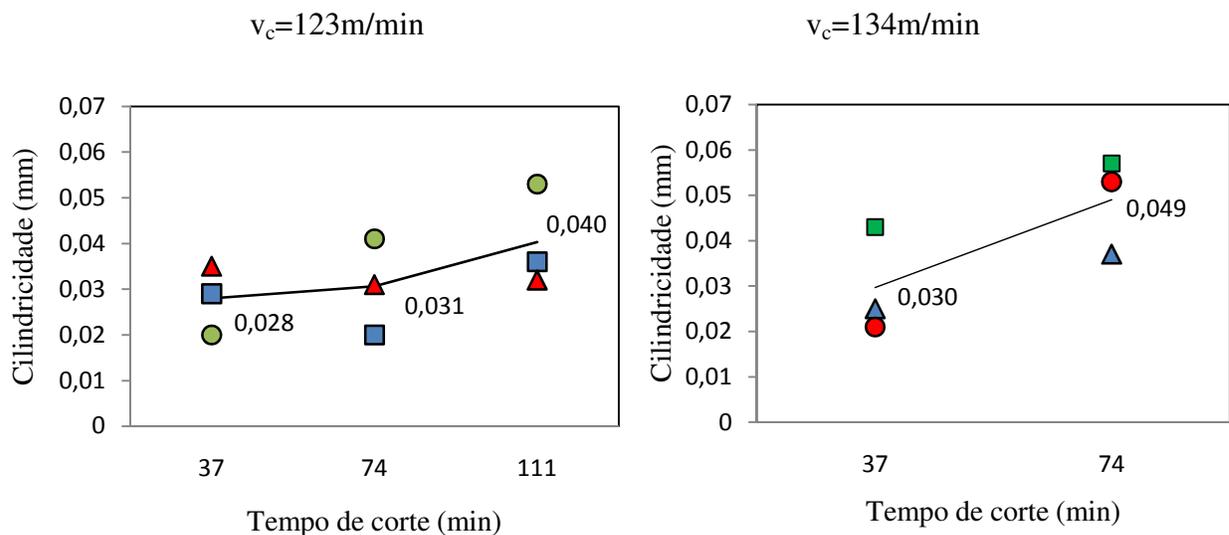


Figura 4.13 - Variação da Cilindridade em função ao tempo efetivo de corte para a broca de geometria *esférica* nos parâmetros de corte $v_c=123\text{ m/min}$ e $v_c=134\text{m/min}$ com $f=0,2\text{mm/rot}$, (média de 3 brocas).

Na Figura 4.14 é apresentada a variação da **circularidade** na velocidade de corte 10% e 20% maiores para a broca de geometria *esférica*.

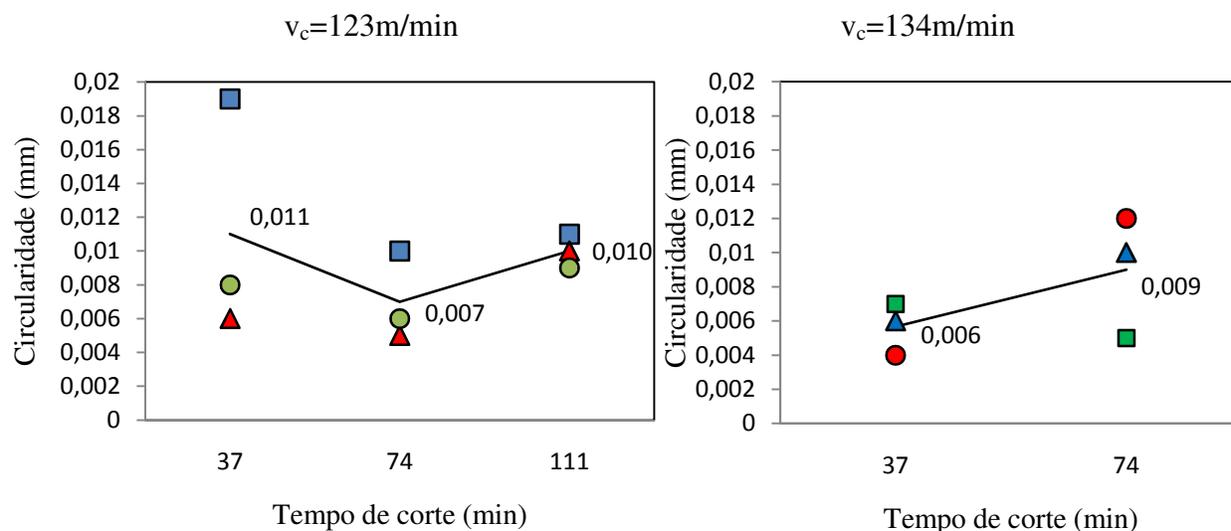


Figura 4.14 - Variação da Circularidade em função ao tempo efetivo de corte para a broca de geometria *esférica* nos parâmetros de corte $v_c=123\text{m/min}$ e $v_c=134\text{m/min}$ com $f=0,2\text{mm/rot}$, (média de 3 brocas).

Algumas discontinuidades nas medições também podem ser explicadas pela possível presença de inclusões no ferro fundido e não devido à característica da broca de afiação *esférica* não ter uma característica auto-centrante. Supostas inclusões poderia ser o motivo de ter ocasionado uma variação maior na medição de circularidade nos primeiros 37 minutos de furação.

O desgaste prematuro provocado nas brocas nesta condição reduziu a vida da ferramenta drasticamente. A broca de metal duro e de canal reto apresenta pouca tendência da flexão durante o corte, mesmo assim resultou em uma variação na circularidade do furo. Com o limite do desgaste VB estipulado até 0,3mm os tempos de vida para estas velocidades sofrem alterações significativas nestes experimentos.

Na seqüência é apresentado os gráficos do desgaste (Figura 4.15) e observado nestes que o desgaste VB de algumas brocas testadas alcançou um valor às vezes acima do limite estipulado, mas sem comprometer os resultados. Em seguida é apresentada a variação do diâmetro do furo (Figura 4.16) para as velocidades de corte 123m/min e 134m/min.

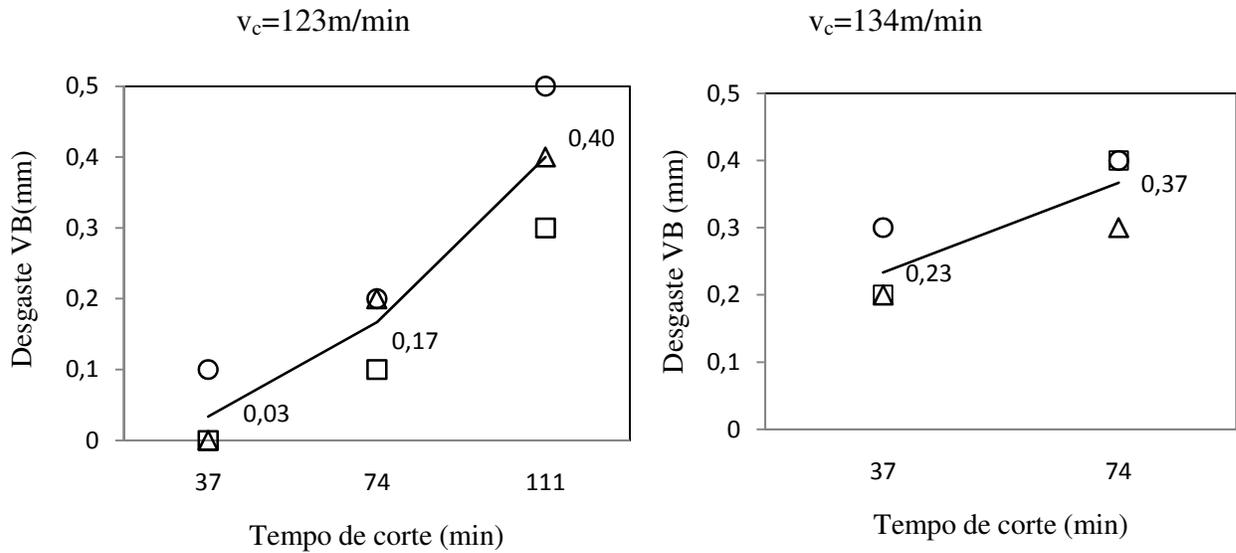


Figura 4.15 - Desgaste VB da ferramenta de geometria *esférica* em função do tempo efetivo de corte com $v_c=123\text{m/min}$ e $v_c=134\text{m/min}$ com $f=0,2\text{mm/rot}$, (média de 3 brocas).

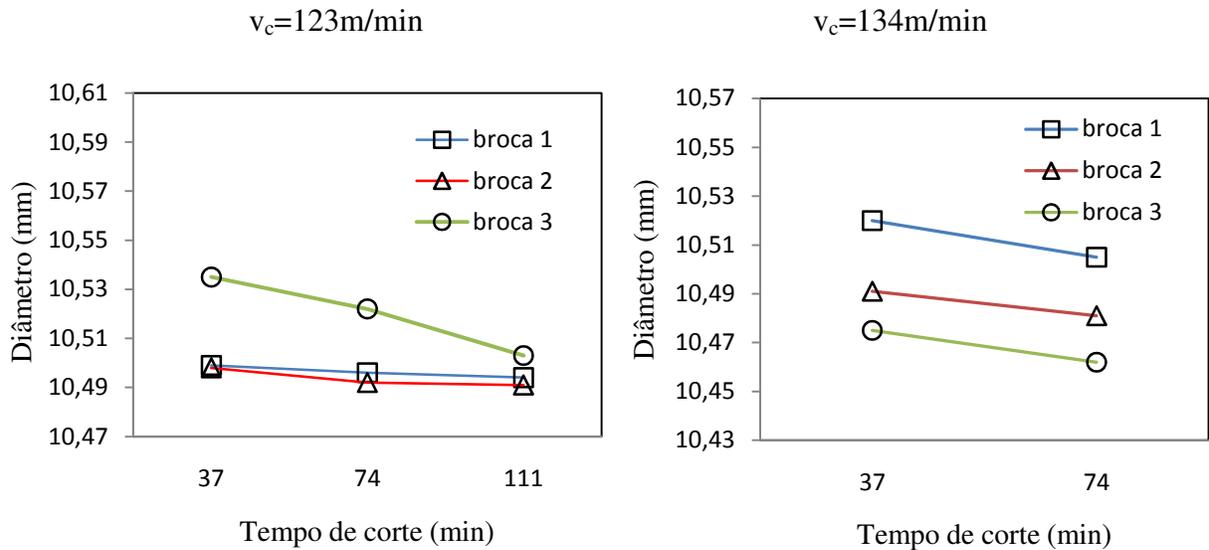


Figura 4.16 - Variação do diâmetro em função ao tempo efetivo de corte para cada broca de geometria *esférica* testada na $v_c= 123\text{m/min}$ e $v_c=134\text{m/min}$ com $f=0,2\text{mm/rot}$, (média de 3 brocas).

Durante a usinagem é observada um aumento do desgaste da ferramenta com o aumento na velocidade de corte, comprovando a equação para a vida da ferramenta proposta por Taylor que tem o objetivo de explicar esse comportamento.

Pelos resultados obtidos, o alargamento do furo mostrou uma correlação com os parâmetros existentes para velocidade de corte (v_c) maiores, pois nota-se que há uma pequena tendência de diminuição do diâmetro do furo devido ao desgaste VB próximo às guias da broca.

Na Tabela 4.4 são apresentados os custos da ferramenta por bloco produzido em ambas às velocidades de corte na broca de geometria de ponta *esférica*. O critério de fim de vida de ambas as brocas nas velocidades de corte testadas foi o desgaste máximo VB 0,3mm o que possibilitou um tempo de vida de 111 minutos de corte efetivo para a $v_c=123$ m/min e 74 min de corte efetivo para a $v_c=134$ m/min. Chegou-se a um volume de peças de 2103 blocos para a $v_c=123$ m/min e para a $v_c=134$ m/min chegamos a 1528 blocos, ou seja, perdeu-se na quantidade de blocos usinados por vida da ferramenta. Desta forma o custo de produção, levando em consideração o custo da ferramenta, custo afiação, o numero de afiações e as peças produzidas por broca, não apresentou um resultado satisfatório. Observa-se que o desgaste médio ultrapassou o VB de 0,3 mm , no entanto não foi considerado relevante para as conclusões finais.

Tabela 4.4 - Comparativo de custo/bloco para as brocas em ambas as geometrias para o 3° experimento usando velocidade de corte 10% e 20% mais altas que a do 1° experimento.

3° Experimento

Geometria da ponta	f mm/volta	v_c m/min	Tempo vida por afiação min	VB	n° médio de afiações	Tempo de vida da broca em blocos	preço broca R\$	preço/afiação R\$	preço total R\$	custo/bloco R\$
<i>Esférica</i>	0,2	123	111	0,3mm	15	2103	800	98	2270	R\$ 1,08
<i>Esférica</i>	0,2	134	74	0,3mm	15	1528	800	98	2270	R\$ 1,49

Com o aumento da velocidade de corte os custos de fabricação não puderam ser reduzidos. Em decorrência da diminuição da vida da ferramenta com o aumento da velocidade de corte, o número de trocas de ferramentas torna-se mais freqüente, tendo-se assim também um crescimento do custo indireto com ferramenta. A quantidade de peças produzidas por vida é reduzida em 59%

na $v_c=123\text{m/min}$ e 70% para $v_c=134\text{m/min}$ em relação a $v_c=112\text{m/min}$. Além disso, em velocidade de corte maior, ocorre paradas mais freqüentes da máquina para a substituição da ferramenta, que pode aumentar ainda mais os custos com tempo de troca de ferramenta aumentando custos de afiação e como conseqüências o custo de produção por bloco. Nestes parâmetros os ganhos com o tempo de ciclo não significaram aumento de ganhos e sim apenas em redução de tempo peça. Um aumento de 10% na velocidade de corte resultou num aumento de custo da ferramenta por peça em 145% e com 20% a mais de velocidade de corte o custo aumentou em 238%, considerando que em ambas as velocidades o tempo de vida esta limitado pelo desgaste $VB=0,3\text{mm}$.

Nas v_c 10% e 20% maiores se ganhou em tempo de produção na furação de 0,93min/bloco para 0,84min/bloco (5 segundos) e 0,78min/bloco (9 segundos) respectivamente o que fica antieconômico a viabilização destas condições neste processo de produção em que os custos de ferramenta são considerados mais importantes do que tempos de máquina.

4.4 Considerações sobre os resultados

Para finalizar os comentários sobre os resultados alcançados é relevante dizer que nos ensaios alguma outra explicação sobre os mecanismos que levam o desgaste prematuro da ferramenta ou variação mais acentuada nos dados não foram analisados, como exemplo os aspectos metalúrgicos do material.

O efeito da velocidade de corte sobre o desgaste das ferramentas mostrou-se, como esperado, pois à medida que a velocidade de corte aumenta, a taxa de desgaste torna-se consideravelmente maior. Assim, o melhor resultado de vida na geometria *esférica* foi verificado para velocidade de corte 112m/min, nas quais os efeitos da temperatura são menos significativos, proporcionando assim um maior tempo de vida para as ferramentas.

Com os resultados, atingiu-se o objetivo deste trabalho de entender o comportamento de ambas as geometrias de brocas testadas e foi possível a definição da geometria de ponta da broca e velocidade de corte para o processo de furação de peças de ferro fundido de melhor desempenho

levando em consideração os custos de produção para cada experimento, mantendo a qualidade do produto.

5 CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA FUTUROS TRABALHOS

5.1 Conclusões

O desempenho das brocas utilizadas nos ensaios foi claramente afetado pela geometria de afiação empregada nas ferramentas, visto que todos os testes foram absolutamente coincidentes com condições de corte adotadas, material furado, sistema de fixação e características do metal duro das ferramentas utilizadas, diferenciando-se somente as geometrias presentes em cada broca.

O resultado deste estudo reforça a conclusão que arestas de corte em forma de raio têm a propriedade de dissipar melhor o calor gerado durante a usinagem para brocas de canal reto.

O melhor desempenho da broca com a geometria *esférica* está comprovado e pode estar associado ao fato da mesma ter arestas principais de corte maiores, nas quais, a distribuição do calor de usinagem gerado se dá em um comprimento maior e a carga por área se torna menor do que na broca com a geometria cônica *normal*. O aumento da área de contato cavaco-ferramenta implica em maior facilidade de dissipar o calor, mas deve-se cuidar para que o aumento do calor gerado não se sobressair sobre o aumento da dissipação de calor, o que ocorreu em condições de velocidades de corte mais altas.

A eficácia da geometria de afiação tipo *esférica* foi demonstrada onde a mesma se mostra superior a geometria de afiação *normal* em comprimento usinado e retardamento na evolução dos desgastes da aresta principal de corte VB, critério este muito difundido para caracterizar-se fim de vida de ferramentas.

Esta nova geometria apresentou uma redução do desgaste e conseqüentemente uma sensível diminuição dos tempos com afiação, aumentando a vida útil total da ferramenta, resultando numa diminuição do consumo de brocas. Isto ocorre devido ao maior número de afiações possíveis com maior aproveitamento da ferramenta em usinagem, nos parâmetros de corte originalmente definidos.

Para a broca de geometria *esférica*, com a condição de fim de vida em 296 min foi a de maior ganho na produção e menor custo de ferramenta nos parâmetros de corte originais.

O monitoramento do desgaste da broca nos estágios de tempo de análise da ferramenta mostrou que independente da geometria testada o mecanismo predominante de desgaste é o de abrasão. Entretanto uma pequena adesão esteve presente em algumas etapas da vida ferramenta. A região da ponta de corte da broca é a área de maior intensidade do desgaste. A marca de desgaste mostrou-se mais uniforme para a geometria *esférica* que por não apresentar uma ponta de corte aguda e a aresta de corte sendo de maior comprimento, distribuiu melhor o calor ao longo da aresta, o que possivelmente explica o seu melhor desempenho. Neste estudo a vida da ferramenta foi aplicada como um dos critérios mais importantes, afinal para indústria esta tem impacto direto nos custos de usinagem. A variação da velocidade de corte neste estudo mostrou ser um fator significativo, tendo influência direta na vida da ferramenta. As pontas de cortes da ferramenta foram às regiões mais solicitadas, logo a geometria de ponta *esférica* que apresentou alguma forma de redução da concentração de tensões nesta área proporcionaram o melhor desempenho. A broca de geometria *esférica* apresenta aproximadamente quatro vezes maior o tempo de vida se comparada com a geometria *normal* para um mesmo desgaste VB de 0,3mm nos parâmetros originais de corte.

Os diâmetros dos furos com a geometria *esférica* não se afastaram muito de um valor nominal da ferramenta e a dispersão dos resultados foi menor que para a geometria *normal*. A velocidade de corte maior neste caso não afetou de forma significativa o erro dimensional dos furos. Acredita-se que esta estabilidade não está relacionada apenas devido a broca de canal reto ter esta característica, mas também esteja relacionada ao baixo batimento da broca no sistema de fixação e com a boa rigidez do dispositivo de fixação, aliado ao fim de vida ser o desgaste VB considerado pequeno para a alteração significativa do dimensional dos furos. A geometria de ponta *esférica* apresenta uma tendência de não ser uma ferramenta com propriedades auto centrante, mas como sendo uma broca que apresenta maior rigidez de construção que a broca helicoidal veio compensar este inconveniente.

Os erros geométricos de circularidade oscilaram muito pouco para as duas geometrias, mas notou-se uma relação entre o erro geométrico e o desgaste da ferramenta. No final da vida da ferramenta notou-se maiores desvios de circularidade, mostrando uma tendência em aumento devido a pior condição de desgaste. Brocas com geometria *esférica* provaram que de fato, arestas

curvilíneas apresentam resultados dimensionais mais precisos e desgastes bem menores neste processo e produzem dessa forma condições propícias para possibilitar o aumento da vida da ferramenta e ganhos em produtividade.

O estudo e monitoramento do desgaste possibilitaram a definição da geometria de ponta da broca de melhor desempenho utilizando os parâmetros originais do processo levando em consideração não apenas os tempos de produção, mas também os tempos e custos de utilização da ferramenta e afiação.

Em função dos resultados obtidos nos ensaios e os aspectos da geometria de afiação em brocas de canais retos de metal duro e seus respectivos desempenhos, algumas conclusões puderam ser relatadas e futuros trabalhos de complementação deste estudo são sugeridos.

5.2 Sugestões para futuros trabalhos

Sugestões para a continuidade das pesquisas nesse campo com o uso de afiações de arestas curvas pode-se citar:

- o estudo mais aprofundado da relevância das afiações e sua relação custo benefício dentro de um ambiente mais completo de dados (máquina, mão de obra, custo fixo,..);

- estudo da influência da largura da aresta transversal da broca no desempenho da ferramenta de afiação esférica;

- estudo do comportamento com diferentes coberturas nas brocas esféricas;

- comparativo de esforços de corte entre as geometrias de ponta;

- comparativo com a alteração do raio modificando o comprimento da ponta;

- testar geometria *esférica* em diâmetros de brocas menores;

- estudo sobre os efeitos do fluido lubri-refrigerante, investigar outras condições de pressão de refrigeração interna na ferramenta, vazão ou concentração do fluido;

- usar avanços maiores do que os utilizado neste estudo sem variar velocidade de corte.

Estes propostas e outros estudos devem ser conduzidos visando a grande carência de informação referente aos mesmos, onde quase sempre os ensaios e resultados empíricos acabam prevalecendo sobre hipóteses analíticas e teóricas, devido a complexidade de elaboração das

mesmas sem ensaios para referenciamento das mesmas. O conhecimento melhor da tecnologia de furação, permitirá a sua utilização cada vez mais racional.

Referências

AGOSTINHO, O.L.; RODRIGUES, A. C. dos S.; LIRANI, J. **Tolerância, ajustes, desvios e análise de dimensões**. São Paulo: Editora Edgard Blucher, 1977, 295p.

AMORIN, H. J.; **Estudo da relação entre velocidade de corte, desgaste de ferramenta, rugosidade e forças de usinagem em torneamento com ferramenta de metal duro**. 2002. 114p. Dissertação de Mestrado, Departamento de Engenharia Mecânica, UFRGS, Porto Alegre, Brasil.

AMORIM, H. J.; **Processos de Fabricação por Usinagem - Furação** - Disponível em: http://www.ufrgs.br/gpfai/download/eng03343_19.pdf. 2003. Acesso em: fevereiro 2011.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6023**: informação e documentação: elaboração. Rio de Janeiro, 2002. 24p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6162**: Movimentos e relações geométricas na usinagem dos metais. Rio de Janeiro, 1989.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6163**: Geometrias de Corte das Ferramentas, Rio de Janeiro, 1989.

BARBOSA, L.M; MIRANDA, G.W.A. **Monitoramento do comportamento da broca chamdrill na usinagem do ferro fundido cinzento**. 2005. Universidade de Taubaté – UNITAU, Jd. Morumbi Taubaté, São Paulo.

BOSSARDI, Júlio Celso dos Santos. **Análise Comparativa dos Meios Lubri-Refrigerantes na Furação do Ferro Fundido Vermicular com Brocas Helicoidais de Metal-Duro Revestidas com TiAlN**. 2008. 118p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica). Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, Santa Catarina.

CAPUANO, M. N., **Avaliação e Monitoração do Desgaste de Ferramentas no Processo de Furação**. 2004. 148p. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) – Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade de São Paulo, São Paulo.

CARNEIRO, Paulo Augusto Osório, **Metalografia e Tratamentos Térmicos II Ferro Fundido**, Disponível em: <<http://www.perdiamateria.eng.Br/Trabalhos/ferrofundido.doc>>, 2005,10p. Acesso em 14/05/2009.

CASTILLO, W. J., **Furação Profunda de Ferro de Ferro Fundido Cinzento GG25 com Brocas de Metal-Duro com canais Retos**. 2005. 135p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica). Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis.

CHIAVERINI, Vicente. **Aços e ferros fundidos**. 7. ed. São Paulo: Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais ABM, 2005. 599p.

CHIAVERINI, Vicente. **Tecnologia Mecânica**. 2. ed. Vol. 3, Vol.2, São Paulo: Editora McGraw-Hill do Brasil, 1986. 305p.

CIMM. **Material didático sobre usinagem**. Disponível em: <http://www.cimm.com.br/portal/publicacao>. Acesso em: novembro de 2010.

COLPAERT, Hubertus. **Metalografia dos produtos siderúrgicos comuns**. 3 ed. São Paulo: Editora Edgard Blucher, 1974. pg.318.

CORRÊA, Maurício. **Um Estudo Comparativo do Comportamento das Afições Cônica e Cônica Radial (Racon) em Brocas Helicoidais de Aço Rápido**.1996. 118p. Tese (Mestrado em Engenharia Mecânica). Universidade Estadual de Campinas, Campinas.

DA SILVA, H.A. **Influência do Ciclo de Furação na Usinabilidade do Ferro Fundido Cinzento GH190**. 2010. 169p. Dissertação de Mestrado, Universidade de Uberlândia, Uberlândia.

DE VOS, P. **Aumente a produtividade- seriamente**. Revista The New Edge, nº 1, Editada pela Seco Tools, 2008.

DINIZ, A. E.; MARCONDES, F. C.; COPPINI, N.L.. **Tecnologia da Usinagem do Materiais**, Art. Líber Editora, 5º ed, 2006. 256 p.

GUHRING. **Catálogo broca** (CatalogDrills.htmFull-Line Catalog Guhring's) . Disponível em: <http://www.guhring.com> . 408 p. Acesso em: Janeiro 2011

GOMES, J.de O.; **Disciplina MR 648 Tópicos em Usinagem dos Metais**. Apostila / Material didático das aulas do Professor: Jefferson de Oliveira Gomes, UNICAMP, Mestrado Profissional em Engenharia Automobilística. 2º semestre de 2009

DEONÍSIO, Carlos Cesar de Castro, **Furação em Ligas de Titânio com Brocas Helicoidais de Aço Rápido**, 1996.140p. Tese (Mestrado em Engenharia Mecânica). Universidade Estadual de Campinas, Campinas.

EXTRAMET – Hartmetallfabrik .Catálogo do fabricante 2007. 12p. Metal Duro. Disponível em : <http://www.extramet.ch>. Acesso em:09 jul 2010.

EFUNDA. Drilling machining. Disponível em: <http://www.efunda.com/processes/machining/drill.cfm>. Acesso em: 20 de julho de 2010.

FERRARESI, Dino. **Fundamentos da Usinagem dos Metais**. São Paulo: Edgard Blücher, Volume 1, 1977. 751 p.

FERRER, Jorge Antonio Giles. **Uma Contribuição ao Fresamento Frontal de Superfícies Irregulares de Ferro Fundido Cinzento**. 2006. 228p. Tese de doutorado Universidade Estadual de Campinas, Campinas.

INFOMET, 2010 - **Elementos de liga nos ferros fundidos cinzentos, Efeitos dos elementos de liga**.http://www.infomet.com.br/acos-e-ligas-conteudo-ler.php?cod_tema=9&cod_secao=10&cod_assunto=86&cod_conteudo=148, em 20/08/2010.

MATTES, Wilmar. **Influência dos revestimentos de brocas na furação do ferro fundido nodular austemperados**. 2009. 112p. Dissertação do Curso Mestrado em Engenharia mecânica da SOCIESC – Sociedade Educacional de Santa Catarina, Joinville.

MARCONDES, Francisco. **A História do Metal Duro** – Unida Artes Gráficas e Editora, 1990.

MARTINS, Paulo Sérgio. **Avaliação dos Sistemas de fixação hidráulico e térmico de brocas de metal duro em furação do Cabeçote do Motor Fire**. 2008.108p. Dissertação (Pos Graduação em Engenharia Mecânica). Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais, Belo Horizonte, Minas Gerais.

MARMENTINI, Mozart Marcos. **Análise da Furação do Ferro Fundido Nodular Utilizando Brocas Helicoidais de M2 Nitretadas**. 2009. 128p. Dissertação (Mestrado em Engenharia) - Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica e de Materiais, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba.

MARTINS, P.S.; MAIA L.H.A.; SALES, W.F.. **Uma proposta para usinar ligas de Al-Si-Cu com brocas de metal duro integral**. Revista Máquinas e Metais. Aranda Editora-Ano 46-n533, Junho 2010.

MICHELETTI, Gian Federico. **Mecanizado por arranque de viruta**. 2ª Edição, Barcelona: Editorial Blume, 1980, 426 p.

MIRANDA, Gilberto Walter Arenas Miranda, **Uma contribuição ao Processo de Furação sem Fluido de Corte com Broca de Metal Duro Revestida com TiAlN**, 2003. 182p. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica). Universidade Estadual de Campinas, Campinas.

MSPC ; Informações técnicas- Ferros Fundidos - Considerações básicas. Disponível em:< <http://www.mspc.eng.br/ciemat/aco230.shtml> >, Acesso em 22/10/2009.

MÜLLER, G. I., 2009, Apostila / Anotações do professor Müller: Aula 9_Ferros Fundidos.doc com referências de: Steel Foundry Melting Practice, Rudolf W. Zillmann, Steel Founders' Society of America, 1973, 762 p., Steelmaking for Steelfounders, Jackson e Hubbard. http://www.exatec.unisinos.br/~fortis/arquivos/Aula9_FerrosFundidos.doc, 11/11/2009.

MOCELLIN, Fabiano. **Avaliação da usinabilidade do ferro fundido vermicular em ensaios de furação**. 2002.112p. Dissertação de mestrado em Engenharia Mecânica. Departamento de Engenharia Mecânica Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis.

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

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

NOVASKI, O. **Uma contribuição ao estudo das condições econômicas de usinagem**. 1983. 159 p. Tese de Mestrado. Faculdade de Engenharia Mecânica da Universidade Estadual de Campinas, Campinas.

NOVASKI, O. **Introdução à Engenharia de Fabricação Mecânica**. Editora Edgard Blucher, Cap.7, 1994.119p.

NOVASKI, O. **Custos de usinagem**. Campinas, SP : UNICAMP, 1991. 149p.

OLIVEIRA, Valter Vander de. **Influência da Geometria de Brocas na Furação do Ferro Fundido Vermicular**. 2008. 173p. Dissertação (Pós Graduação em Engenharia Mecânica), Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR), Curitiba.

PAIVA JUNIOR, J.M.F.de; **Análise do processo de furação do ferro fundido vermicular com brocas de metal-duro com canais retos revestidas com TIN+TIAL, ALCrN e ALCr-Based**. 2007. 93p. Dissertação (Pós Graduação em Engenharia Mecânica), Pontifícia Universidade Católica do Paraná, Curitiba.

PAIVA JUNIOR, J.M.F.de; AMORIM F.L.; TORRES, R.D.; COSTA, D.D. da; **Furação do Ferro Fundido Vermicular com uso de brocas revestidas**. Revista Máquinas e Metais. Aranda Editora- Ano XLV - n 520, Maio 2009.

PALIVODA, Sidnei José.; **Avaliação do desempenho de ferramentas de usinagem em uso industrial**. 2009. Disponível em: < <http://pt.scribd.com/doc/44853174/Desgaste-da-Ferramenta> >. Acesso em dezembro 2009.

STEMMER, Caspar Erich. **Ferramentas de corte I**. 6ª Edição, Florianópolis: Editora da UFSC, 2005. 249 p.

STEMMER, Caspar Erich. **Ferramentas de corte II**. 6ª Edição, Florianópolis: Editora da UFSC, 2005. 249 p.

SANTOS, S. C. **Furação de Ferro Fundido Cinzento com Brocas de Metal Duro Integral**. 1999. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica), Centro de Ciências Exatas e Tecnologia, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia.

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

STOETERAU, R. L., **Processo de Furação**, Apresentação de aulas, UFSC, Disponível em: <<http://www.lmp.ufsc.br/disciplinas/emc5240/Aula-17-U-2007-1-furacao.pdf>>. Acesso em: novembro de 2010.

TRENT, E. M. **Metal Cutting**. 4^a ed. Woburn: Butterworth-Heinemann, 2000.

APÊNDICE A – Planilha de Resultados 1° e 2° experimento broca *esférica*

Ferramenta *esférica*



tempo (min)	Circularidade						Cilindricidade					
	broca 1	broca 2	broca 3	broca 4	broca 5	média (min)	broca 1	broca 2	broca 3	broca 4	broca 5	media (mm)
37	0,013	0,007	0,007	0,011	0,01	0,010	0,044	0,022	0,051	0,041	0,015	0,035
74	0,007	0,006	0,004	0,007	0,006	0,006	0,027	0,033	0,049	0,025	0,019	0,031
111	0,012	0,01	0,008	0,011	0,009	0,010	0,051	0,027	0,032	0,041	0,023	0,035
148	0,004	0,008	0,011	0,009	0,009	0,008	0,030	0,025	0,052	0,039	0,021	0,033
185	0,005	0,007	0,012	0,013	0,012	0,009	0,033	0,041	0,035	0,027	0,029	0,034
222		0,007	0,007	0,01	0,009	0,008		0,031	0,052	0,018	0,025	0,032
259		0,005	0,006	0,013	0,014	0,010		0,026	0,02	0,023	0,041	0,028
296		0,008	0,014	0,01	0,009	0,010		0,024	0,048	0,024	0,032	0,032
Diâmetro						Desgaste VB						
broca 1	broca 2	broca 3	broca 4	broca 5	media (mm)	broca 1	broca 2	broca 3	broca 4	broca 5	media (mm)	
10,497	10,486	10,497	10,543	10,495	10,504	0	0	0	0	0	0,00	
10,499	10,495	10,499	10,542	10,496	10,506	0,1	0,1	0	0,1	0	0,06	
10,500	10,501	10,495	10,539	10,498	10,507	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,10	
10,501	10,505	10,494	10,538	10,493	10,506	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,10	
10,498	10,504	10,492	10,538	10,486	10,508	0,1	0,1	0,1	0,1	0,2	0,12	
	10,502	10,490	10,534	10,49	10,504		0,1	0,1	0,2	0,2	0,15	
	10,504	10,497	10,542	10,496	10,510		0,2	0,2	0,2	0,2	0,20	
	10,502	10,498	10,536	10,49	10,507		0,3	0,3	0,3	0,4	0,33	

APÊNDICE B – Planilha de Resultados 1º experimento broca *normal*

Ferramenta *normal*



tempo (min)	Circularidade					Cilindricidade				
	broca 1	broca 2	broca 3	broca 4	média (min)	broca 1	broca 2	broca 3	broca 4	media (mm)
37	0,011	0,005	0,008	0,008	0,008	0,029	0,018	0,036	0,046	0,032
74	0,011	0,012	0,009	0,006	0,010	0,025	0,027	0,024	0,026	0,026
111	0,012	0,01	0,007	0,009	0,010	0,033	0,016	0,031	0,042	0,031
148	0,012	0,008	0,009	0,007	0,009	0,024	0,038	0,047	0,046	0,039
185	0,01	0,008	0,01	0,008	0,009	0,031	0,046	0,058	0,067	0,051

Diâmetro					Desgaste VB				
broca 1	broca 2	broca 3	broca 4	media (mm)	broca 1	broca 2	broca 3	broca 4	media (mm)
10,545	10,543	10,566	10,569	10,556	0,1	0,1	0,3	0,2	0,18
10,528	10,556	10,554	10,587	10,556	0,2	0,3	0,6	0,5	0,40
10,523	10,532	10,548	10,595	10,550	0,8	0,8	0,8	0,5	0,73
10,516	10,528	10,527	10,563	10,534	1	0,9	1	0,9	0,95
10,515	10,527	10,507	10,551	10,525	1,2	1	1,2	1	1,10

APÊNDICE C – Planilha de Resultados 3º experimento com $v_c > 10\%$

Ferramenta esférica 3º experimento 10% aumento da V_c

	circularidade				cilindricidade				diâmetro				desgaste VB/a			
tempo	1	2	3	média	1	2	3	media	1	2	3	média	1	2	3	média
37	0,02	0,01	0,008	0,011	0,029	0,035	0,020	0,028	10,5	10,5	10,535	10,511	0	0	0,1	0,03
74	0,01	0,01	0,006	0,007	0,02	0,031	0,041	0,031	10,5	10,5	10,522	10,503	0,1	0,2	0,2	0,17
111	0,01	0,01	0,009	0,010	0,036	0,032	0,053	0,040	10,49	10,5	10,503	10,496	0,3	0,4	0,5	0,40

APÊNDICE D – Planilha de Resultados 3º experimento com $v_c > 20\%$

Ferramenta esférica 3º experimento 20% aumento da V_c

	circularidade				cilindricidade				diâmetro				desgaste VB/a			
tempo	1	2	3	média	1	2	3	media	1	2	3	média	1	2	3	média
37	0,006	0,007	0,004	0,007	0,025	0,043	0,021	0,034	10,5	10,5	10,475	10,506	0	0,1	0,20	0,05
74	0,01	0,005	0,022	0,008	0,037	0,057	0,053	0,047	10,5	10,5	10,462	10,493	0,3	0,4	0,40	0,35

