



UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ
CAMPUS CURITIBA
DEPARTAMENTO DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA
E DE MATERIAIS - PPGEM

Luciano Jairo Lobo

**Estudo comparativo do comportamento entre
brocas alargadoras e processo de alargamento na
usinagem do Ferro Fundido Cinzento GG30.**

CURITIBA
2015

LUCIANO JAIRO LOBO

**Estudo comparativo do comportamento entre
brocas alargadoras e processo de alargamento na
usinagem do Ferro Fundido Cinzento GG30.**

Dissertação apresentada como requisito ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica e de Materiais, Área de Concentração em Manufatura, do Departamento de Pesquisa e Pós-Graduação, do Campus de Curitiba, da UTFPR.

Orientador: Prof. Paulo André de Camargo Beltrão, Ph.D.

CURITIBA

2015

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação

L799e Lobo, Luciano Jairo
2015 Estudo comparativo entre brocas alargadoras e processo de alargamento na usinagem do ferro fundido GG30 / Luciano Jairo Lobo.-- 2015.
123 f.: il.; 30 cm

Texto em português, com resumo em inglês.
Dissertação (Mestrado) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica e de Materiais, Curitiba, 2015.
Bibliografia: f. 116-121.

1. Aspereza de superfície. 2. Brocas (Ferramenta).
3. Alargadores. 4. Perfuração e broqueamento. 5. Ferro fundido. 6. Usinagem - Testes. 7. Processos de fabricação.
8. Engenharia mecânica - Dissertações. I. Beltrão, Paulo André de Camargo, orient. II. Universidade Tecnológica Federal do Paraná - Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica e de Materiais. III. Título.

CDD 22 -- 620.1

Biblioteca Central da UTFPR, Câmpus Curitiba

LOBO, Luciano Jairo, **Estudo comparativo entre brocas alargadoras e processo de alargamento na usinagem do Ferro Fundido GG30**, Dissertação (Mestrado em Engenharia) - Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica e de Materiais, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 2015.

RESUMO

O processo convencional de furação é um dos processos de usinagem empregado em larga escala, normalmente utilizado em operações com menor responsabilidade na qualidade superficial dos furos usinados, atingindo perfis de rugosidade na ordem de 6,3 Ra. Para processos mais refinados, que atinjam 0,8 Ra, por exemplo, opta-se por processos de alargamento, mandrilamento, entre outros, que são mais onerosos em relação aos custos com ferramentas de corte e, principalmente, o tempo de operação. Na tentativa de reduzir o tempo de usinagem melhorando a qualidade dos furos obtidos nestes processos, fabricantes de ferramentas vêm desenvolvendo e aprimorando geometrias capazes de conjugar as operações de furação com operações de alargamento, obtendo resultados expressivos do ponto de vista de produtividade. As brocas alargadoras, entre outras características, são fabricadas com maior número de gumes de corte, chegando a oito de acordo com o diâmetro da ferramenta. Os canais principais têm a função de desbaste e alta remoção de cavaco, enquanto os outros canais atuam de forma a reduzir a rugosidade, removendo pouco material e proporcionando maior estabilidade para a ferramenta durante a usinagem. O objetivo desse trabalho é estudar o comportamento do processo de usinagem por brocas alargadoras de quatro e seis cortes na obtenção de furos com valores máximos de rugosidade até 0,8 Ra no material ferro fundido GG30, comparando os resultados com o processo de alargamento convencional. Os resultados preliminares demonstraram que, utilizando as brocas alargadoras, consegue-se redução superior a 30% no tempo de usinagem, quando comparado ao processo convencional de alargamento, mantendo valores de rugosidade na ordem de 0,8 Ra, unindo a velocidade de um processo convencional de furação com a qualidade superficial dos furos obtidos nos processos convencionais de alargamento.

Palavras-chave: rugosidade, broca alargadora, furação.

LOBO, Luciano Jairo, **Comparative study of behavior between drills reamers and reamers' process in the machining of Grey Cast Iron GG30**, Dissertation (Masters in Engineering) – Post-graduate in Mechanical Engineering and Materials. Federal University of Technology Paraná, Curitiba, 2015.

ABSTRACT

The conventional drilling process is the most used among all machining processes. It is usually applied for holes with lower quality surface requirement, with roughness around 6.3 Ra. Higher quality drilling process, with 0,8 Ra, use other drilling process such as, reaming, boring, among others. These processes are more expensive because of the cost of cutting tools and especially because of the operational time. Aiming to reducing the machining time and improve the holes surface quality, tool manufacturers have been developing and improving geometries able to combine the drilling operations with reaming operations, optimizing the productivity. The drill reamers, among other characteristics, are manufactured with the highest number of cutting edges, usually with eight edges based on tool's diameter. The main channel have high trimming functions and high chip removal, while the other channel reduce the surface roughness, removing less material and providing greater tools stability during the machining process. The aim of this paper is to study the behavior of the machining process through drill reamers with four and six cutting edges, taken into consideration holes with roughness up to 0,8 Ra in the material cast iron GG30, comparing this performance with conventional reamers' process. The preliminary results has indicated that by using drill reamers, over 30% of the machining time can be reduced comparing to conventional reamers' process, keeping roughness values around 0,8Ra, merging the speed of conventional drilling' process with the surface quality of the holes obtained in conventional reamers' processes.

Keywords: roughness, drill reamers, drilling.

AGRADECIMENTOS

Ao meu orientador Prof. Dr. Paulo André de Camargo Beltrão pelo incentivo e orientação, imprescindíveis à realização do presente trabalho.

À Universidade Tecnológica Federal do Paraná e a pela oportunidade e infraestrutura. Em especial aos professores, Carlos Czulik, Milton Luiz Polli, Carlos Henrique da Silva e Giuseppe Pintaude.

A Empresa Ferramentas Sartori LTDA (FERSART), através de seu diretor e amigo Egberto Sid Sartori, pela contribuição técnica, recursos para os testes e inestimável apoio em todas as etapas da elaboração da dissertação.

A minha família e amigos que sempre me apoiaram e incentivaram nas realizações dos meus objetivos e sonhos.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1 – Bloco de motor após usinagem do furo de selagem.	17
Figura 1.2 – Broca Alargadora Alisbex.....	19
Fonte: (FERSART, 2012)	19
Figura 2.1 – Morfologia da grafita em ferros fundidos	23
Figura 2.2 – Classificação das especificações geométricas de produto conforme as normas do sistema ISO – GPS.	28
Figura 2.3 – Elementos que compõe a superfície.	29
Figura 2.4 – Conceitos básicos na avaliação de superfícies.....	29
Figura 2.5 – Definição da rugosidade Ra.	30
Figura 2.6 – Definição da rugosidade Rz.	32
Figura 2.7 – Definição da rugosidade Rt.....	32
Figura 2.8 – Variantes do processo de furação.....	35
Figura 2.9 – Broca Alargadora Quatro Cortes.....	37
Figura 2.10 – Broca Alargadora Seis Cortes	38
Figura 2.11 – Broca Alargadora Oito Cortes	38
Figura 2.12 – Ângulos de corte da broca helicoidal.....	39
Figura 2.13 Comparação da vida entre as três geometrias testadas.	40
Figura 2.14 Comparação da vida entre as três geometrias testadas.	41
Figura 2.15 – Cinemática do processo de alargamento.	42
Figura 2.16 – Nomenclatura do Alargador.	45
Figura 2.17 – Tipos de Entrada. (FERREIRA, 2011).....	46
Figura 2.18 – Tipos de Hélice.....	47
Figura 2.19 – Formação do cavaco no Ferro Fundido.	54
Figura 2.20 – Forma do cavaco.....	56

Figura 2.21 – Principais mecanismos de desgaste na usinagem.....	57
Figura 2.22 – Forças atuantes nas arestas principais de corte.	60
Figura 2.23 – Incidência dos raios X sobre a amostra. Intensidade do raio difratado para um determinado 2θ	62
Figura 2.24 – Representação dos Raios-X difratados pelos planos AA' e BB'.....	63
Figura 2.25 – Varredura da superfície da amostra	64
Figura 2.26 - Deslocamento dos picos de difração quando comparados com material sem deformação.	64
Figura 3.1 – Durômetro EMCO-TEST M4C 025 GM3.....	66
Figura 3.2 – Amostra para Ensaio de Dureza	67
Figura 3.3 – Amostras para Ensaios Metalográficos	68
Figura 3.4 – Broca Helicoidal em Metal Duro	70
Figura 3.5 – Alargador Canais Retos em Metal Duro.....	71
Figura 3.6 – Broca Alargadora com Quatro Gumes de Corte em Metal Duro	72
Figura 3.7 - Diâmetro escalonada da broca alargadora com quatro gumes.....	72
Figura 3.8 – Broca Alargadora com Seis Gumes de Corte em Metal Duro	73
Figura 3.9 – Diâmetro escalonado da broca alargadora com seis gumes de corte...	73
Figura 3.10 – Projeto de furação das amostras de Ferro Fundido Cinzento	74
Figura 3.11 – Layout da amostra no ensaio de furação	76
Figura 3.12 – Layout da amostra no ensaio de Alargamento	78
Figura 3.13 – Amostra usinada	79
Figura 3.14 – Centro de usinagem FANUC ROBODRILL utilizado nos ensaios práticos	80
Figura 3.15 – Mandril hidráulico com fixação para diâmetro 10mm	81
Figura 3.16 – Fixação da amostra ao centro de usinagem	81
Figura 3.17 – Rugosímetro Taylor Hobson modelo Surtronic 25.....	82

Figura 3.18 – Plataforma Piezoelétrica Kistler® modelo 9272 ^a	83
Figura 3.19 – Painel do Centro de Usinagem.....	84
Figura 3.20 – Difratorômetro Shimadzu XRD-7000	85
Figura 3.21 – Desenho da amostra para ensaio de tensão residual	86
Figura 3.22 – Amostra preparada para ensaio de tensão residual.....	86
Figura 3.23 – Variação da inclinação do pico (211) de difração do ferro fundido em função da inclinação Ψ da amostra.....	87
Figura 3.24 – Reta gerada pelo software do difratômetro para cálculo da tensão residual.....	88
Figura 4.1 – Gráfico da medição de dureza	89
Figura 4.2: Região central da amostra	90
Figura 4.3 : Região intermediária da amostra	91
Figura 4.4: Região periférica da amostra	92
Figura 4.5 : Variação na fração volumétrica do material	93
Figura 4.6: Mapeamento da estrutura do material.....	94
Figura 4.7: Matriz metálica	95
Figura 4.8. Rugosidade Ra na usinagem com broca convencional com 2 gumes de corte	96
Figura 4.9. Rugosidade Rt na usinagem com broca convencional com 2 gumes de corte	96
Figura 4.10 Rugosidade Ra na usinagem com broca alargadora com 4 gumes de corte	97
Figura 4.11 Rugosidade Rt na usinagem com broca alargadora com 4 gumes de cortes	98
Figura 4.13 Rugosidade Ra na usinagem com broca alargadora com 6 gumes de cortes	99

Figura 4.14 Rugosidade R_t na usinagem com broca alargadora com 6 gumes de corte	99
Figura 4.15 Rugosidade R_a na usinagem com alargador com 6 gumes de corte	100
Figura 4.16 Rugosidade R_t na usinagem com alargador com 6 gumes cortes	100
Figura 4.17 Resultados de rugosidade por tipo de ferramenta.....	101
Figura 4.18 Resultados médios da força de usinagem por tipo de ferramenta	102
Figura 4.19. Resultados médios das forças de usinagem distribuída por gume	104
Figura 4.20 Resultados médios do tempo de ciclo por tipo de ferramenta.....	105
Figura 4.21 Resultados de tensões residuais com broca alargadora de quatro gumes de corte	108
Figura 4.22 Resultados de tensões residuais com broca alargadora de seis gumes de corte	109
Figura 4.23 Resultados de tensões residuais com alargador com seis gumes de corte	110
Figura 4.24 Comparativo das tensões residuais por ferramentas	111

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 – Classificação do ferro fundido cinzento.	25
Tabela 2.2 – Propriedades mecânicas dos ferros fundidos.....	25
Tabela 2.3 – A influência dos constituintes dos ferros fundidos sobre a vida da ferramenta de usinagem.	27
Tabela 2.4 – Valores de Ra para processos de fabricação (Adaptado DIN 4766). ...	30
Tabela 2.5– Número de classe de Rugosidade Ra para superfícies.....	31
Tabela 2.6 – Campos de tolerância usuais para processos de usinagem.	33
Tabela 2.7 – Classes de tolerâncias IT em função aos processos de fabricação convencionais.	34
Tabela 2.8 – Sobremedidas em “mm” recomendadas para alargamento de furos....	43
Tabela 2.9 – Comparação geral entre os materiais testados.	48
Tabela 2.10 – Composição e características dos aços rápidos.....	50
Tabela 2.11 – Composição e características dos metais duros.	52
Tabela 3.1 – Sequência de atividades no ensaio metalográfico	69
Tabela 3.2. Combinações de parâmetros de corte para ensaio de furação.	75
Tabela 3.3. Combinações de parâmetros de corte para ensaio de alargamento.	77
Fonte: O autor	77
Tabela 4.1. Combinações de parâmetros de corte por ferramentas dentro do limite 0,8 Ra	102
Tabela 4.2 Resultados da medição de tensões residuais	107

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas

APC - Aresta postiça de corte

ASTM – American Society for Testing and Materials

DIN - Instituto Alemão para Normatização

Fc - Força de corte

Ff - Força de avanço

Fp - Força passiva

HB – Dureza Brinell

HV – Dureza Vickers

IT – International Tolerance

mm - Milímetros

MPa – Mega Pascal

N - Newton

Ra – Média Aritmética da Rugosidade

Rt – Altura Máxima da Rugosidade

Rz – Média Aritmética das Alturas Máximas da Rugosidade em 5 regiões

TiAlN – Niteto de Titâneo e Alumínio

Vc – Velocidade de Corte

α – Ângulo de incidência

γ – Ângulo de saída

φ – Ângulo do gume transversal

δ - Ângulo de ponta

β – Ângulo de cunha

r ϵ - Raio de ponta

SUMÁRIO

RESUMO	III
ABSTRACT	Erro! Indicador não definido.
AGRADECIMENTOS	V
LISTA DE FIGURAS	VI
LISTA DE TABELAS	X
SUMÁRIO	XII
1 INTRODUÇÃO	15
1.1 OPORTUNIDADE.....	16
1.2 OBJETIVO.....	19
1.2.1 Objetivos específicos.....	20
1.3 ORGANIZAÇÃO DA DISSERTAÇÃO.....	21
2 REFERENCIAL TEÓRICO	22
2.1 FERRO FUNDIDO.....	22
2.1.1 Ferro fundido cinzento.....	23
2.2 ASPECTOS GEOMÉTRICOS EM FUROS DE PRECISÃO.....	28
2.2.1 Rugosidade.....	28
2.2.1.1 Rugosidade Ra.....	30
2.2.1.2 Rugosidade Rz.....	31
2.2.1.3 Rugosidade Rt.....	32
2.2.2 Tolerância Dimensional.....	33
2.3 PROCESSO DE FURAÇÃO.....	34
2.3.1 Tipo de brocas.....	35
2.3.1.1 Broca chata.....	35
2.3.1.2 Broca helicoidal.....	36
2.3.1.3 Broca de centro.....	36
2.3.1.4 Broca canhão.....	36
2.3.1.5 Broca alargadora.....	36
2.3.2 Geometria da broca helicoidal.....	39
2.3.2.1 Alguns estudos com foco na geometria das ferramentas de furação.....	40
2.4 PROCESSO DE ALARGAMENTO.....	41
2.4.1 Pré-furo.....	42
2.4.2 Alargadores de desbaste.....	43
2.4.3 Alargadores de acabamento.....	44
2.4.4 Geometria dos alargadores.....	44
2.4.4.1 Ângulo de entrada.....	46
2.4.4.2 Ângulo da Hélice.....	46
2.4.4.3 Alguns estudos com foco no processo de alargamento.....	47
2.5 MATERIAIS PARA FABRICAÇÃO DE FERRAMENTAS.....	49
2.5.1 Aço rápido.....	50

2.5.2	Metal duro.....	51
2.5.2.1	Classe do Metal Duro	51
2.6	FORMAÇÃO DE CAVACO	53
2.6.1	Tipos de cavaco.....	55
2.6.1.1	Cavaco contínuo	55
2.6.1.2	Cavaco cisalhado.....	55
2.6.1.3	Cavaco de ruptura ou fragmentado	55
2.6.2	Forma do cavaco.....	56
2.7	MECANISMOS DE DESGASTE.....	56
2.7.1.1	Abrasão mecânica	57
2.7.1.2	Adesão	58
2.7.1.3	Difusão	58
2.7.1.4	Oxidação	58
2.8	FORÇAS DE USINAGEM.....	59
2.9	TENSÕES RESIDUAIS	60
2.10	DIFRAÇÃO DE RAIOS X.....	61
3	MÉTODOS, MATERIAIS E EQUIPAMENTOS.....	65
3.1	DEFINIÇÃO DOS REQUISITOS DE QUALIDADE E PRODUTIVIDADE	65
3.2	CARACTERIZAÇÃO DA AMOSTRA.....	66
3.1.1	Ensaio de dureza.....	66
3.2.2	Metalografia do material.....	68
3.3	FERRAMENTAS DE USINAGEM	69
3.3.1	Broca convencional com dois gumes de corte.....	70
3.3.1.	Alargador com seis gumes de corte.....	71
3.3.2	Broca alargadora com quatro gumes de corte.....	71
3.3.3	Broca alargadora com seis gumes de corte.....	73
3.4	PLANEJAMENTO DO EXPERIMENTO	74
3.4.1	Planejamento do processo de furação com brocas alargadoras e broca convencional	75
3.4.2	Planejamento do processo de alargamento.....	76
3.5	MÁQUINA DE USINAGEM.....	79
3.4.1.	Dispositivo de fixação.....	80
3.6	MEDIÇÕES DURANTE OS ENSAIOS PRÁTICOS	82
3.6.1	Rugosidade.....	82
3.6.2	Medição das forças de avanço.....	83
3.6.3	Tempo de ciclo na usinagem.....	84
3.6.4	Medição das tensões residuais.....	84
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES	89
4.1	ANÁLISE DA DUREZA	89
4.2	ANÁLISE METALÓGRAFICA DO FERRO FUNDIDO CINZENTO GG30	90
4.3	ANÁLISE DA RUGOSIDADE X PARÂMETROS DE CORTE	95
4.3.1	Resultados para broca convencional com dois gumes de corte.....	96
4.3.2	Resultados para broca alargadora com quatro gumes de corte.....	97
4.3.3	Resultados para broca alargadora com seis gumes de corte.....	98

4.3.4	Resultados para alargador com seis gumes de corte.....	100
4.4	ANÁLISE DA FORÇA DE USINAGEM.....	102
4.5	ANÁLISE DO TEMPO DE CICLO	105
4.6	ANÁLISE DAS TENSÕES RESIDUAIS.....	106
4.6.1	TENSÕES RESIDUAIS X PARÂMETROS DE CORTE.....	108
5	CONCLUSÕES	112
6	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTURO	115
	REFERÊNCIAS.....	116
	APÊNDICE A – RELATÓRIO DE VISITA TÉCNICA.....	122

1 INTRODUÇÃO

A usinagem é um dos processos de fabricação mais populares do mundo, transformando em cavaco cerca de 10% de toda a produção de metais e empregando dezenas de milhões de pessoas em todo mundo (COSTA, 2006).

Sempre que uma operação de usinagem é realizada, o objetivo principal é produzir componentes com o máximo de funcionabilidade e intercambialidade a baixo custo e alta produção. Ou seja, resta elencar que cada peça ou conjunto de um produto final seja feito de acordo com as especificações definidas quanto às dimensões, forma e acabamento da superfície. Assim, esse objetivo não é tão fácil de ser alcançado e vários problemas ocorrem porque muitas variáveis do processo produtivo são ainda desconhecidas ou pouco exploradas. Destacam-se aqui as características e usinabilidade do material da peça, seleção correta do material da ferramenta e os parâmetros de corte (DA SILVA, 2001).

O processo de furação representa 40% de todas as operações de usinagem (SOTO, 2003), sendo que 68% das ferramentas rotativas produzidas no Brasil são representadas por brocas e alargadores (SANDVIK, 2008). Estima-se que o consumo de brocas seja na ordem de 250 milhões de unidades por ano (AMORIM, 2003).

Uma matéria publicada pela revista Usinagem – Tech (2011) relata que o Brasil ocupava, em 2011, a 9ª colocação no ranking dos principais mercados consumidores de ferramentas de corte do mundo.

Em meio a um cenário que representa a produção em larga escala, a seleção do processo de usinagem, assim como as ferramentas a serem aplicadas, dentre outros aspectos, tem influência direta na aplicação e qualidade dos produtos.

Para os furos de precisão, normalmente, são empregadas brocas para o desbaste e, depois deste, o furo passa por operações de acabamento, que podem ser de alargamento, brochamento, mandrilamento, torneamento interno ou retificação interna.

O processo de alargamento tem grande aplicação na indústria automobilística, contribuindo com o desenvolvimento tecnológico de peças para veículos, como cabeçotes, blocos, bielas, bombas de óleo, carcaças de transmissão, cilindros de freio e braços de suspensão (BEZERRA et.al., 2000).

Entende-se que a usinagem dos furos para aplicação dos selos d'água nos blocos de motor de uma montadora de automóveis pode ser utilizado como caso motivador para o presente estudo, uma vez que a indústria automobilística apresenta grande demanda na usinagem de precisão e busca constantemente processos produtivos enxutos e competitivos. Esta usinagem é um exemplo de uma operação de alargamento convencional considerada gargalo de produção, que obriga em alguns casos a ramificação da linha de produção para absorver a demanda produtiva.

A usinagem também tem sua ampla gama de aplicações quando se trata de materiais usinados. O ferro fundido, por exemplo, tem grande aplicação em estrutura de máquinas, blocos de motores, entre outros diversos produtos industriais. E, é neste contexto, que o presente trabalho está inserido, trabalhando com operações de usinagem de furos precisos em material de ferro fundido cinzento.

1.1 OPORTUNIDADE

Considerando as mais diversas áreas industriais, muitas são as operações de usinagem na qual são requeridas elevada exatidão. Nesses casos, as tolerâncias dimensionais nem sempre são suficientes para garantir os requisitos de funcionalidade das peças. As medidas do diâmetro das ferramentas utilizadas na usinagem, por exemplo, não são suficientes para assegurar que os furos produzidos sejam totalmente funcionais, podendo haver variações geométricas, como circularidade, cilindridade, rugosidade, entre outros aspectos de qualidade. (FONSECA et. al., 2009).

Um dos processos para obtenção de furos com tolerância dimensional IT7 é a utilização de um alargador após a etapa de furação. O alargamento é um processo de usinagem para reduzir o valor da rugosidade, e/ou ajustar o tamanho dos furos existentes com precisão (JÚLIO, 2009). Os alargadores são aplicados após a usinagem de um pré-furo feito por brocas convencionais, com velocidade de corte e avanços bem inferiores ao processo de simples furação.

Na usinagem de peças com geometrias complexas, principalmente em linhas de produção seriada, nas quais o produto passa por diversos postos de trabalho, o balanceamento da linha de produção esta baseado no tempo de ciclo de cada posto. Operações com tempo de ciclos maiores, como por exemplo, as operações de alargamento, podem ser consideradas “gargalos de produção”. Esses gargalos

ocasionam ociosidade em operações anteriores ou demandam maior investimento, ramificando a linha para manter o fluxo de produção balanceado (LOPES, 2008).

Ao elaborar a sequência de produção, é necessário estabelecer a ordem para se executar as tarefas, através de um conjunto de regras, de acordo com o objetivo da empresa, como reduzir o atraso das entregas, prioridade dos pedidos, diminuir o tempo de produção, aumentar a utilização dos recursos e reduzir estoque em processo (LOPES, 2008).

Em uma visita ao setor de usinagem dos blocos de motores de uma grande empresa do segmento automobilístico, pode-se observar o extenso caminho que o produto percorre até sua usinagem completa. Dentre as diversas operações realizadas, o processo de alargamento é empregado em boa parte dos furos que requerem maior controle dimensional. Um bom exemplo a ser citado são os furos para aplicação dos selos d'água nos blocos de motores. Durante o processo de fabricação dos blocos fundidos é necessário que haja aberturas para que as ferramentas usinem partes internas do bloco. Após essas operações, faz-se necessário fechar essas aberturas. Então os selos são acoplados em furos com grande controle dimensional e baixa rugosidade, por interferência dimensional. A figura 1.1 mostra a fotografia de um bloco de motor após a usinagem dos furos para selagem (um em cada lado do motor).



Figura 1.1 – Bloco de motor após usinagem do furo de selagem.

Fonte: O autor

Esse é um exemplo clássico do processo de alargamento, no qual uma broca aproxima o furo da medida final e um alargador faz o acabamento desse furo. Os

requisitos de qualidade dos furos são satisfatórios com o processo atual. Porém a velocidade da operação é um limitador de produtividade da linha, sem contar as demais operações de alargamento existentes nesse produto. Os requisitos técnicos dessa operação como parâmetros de corte da usinagem e tolerâncias dimensionais do furo podem ser observados no relatório conforme Apêndice A.

Reduzir o tempo de uma operação nem sempre significa produzir mais rápido, considerando que o conjunto de operações deve estar sincronizado. Porém, ao aumentar a velocidade de uma etapa do processo pode-se obter uma linha mais enxuta, com menor número de ramificações, diminuindo os estoques intermediários, bem como incentivando o desenvolvimento das demais operações, o que torna as empresas mais produtivas e competitivas. Buscando alternativas para melhorar o processo de usinagem por alargamento convencional, fabricantes de ferramentas rotativas têm desenvolvido ferramentas cujo objetivo é conjugar a etapa de furação com a de alargamento. As brocas alargadoras são capazes de produzir furos com tolerância IT7 e rugosidade na ordem de 0,5 RA em uma única operação.

Tendo em vista os processos de fabricação, podem-se dividir os custos de processo em três partes: os custos para preparação e tempos secundários (custos fixos A), custos de máquina-ferramenta e do operador (custo principal B) e os custos com ferramentas (custo C). As três partes devem ser tratadas em conjunto, pois, eventualmente, elevando o custo em um aspecto pode representar significativa redução de custo em outro (CASTILHO et. al., 2006).

As variações de geometria nas ferramentas de corte são as técnicas mais utilizadas pelos fabricantes na tentativa de melhorar o rendimento e diminuir o tempo do ciclo de usinagem. Em alguns casos, agregar operações também traz benefícios consideráveis. Essas variações se enquadram no chamado “custo C” e são, em grande parte, custeadas pelos fabricantes de ferramentas que tem papel preponderante no desenvolvimento de novas tecnologias de usinagem.

Nesse contexto, fabricantes de ferramentas rotativas têm desenvolvido ferramentas cujo objetivo é conjugar a etapa de furação com a de alargamento. As brocas alargadoras, figura 1.2, são capazes de produzir furos com tolerância IT7 e rugosidade na ordem de 0,5 Ra em uma única operação (FERSART, 2012).



Figura 1.2 – Broca Alargadora Alisbex

Fonte: (FERSART, 2012)

Levando em conta que, na maioria das aplicações, as empresas se apoiam em dados empíricos para a utilização das brocas alargadoras, bem como a escassa literatura pertinente dessa geometria de ferramenta, entende-se como oportunidade para o presente trabalho estudar o comportamento das brocas alargadoras no processo de usinagem do Ferro Fundido Cinzento GG30, e comparar seus resultados ao processo de alargamento convencional.

Como as operações de alargamento são facilmente encontradas nos mais diversos segmentos da indústria, conjugar a furação com o alargamento pode trazer resultados econômicos e produtivos significativos, com linhas de produção mais enxutas, mais produtivas e com custos em ferramentas relativamente inferiores, tornando o tema proposto mais abrangente.

Este estudo municiará a Indústria com informações de processos para a utilização das brocas alargadoras nas aplicações que exigem baixa rugosidade, contribuindo também com o desenvolvimento da literatura sobre um processo de usinagem com poucas publicações técnicas.

1.2 OBJETIVO

O objetivo do presente trabalho é estudar o comportamento do processo de usinagem por brocas alargadoras de quatro e seis cortes na obtenção de furos com valores máximos de rugosidade até 0,8 Ra no material ferro fundido cinzento GG30.

Em um processo de furação comum (não profunda) serão avaliados os parâmetros de corte, a geometria das ferramentas e as características físicas dos furos, comparando os resultados com o processo de alargamento convencional.

Ao estudar as brocas alargadoras, busca-se oferecer às indústrias uma opção de processo de usinagem que contribua para sanar problemas com gargalos de produção, capaz de aumentar a velocidade na operação de furos precisos em 30%, quando comparado ao alargamento convencional e entender porque essa melhoria ocorre.

O comparativo dos resultados obtidos pelas brocas alargadoras com os obtidos pelo alargador trará informações de viabilidade econômica, confirmando ou não a possibilidade de substituição do processo de alargamento pelo processo que utiliza as brocas alargadoras.

O objetivo geral pode ser detalhado conforme os tópicos citados nos objetivos específicos a seguir.

1.2.1 Objetivos específicos

- a) Caracterizar o material Ferro Fundido Cinzento GG30 definindo as condições de usinagem disponíveis;
- b) Definir os requisitos de qualidade e produtividade para o processo de usinagem estudado estabelecendo limites técnicos a serem atingidos;
- c) Conduzir ensaios práticos com as ferramentas testadas produzindo dados estatísticos para análise comparativa dos processos de furação e alargamento;
- d) Correlacionar os resultados de rugosidade, tempo de ciclo, forças de usinagem e tensão residual para identificar a ferramenta e o processo de fabricação com melhor rendimento, considerando furos que atinjam valores máximos de rugosidade 0,8 Ra;

1.3 ORGANIZAÇÃO DA DISSERTAÇÃO

A dissertação está organizada em sete capítulos. O primeiro capítulo é a introdução sobre o assunto proposto, apresentando a oportunidade observada para o desenvolvimento do trabalho e os objetivos a serem atingidos. O segundo capítulo apresenta uma revisão bibliográfica acerca dos temas abordados no decorrer da dissertação. O terceiro capítulo mostra a metodologia experimental utilizada para abordar os objetivos propostos. O quarto capítulo apresenta os resultados e discussões referentes aos experimentos realizados. No quinto capítulo são apresentadas as principais conclusões e lições aprendidas com o desenvolvimento do trabalho. O sexto capítulo disponibiliza sugestões para trabalhos futuros, levantando pontos importantes que não foram abordados nesta dissertação. Por fim, é apresentado o apanhado de referências bibliográficas consultadas no decorrer da dissertação.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

A seguir será apresentado um apanhado geral de estudos teóricos acerca dos assuntos abordados na presente dissertação que servirão de embasamento teórico para as análises e conclusões.

Os principais temas consultados foram: características do ferro fundido; aspectos dimensionais em furos de precisão; processo de furação; processo de alargamento; materiais para fabricação de ferramentas; formação de cavaco; mecanismos de desgaste; forças de usinagem; tensões residuais.

2.1 FERRO FUNDIDO

Segundo Chiaverini (2002), os ferros fundidos ganharam espaço em aplicações que eram exclusivas dos aços e fazem parte de um grupo de materiais muito importante para a indústria. A evolução de suas ligas, através da introdução de elementos de ligas, tornou o material ainda mais flexível, com possibilidades de tratamentos térmicos e o desenvolvimento do ferro fundido nodular.

Para Da Silva (2001), o interesse da indústria na aplicação do ferro fundido abriu mercado para que indústrias siderúrgicas e centros de pesquisas investissem no aprimoramento dos materiais. O maior controle nos teores de elementos de liga, tais como o silício, magnésio, cromo, molibidênio e cobre, acompanhado pela evolução nos tratamentos térmicos para esse tipo de material, contribuíram muito para a melhoria nas propriedades mecânicas dos ferros fundidos, como por exemplo, a rigidez e a ductilidade. Essa evolução tem influência direta na usinabilidade dos ferros fundidos.

Segundo definição de Chiaverini (2002), o ferro fundido pode ser definido como uma liga de ferro-carbono-silício com carbono geralmente acima de 2%, em quantidade superior a que é retida em solução sólida na austenita, com carbono parcialmente livre em forma de veios ou lamelas de grafita.

Atualmente podem-se utilizar ferros fundidos de diferentes classes, de acordo com a aplicação, sendo seis as mais comuns:

- 1) ferro fundido cinzento;

- 2) ferro fundido branco;
- 3) ferro fundido mesclado;
- 4) ferro fundido maleável;
- 5) ferro fundido de grafita compactada;
- 6) ferro fundido nodular.

A figura 2.1 apresenta imagens microscópicas com a morfologia da grafita nos ferros fundidos, a) Cinzento; b) Nodular; e c) Vermicular.

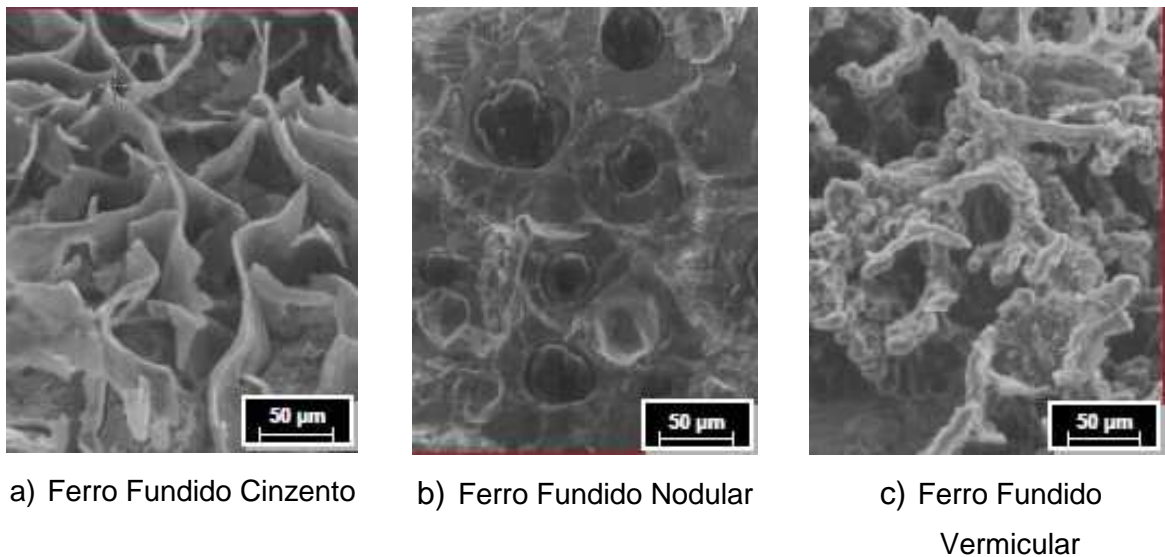


Figura 2.1 – Morfologia da grafita em ferros fundidos

Fonte: (OLIVEIRA, 2008)

2.1.1 Ferro fundido cinzento

O ferro fundido cinzento é a liga de maior aplicação na indústria atualmente. Esta liga apresenta uma microestrutura com carbono na forma livre, grafita em formato de lamelas e carbono na forma combinada cementita (Fe_3C).

Nos ferros fundidos cinzentos, os principais elementos de liga são o carbono e o silício, podendo também haver outros, como o manganês, cromo e cobre, atribuindo características específicas ao material de acordo com o teor encontrado.

Dentre as ligas ferrosas, o ferro fundido cinzento é material que apresenta uma das mais baixas temperaturas de fusão, sendo considerado um material de fácil fundibilidade. Em sua concepção, a contração do material na passagem da fase líquida para sólida é baixa, favorecendo a obtenção de peças sem defeitos internos.

Essa característica possibilita que, em muitas aplicações, o material pode ser utilizado no estado bruto (SERBINO, 2005)

O ferro fundido cinzento também tem como características baixo preço de custo baixo em relação às outras ligas ferrosas, fácil fusão e moldagem, boa resistência mecânica, boa resistência ao choque térmico, excelente usinabilidade, e boa capacidade de amortecimento. Estas características permitem utilizar o ferro fundido cinzento para a produção das mais diversas peças mecânicas, como: carcaças de compressores, blocos de motores, cabeçotes, tambores de freio, engrenagens, bases de máquinas, etc. (SCHULER, 1998).

Com relação a sua composição química, os ferros fundidos cinzentos podem variar em uma ampla faixa (CHIAVERINI, 2002):

C – 2,5% a 4%;

Si – 1,00% a 3,00%;

Mn – 0,20% a 1,00%;

P – 0,02% a 1%;

S – 0,02% a 0,025%.

O carbono e o silício promovem a formação de grafita que aumenta conforme o aumento da percentagem desses elementos. O carbono no ferro fundido cinzento pode existir na forma de grafita ou como carboneto de ferro. Se a grafitização é completa, o ferro fundido cinzento terá lamelas de grafita com uma matriz ferrítica, o que resultará em uma excelente estabilidade. As lamelas de grafita concentram esforços, causando baixa resistência e ductibilidade (CASTILLO, 2005).

O ferro fundido cinzento não tem deformação lateral apreciável e a ruptura ocorre por cisalhamento e escorregamento ao longo de um plano inclinado de aproximadamente 45°. Ou seja, pode-se determinar então algumas propriedades da zona plástica, principalmente o limite de resistência ou limite de ruptura que, coincidem para esses materiais. (SOUZA, 1982).

Na classificação adotada pela ABNT, o ferro fundido cinzento é representado pelas iniciais FC, seguido por dois algarismos que representam o limite mínimo de resistência à tração. A tabela 2.1 mostra esta classificação e suas correspondentes em outras normas internacionais incluindo a norma DIN que representa o ferro fundido cinzento com as letras GG.

Tabela 2.1 – Classificação do ferro fundido cinzento.

Fonte: (CASTILLO, 2005).

EQUIVALÊNCIAS INTERNACIONAIS DOS FERROS FUNDIDOS CINZENTOS									
ABNT EB-126	EURO STD BS EM 1561 1997	UK STD BS 1452 1990	USA ASTM A48-83	ITÁLIA UNI 5007-69	SUÉCIA MNC 70SE 1984	JAPÃO J159 5501-76	ALEMANHA DIN 1691 1995	RESISTÊNCIA À TRAÇÃO Mpa (Min)	
			20A						138
FC15	EN-GJL-150	150		G15	01.15.00	FC15	GG15		150
			25A						172
		180							180
FC20	EN-GJL-200	200		G20	01.20.00	FC20	GG20		200
			30A						207
		220							220
			35A						241
FC25	EN-GJL-250	250		G25	01.25.00	FC25	GG25		250
			40A						260
			45A						276
FC30	EN-GJL-300	300		G30	01.30.00	FC30	GG30		300
			50A						310
									345

A tabela 2.2, mostra as propriedades mecânicas dos ferros fundidos segundo a norma DIN (DIAS, 2011).

Tabela 2.2 – Propriedades mecânicas dos ferros fundidos.

Fonte: (DIAS, 2011).

	GG-10	GG-15	GG-20	GG-25	GG-30	GG-35	GG-40
Limite de Resistência à tração, kgf/mm^2 (MPA)	10 (100)	15 (150)	20 (200)	25 (250)	30 (290)	35 (340)	40 (390)
Limite de Resistência à flexão, kgf/mm^2 (MPA)	20/31 (200/ 300)	23/37 (230/ 360)	29/43 (280/ 420)	35/44 (340/ 430)	41/55 (400/ 540)	47/61 (460/ 600)	53/67 (520/ 660)
Resistência à compressão, kgf/mm^2 (MPA)	50/60 (490/ 590)	57/70 (580/ 690)	60/83 (590/ 810)	70/100 (690/ 980)	82/120 (800/ 1000)	95/140 (930/ 1370)	110/140 (1080/ 1370)
Módulo de Elasticidade 10^5 kgf/mm^2	7,5/10	8/10,5	9/11,5	10,5/12	11/14	12,5/14,5	12,5/15,5
Limite de Fadiga kgf/mm^2 (MPA)	0,35 a 0,5 do limite de resistência à tração						
Estrutura	Ferrítica ← → Perlitica						

O ferro fundido cinzento geralmente apresenta uma boa usinabilidade devido à presença de carbono livre ou grafita em forma de lamelas na sua microestrutura. A presença de grafita livre em forma de lamelas facilita a formação do cavaco, devido ao efeito lubrificante desta (CASTILLO, 2005).

A dureza não é um indicador de usinabilidade tão eficiente para o ferro fundido, assim como ocorre com os aços.

Para Meurer (2014):

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. Verifica-se inclusive a formação de trincas à frente do cavaco, na região afetada pela usinagem (Machining Affected Zone), cuja distância depende do tipo de grafita e da matriz.[...] a usinabilidade decresce à medida que se caminha para classes de maior resistência, devido ao aumento da quantidade de perlita na matriz. Nos ferros fundidos cinzentos 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.

Em seus estudos, Dilley (2008) alerta sobre os limites de velocidades de corte empregados na usinagem do ferro fundido cinzento. O autor associa a utilização de elevados valores de velocidade de corte ao aparecimento de vibrações na usinagem, ocasionando redução de qualidade superficial dos furos obtidos

Avaliando as condições de usinabilidade do ferro fundido cinzento, a microestrutura exerce papel preponderante. A tabela 2.3 apresenta os principais constituintes da matriz do ferro fundido e a influência destes sobre a vida da ferramenta de usinagem.

Tabela 2.3 – A influência dos constituintes dos ferros fundidos sobre a vida da ferramenta de usinagem.

Fonte: (CASTILLO, 2005).

Constituintes	Características
Ferrita:	Constituinte livre de carbono. Apresenta dureza mais baixa, se comparada com os demais constituintes;
Perlita:	Constituinte mais comum nos ferros fundidos. Apresenta resistência e dureza média. 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;
Martensita:	Constituinte de maior dureza. Obtida através de tratamentos térmicos nos ferros fundidos. Dentre os parâmetros relacionados com a usinagem, a importância do monitoramento das forças de corte é bem reconhecida em toda a comunidade científica. A força de corte é o indicador mais importante do estado e da qualidade da usinagem (JEONG, 2002). Porém, quando tratada posteriormente com um revenido, 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;
Bainita:	É obtida após o tratamento térmico de têmpera. Geralmente são usadas velocidades menores que as usadas para a usinagem da martensita revenida de mesma dureza, devido à pior condição de usinabilidade;
Austenita:	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;
Carbonetos:	Constituintes extremamente duros, variando desde simples carbonetos de ferro até complexos carbonetos contendo elementos de liga. 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;
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;
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 às quantidades relativas de cada constituinte.

2.2 ASPECTOS GEOMÉTRICOS EM FUROS DE PRECISÃO

Na maioria dos casos, a característica de um produto não é realizada apenas com a informação de sua dimensão. É necessário prever também os desvios de forma e posição admitido dentro das características do projeto.

A tolerância geométrica de um produto pode ser subdividida em seis grandes grupos, conforme pode ser observado na Figura 2.2.

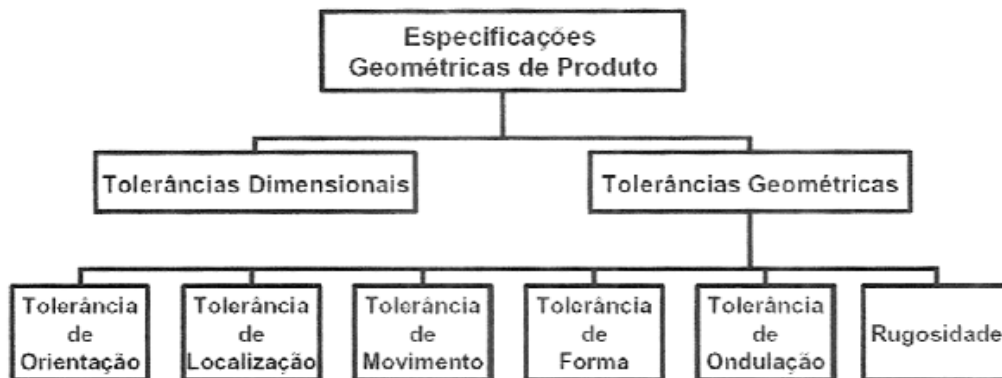


Figura 2.2 – Classificação das especificações geométricas de produto conforme as normas do sistema ISO – GPS.

Fonte: (GODINHO, 2007)

Dentre os grupos citados na figura 2.2, o presente estudo estará focado na avaliação da rugosidade dos furos usinados.

2.2.1 Rugosidade

Na fabricação de peças, não é possível a produção de superfícies ideais. Mesmo que a olho nu possam parecer perfeitas, quando submetidas a uma ampliação, nota-se a presença de sulcos chamados de rugosidade. A rugosidade é, quase sempre, inerente ao processo de usinagem e sua intensidade é fortemente influenciada pelo tipo de processo, tipo de ferramenta e parâmetros de usinagem escolhidos. A rugosidade, considerada um erro de ordem microgeométrico, se apresenta em conjunto com outros erros classificados como macrogeométricos, também conhecidos como ondulações e desvios de forma.

A Figura 2.3 mostra a combinação de três elementos de erro em uma superfície, a rugosidade (a), ondulação (b) e o erro de forma (c) após a filtragem de cada elemento por meio de equipamentos apropriados (FERREIRA, 2011).

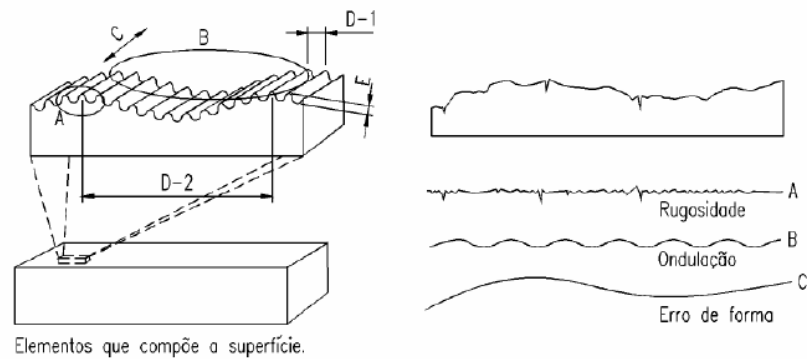
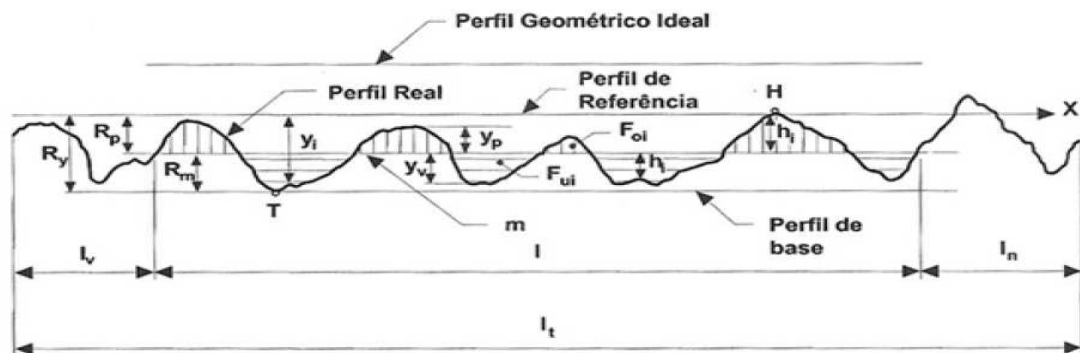


Figura 2.3 – Elementos que compõe a superfície.

Fonte: (FERREIRA, 2011)

A especificação da rugosidade permitida em uma superfície está fortemente ligada à aplicação funcional da mesma, de tal forma que, existem diversos parâmetros e conceitos acerca deste assunto e seu conhecimento é de fundamental importância em todas as etapas do processo de fabricação de um produto. Estes conceitos podem ser observados na figura 2.4.



R_y = Altura máxima do perfil

R_p = Altura máxima do pico do perfil

R_m = Profundidade máxima do vale do perfil

H = Ponto mais alto do perfil

T = Ponto mais baixo do perfil

l = Segmento de medição da rugosidade

l_t = Segmento total de contato do apalpador

l_v = Segmento de avanço inicial

l_n = Segmento final de equilíbrio

m = Perfil médio

y_i = Desvio do perfil

y_p = Altura do pico

y_v = Profundidade do vale

h_i = Distância do perfil real ao perfil médio

F_{oi} = Parcela da superfície com material

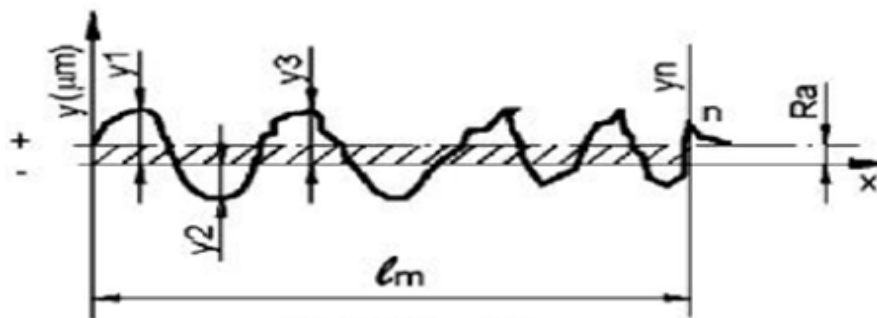
F_{ui} = Parcela da superfície sem material

Figura 2.4 – Conceitos básicos na avaliação de superfícies.

Fonte: (FERREIRA, 2011)

2.2.1.1 Rugosidade Ra

Observando a figura 2.5, entende-se a rugosidade Ra como a média aritmética dos valores absolutos das variações do perfil real y1 a yn em relação à linha média, considerando um segmento de medição da rugosidade lm. Este parâmetro ainda é muito utilizado devido à sua facilidade de cálculo mesmo com equipamentos simples, porém não esclarece a ordem de grandezas dos diferentes valores locais da rugosidade sobre o perfil analisado.



$$Ra = \frac{y1 + y2 + \dots + Yn}{N} = \mu m$$

Figura 2.5 – Definição da rugosidade Ra.

Fonte: (ALMEIDA, 2008)

A norma DIN 4766 apresenta os valores de Ra para diferentes processos de fabricação. A tabela 2.4 mostra, de forma simplificada, as variações nos valores de rugosidade para os processos estudados no presente trabalho.

Tabela 2.4 – Valores de Ra para processos de fabricação (Adaptado DIN 4766).

Fonte: (CAVALCANTE, 2010).

Método de Manufatura	Valores atingíveis médios de Ra em µm													
	0,006	0,012	0,025	0,05	0,1	0,2	0,4	0,8	1,6	3,2	6,3	12,5	25	50
Furação									■	■	■	■	■	
Alargamento						■	■	■	■	■	■			
Mandrilamento				■	■	■	■	■	■	■	■	■		
Torneamento longitudinal						■	■	■	■	■	■	■	■	
	■ Valores comuns						■ Valores possíveis							

De acordo com a norma NBR 8404/1984 de indicação do estado de superfícies em projetos e desenhos técnicos, o valor da rugosidade Ra poder ser indicado pelos números da classe de rugosidade correspondente, conforme tabela 2.5.

Tabela 2.5– Número de classe de Rugosidade Ra para superfícies.

Fonte: (GÂMBARO, 2006).

CLASSE DE RUGOSIDADE	RUGOSIDADE RA valor em μm
N12	50
N11	25
N10	12,5
N9	6,3
N8	3,2
N7	1,6
N6	0,8
N5	0,4
N4	0,2
N3	0,1
N2	0,05
N1	0,025

Portanto, o processo de furação produz furos com rugosidade classificada entre N7 e N11, com valores mais comuns entre N8 e N9. O alargamento entre N4 e N9, com valores mais comuns na faixa classificada por N6 e N7.

2.2.1.2 Rugosidade Rz

A rugosidade Rz, representada na figura 2.6, é definida como sendo a média aritmética das rugosidades singulares Z_i dos cinco trechos de medição. As rugosidades singulares são representadas pela soma dos valores absolutos do maior afastamento superior e inferior em relação à linha média, dentro de um comprimento de amostragem l_e .

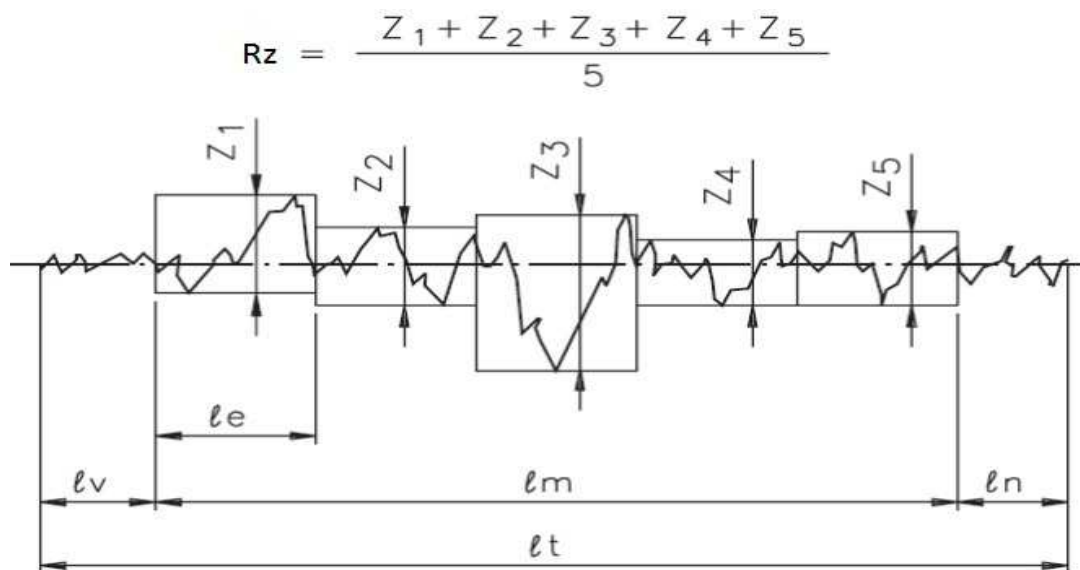


Figura 2.6 – Definição da rugosidade R_z .

Fonte: (ALMEIDA, 2008)

2.2.1.3 Rugosidade R_t

Representada na figura 2.7, a rugosidade R_t pode ser definida como sendo a distância entre o pico mais alto e o vale mais profundo, dentro do segmento total de medição da rugosidade, independente de qual comprimento de amostragem os mesmos estejam.

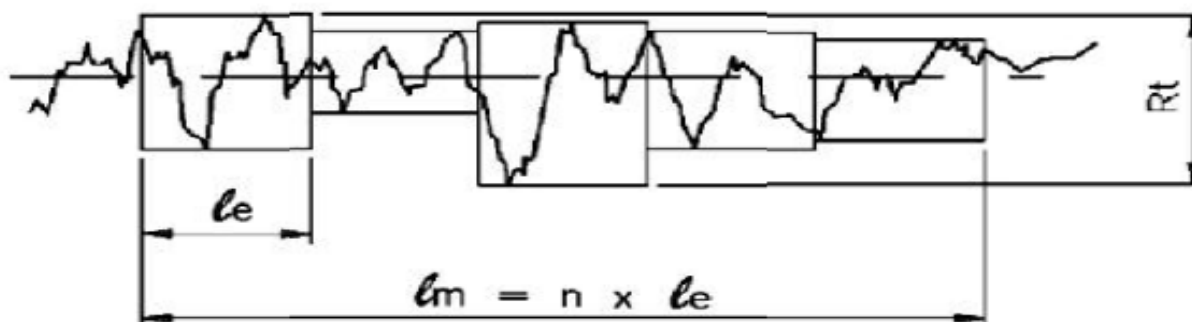


Figura 2.7 – Definição da rugosidade R_t .

Fonte: (FERREIRA, 2011)

O presente trabalho irá apresentar os valores mensurados nos ensaios através das rugosidades R_a e R_t , entendendo que esses parâmetros serão suficientes para avaliar as condições superficiais dos furos usinados.

2.2.2 Tolerância Dimensional

Tolerância dimensional é a diferença entre o limite do afastamento superior e o afastamento inferior de uma dimensão em relação ao seu valor nominal. O grau da tolerância define quão estreita será a diferença entre os afastamentos. Esta característica é denominada pelas letras "IT" (*International Tolerance*), que podem ser classificadas de IT01 a IT16, e a sua correspondência em milímetros é proporcional ao valor nominal da dimensão (UMARAS, 2010).

A tabela 2.6, apresenta os campos de tolerância na faixa de IT6 a IT14 em função da dimensão em milímetros, conforme norma ISO 286-1.

Tabela 2.6 – Campos de tolerância usuais para processos de usinagem.

Fonte: (Umaras, 2010).

Dimensões [mm]		Campos de tolerâncias conforme classes IT [μm]								
De	até (incl.)	IT6	IT7	IT8	IT9	IT10	IT11	IT12	IT13	IT14
0	3	6	10	14	25	40	60	100	140	250
3	6	8	12	18	30	48	75	120	180	300
6	10	9	15	22	36	58	90	150	220	360
10	18	11	18	27	43	70	110	180	270	430
18	30	13	21	33	52	84	130	210	330	520
30	50	16	25	39	62	100	160	250	390	620
50	80	19	30	46	74	120	190	300	460	740
80	120	22	35	54	87	140	220	350	540	870
120	180	25	40	63	100	160	250	400	630	1000
180	250	29	46	72	115	185	290	460	720	1150
250	315	32	52	81	130	210	320	520	810	1300
315	400	36	57	89	140	230	360	570	890	1400
400	500	40	63	97	155	250	400	630	970	1550

A tabela 2.7 demonstra a capacidade dos processos de fabricação convencionais para cada classe de tolerância dimensional.

Tabela 2.7 – Classes de tolerâncias IT em função aos processos de fabricação convencionais.

Fonte: (CAVALCANTE, 2010).

	IT4	IT5	IT6	IT7	IT8	IT9	IT10	IT11
1	X	X						
2		X	X	X				
3		X	X	X	X			
4		X	X	X				
5		X	X	X				
6		X	X	X	X			
7			X	X	X			
8			X	X	X	X	X	
9				X	X	X	X	X
10				X	X	X	X	
11				X	X	X	X	X
12							X	X
13							X	X
14							X	X
15							X	X
16								X
1-Lapidação, brunimento 2-Retificação cilíndrica 3-Retificação plana 4-Toneamento com diamante 5-Alargamento com diamante 6-Brochamento 7-Metalurgia do pó 8-Alargamento 9-Torneamento 10-Sinterização 11-Mandrilamento 12-Fresamento 13-Aplainamento 14-Furação com broca 15-Corte com punção 16-Fundição sob pressão								

2.3 PROCESSO DE FURAÇÃO

O processo de furação faz parte do grupo de processos de usinagem com geometria de corte definida responsável por aproximadamente 30% de todas as operações de usinagem em metais e 75% do volume de cavaco removido na usinagem (CASTILLO, 2005).

O processo convencional de furação é utilizado, na maior parte das aplicações, em operações com menor responsabilidade na qualidade superficial dos furos obtido, atingindo perfis de rugosidade na ordem de 6,3 Ra. Para processos mais refinados, que atinjam 0,8 Ra, por exemplo, opta-se por processos de alargamento,

mandrilamento entre outros, que são mais onerosos em relação aos custos de ferramentas de corte e, principalmente, tempo de operação.

Ferraresi (2006) define a furação como o processo mecânico de usinagem destinado a obtenção de um furo cilíndrico em uma peça, utilizando uma ferramenta multicortante com movimento de corte circular.

A figura 2.8 apresenta exemplos do processo de furação em suas variantes.

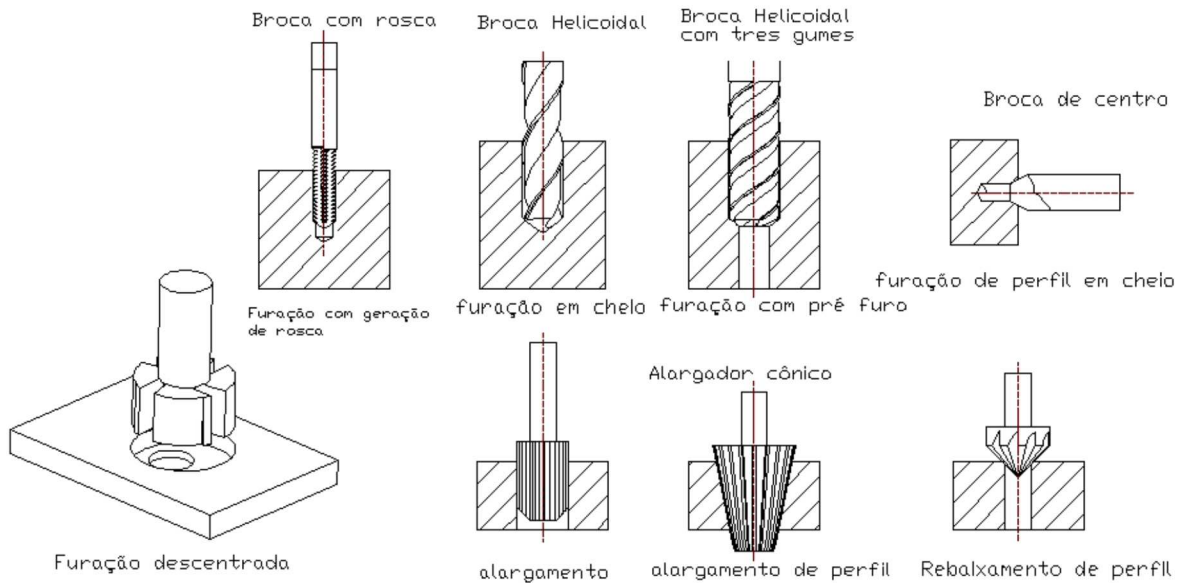


Figura 2.8 – Variantes do processo de furação.

Fonte: (KÖNIG e KLOCKE, 1997)

2.3.1 Tipo de brocas

Nesta seção serão apresentadas informações de um apanhado de geometrias de ferramentas empregadas no processo de furação, demonstrando a versatilidade deste processo e um breve relato sobre a evolução das geometrias ao longo do tempo.

2.3.1.1 Broca chata

É o tipo de broca mais antigo, obtidas a partir do achatamento a quente de uma barra cilíndrica, ou por encaixe de uma lamina. Atualmente, as brocas chatas são aplicadas em operações com furos pouco profundos e em materiais frágeis. Suportam momentos torsores limitados e a remoção de cavaco é muito deficiente (STEMMER, 2005).

2.3.1.2 Broca helicoidal

É a ferramenta mais empregada nas operações de furação. Sua forma construtiva é composta de uma haste cilíndrica e uma parte cortante que pode ser afiada de maneiras distintas conforme o material a ser usinado. Geralmente, apresenta dois gumes principais ligados através da aresta transversal. Contudo podem ter três ou mais gumes cortantes, com o intuito de reduzir os erros de posicionamento, melhorar o fluxo de cavacos e reduzir as forças de usinagem e avanço (DINIZ et.al., 2006).

2.3.1.3 Broca de centro

Usada para abrir um furo inicial que servirá como guia no local do furo que será feito pela broca helicoidal. Além do furo, esta broca produz simultaneamente chanfros que servem de superfície de referência na fixação entre pontas (OLIVEIRA, 2008).

2.3.1.4 Broca canhão

Empregada em furos profundos e apresenta como característica específica o fato de possuir um único gume de corte. A principal vantagem desta ferramenta é que a alimentação do fluido de corte é feita através da sua haste oca e o transporte de cavaco ocorre pelo canal em forma de V, na periferia da ferramenta evitando o entupimento (OLIVEIRA, 2008).

2.3.1.5 Broca alargadora

Na tentativa de reduzir o tempo de usinagem melhorando a qualidade dos furos obtidos nestes processos, fabricantes de ferramentas vêm desenvolvendo e aprimorando geometrias capazes de conjugar as operações de furação com operações de alargamento, obtendo resultados expressivos do ponto de vista de produtividade.

As brocas alargadoras, entre outras características, são fabricadas com maior número de canais, chegando a oito de acordo com o diâmetro da ferramenta.

Empregada em furos em cheio ou pré-furos, as brocas alargadoras podem ter de quatro a oito arestas de corte, de acordo com a aplicação e diâmetro da ferramenta. Podem conjugar as operações de furação e alargamento, reduzindo o tempo de

operação além de bom acabamento superficial, estabilidade dimensional e melhor concentricidade que os processos convencionais (MAPAL, 2013).

- a) Broca alargadora com quatro gumes cortes:** Com um total de quatro arestas de corte e quatro guias, pode-se se atingir elevados dados de corte e excelente qualidade do furo, com boa concentricidade e a maior estabilidade dimensional. Sua faixa de diâmetro recomendada pelos fabricantes está entre 6 a 20 milímetros, com tolerância do furo na ordem de IT9 (MAPAL, 2013). Pode ser aplicada em furos em cheio ou corte interrompido, aumentando a velocidade da usinagem quando comparado com brocas convencionais e algumas aplicações de alargamento. A figura 2.9 apresenta a broca alargadora de quatro cortes.



Figura 2.9 – Broca Alargadora Quatro Cortes.

Fonte: O autor

- b) Broca alargadora com seis gumes de cortes:** Com um total de seis arestas de corte e seis guias, tem como principal característica garantir um bom acabamento superficial, estabilidade dimensional e concentricidade do furo. Sua faixa de diâmetro recomendada pelos fabricantes está entre 4 a 16 milímetros, com tolerância do furo na ordem de IT7 (MAPAL, 2013). Pode ser aplicada em furos em cheio ou corte interrompido, atingindo tolerâncias dimensionais e superficiais equivalentes as tolerâncias obtidas no processo de alargamento. A figura 2.10 apresenta a broca alargadora de seis cortes.

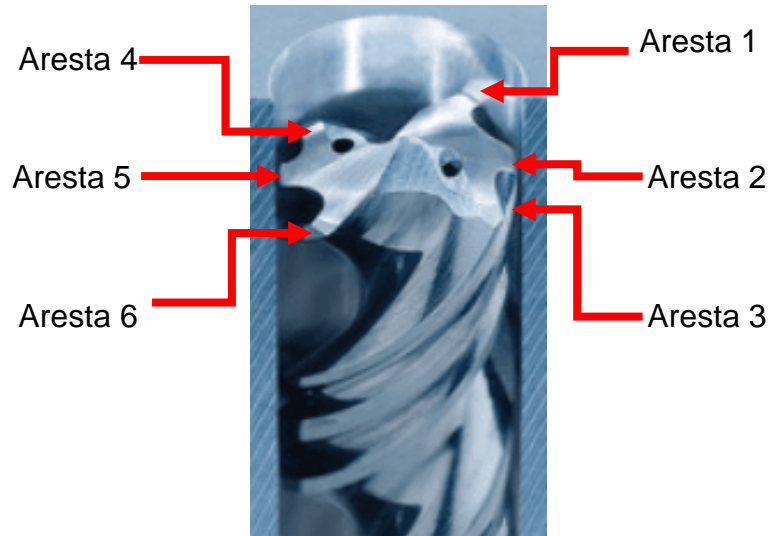


Figura 2.10 – Broca Alargadora Seis Cortes

Fonte: (MAPAL, 2013)

c) Broca alargadora com oito gumes de cortes:

Com um total de oito arestas de corte e oito guias, assim com a broca alargadora de seis cortes tem como principal característica garantir um bom acabamento superficial, estabilidade dimensional e concentricidade do furo. Sua faixa de diâmetro recomendada pelos fabricantes está entre 12 a 30 milímetros, com tolerância do furo na ordem de IT7 (MAPAL, 2013). Pode ser aplicada em furos em cheio ou corte interrompido, atingindo tolerâncias dimensionais e superficiais equivalentes as tolerâncias obtidas no processo de alargamento. A figura 2.11 apresenta a broca alargadora de oito cortes.

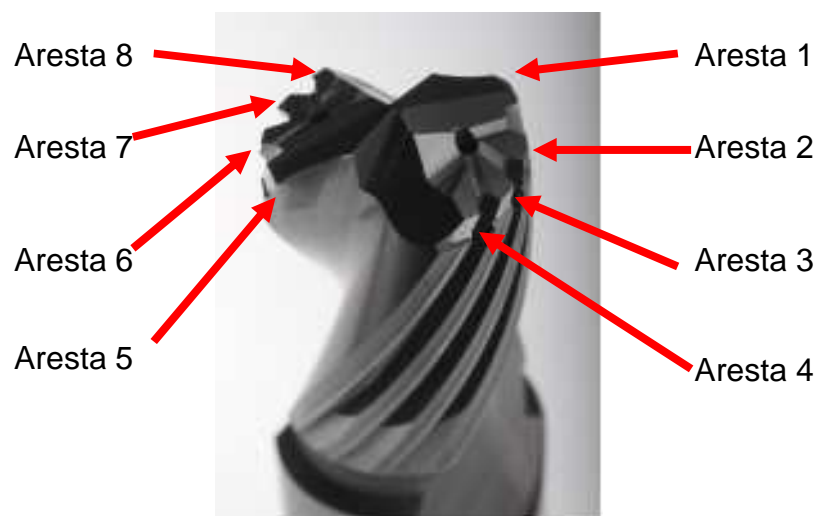


Figura 2.11 – Broca Alargadora Oito Cortes

Fonte: (MAPAL, 2013)

2.3.2 Geometria da broca helicoidal

Como em qualquer ferramenta de corte, a geometria da broca helicoidal define seu desempenho e sua aplicação. A figura 2.12 apresenta os principais ângulos encontrados em uma broca helicoidal, de acordo com o padrão de nomenclatura adotado por Stemmer (2005).

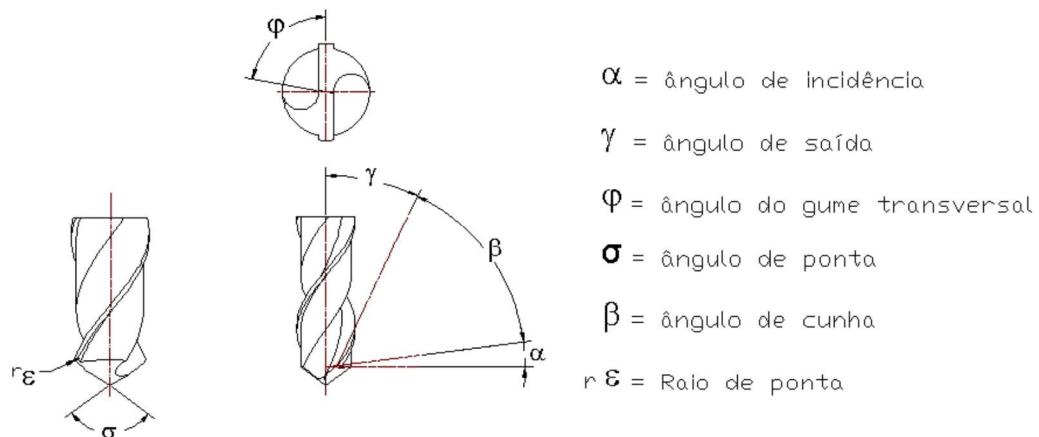


Figura 2.12 – Ângulos de corte da broca helicoidal.

Fonte: (STEMMER, 2005)

Ângulo de incidência (α) é obtido através do rebaixamento do flanco principal. Tem seu valor variando entre 12° a 15°. O aumento do ângulo de incidência reduz a força de corte por minimizar o contato entre a peça e a superfície de folga da ferramenta (DINIZ ET. AL., 2000).

Ângulo de saída (γ) é o ângulo da helicóide dos canais da broca. Segundo Shaw (1984) este é um dos principais ângulos da afiação da ferramenta do ponto de vista geométrico, tendo maior influência nas forças de usinagem. Quanto maior o ângulo de saída menor será a força de corte, proporcionando maior ângulo de cisalhamento, menor grau de deformação do material da peça no plano de cisalhamento e menor grau de recalque.

Ângulo do gume transversal (φ) está localizado na ponta da broca, ligando entre si os gumes principais. Seu comprimento depende do diâmetro da alma da ferramenta. (STEMMER, 2005).

O ângulo de ponta (δ) é formado pelos dois gumes principais. Influencia na espessura do cavaco, para um mesmo avanço, sendo que o emprego de um ângulo

de ponta menor faz com que o cavaco seja mais fino e mais largo. Um grande ângulo de ponta permite, usualmente, o aumento do avanço. Isto possibilita uma redução no tempo de usinagem. Com o aumento do ângulo de ponta a centragem da ferramenta e o momento torsor tendem a diminuir (STEMMER, 2005).

O ângulo de cunha (β) é o ângulo entre a superfície de folga e o plano de corte da ferramenta (STEMMER, 2005).

O aumento do raio de ponta ($r\epsilon$) potencializa o efeito de deformação lateral do material usinado (*plowing effect*), o que faz aumentar a força de corte. Raios de ponta grande reforçam a ferramenta, prolongam sua vida melhoram o acabamento superficial da peça, quando não geram vibração no corte (RODRIGUES, 2005).

2.3.2.1 Alguns estudos com foco na geometria das ferramentas de furação

Considerando o aspecto da geometria das ferramentas no processo de furação, Oliveira (2008) estudou a influência da geometria da ponta de brocas helicoidais na usinagem de ferro fundido vermicular. Três geometrias foram testadas, afiação em S, em cruz e com ponta em raio. Utilizou como critérios para comparação as características de saída do processo comuns na avaliação da usinabilidade do material, tais como a vida da ferramenta, a formação do cavaco, as forças de usinagem e de avanço, as vibrações do sistema, a emissão acústica e a qualidade dos furos. A figura 2.13 apresenta os resultados para a vida útil das três geometrias da ponta testadas na usinagem.

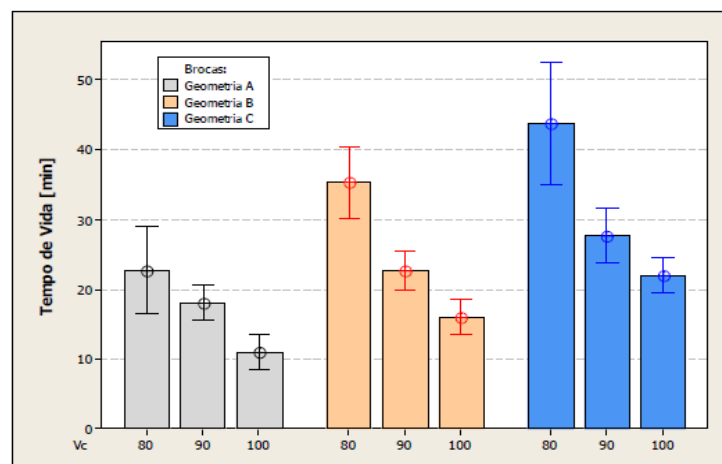


Figura 2.13 Comparação da vida entre as três geometrias testadas.

Fonte: (OLIVEIRA, 2008)

No ponto de vista econômico da usinagem, Castillo et. al. (2005) analisou em aspectos econômicos na furação de ferro fundido cinzento com brocas de metal duro. Variando os parâmetros de corte, quatro geometrias diferentes de ferramentas foram avaliadas, comparando os tempos, custos e parâmetros de processo com maior desempenho em cada uma das geometrias. A figura 2.14 apresenta os resultados das geometrias testadas em função da velocidade de corte.

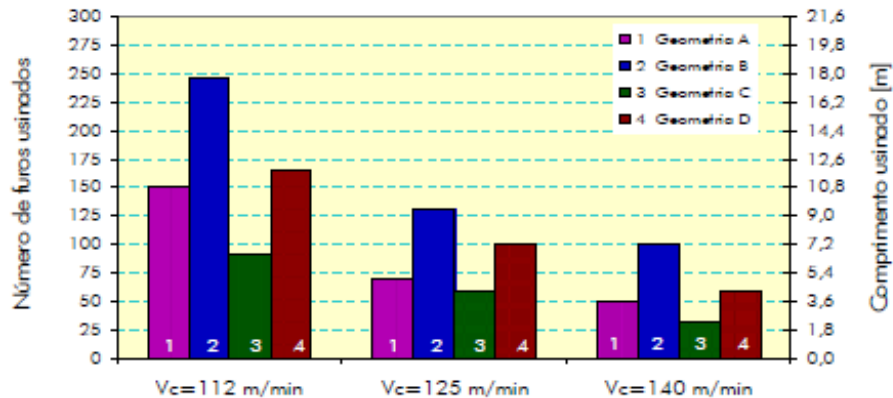


Figura 2.14 Comparação da vida entre as três geometrias testadas.

Fonte: (CASTILLO et al. 2005)

O autor comprovou que a vida útil da ferramenta é diretamente afetada pela velocidade de corte. Quanto maior a velocidade de corte, maior o desgaste da ferramenta e menor sua vida útil. Por fim, o autor constata que uma das ferramentas avaliadas (geometria B) apresenta resultados de mínimo tempo de fabricação, mínimo custo de fabricação e máxima produção mais expressivos que as demais.

2.4 PROCESSO DE ALARGAMENTO

O processo de furação com brocas helicoidais consiste em uma operação de desbaste. A superfície originada na furação requer operações adicionais para melhorar o acabamento superficial e as tolerâncias dimensionais. Essas operações podem ser realizadas através de alargadores de desbaste e acabamento. Os alargadores são ferramentas multicortantes de forma cilíndrica ou cônica que servem para alargar e acabar furos, através de seu movimento de rotação (STEMMER, 2005).

O alargamento é um processo de usinagem capaz de reduzir o valor da rugosidade, e/ou classificar o tamanho dos furos existentes com precisão. São produzidos cavacos para remover quantias relativamente pequenas de material da

parede do furo. O alargamento pode ser executado nos mesmos tipos de máquinas usadas nos processos de furação (JÚLIO, 2009).

A Figura 2.15 apresenta o tipo conceitual de alargador onde pode ser observado que a retirada de material é realizada com os chanfros presentes na entrada do alargador.

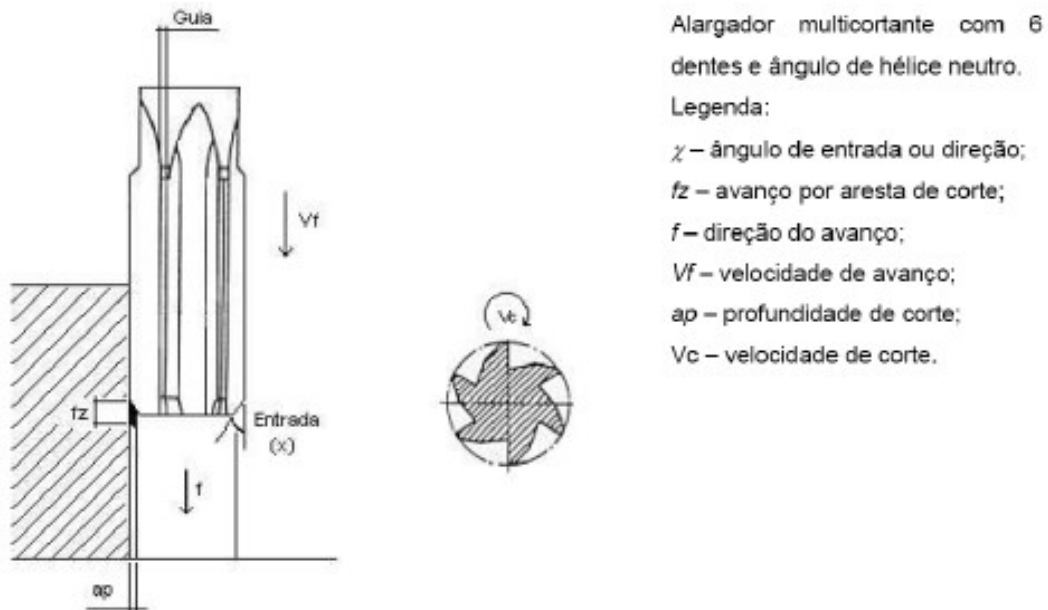


Figura 2.15 – Cinemática do processo de alargamento.

Fonte: (FERREIRA, 2011)

2.4.1 Pré-furo

Além de um simples processo de furação em usinagem, a precisão e acabamento do furo alargado depende, principalmente, da condição do pré-furo, da fixação da peça, rigidez e robustez da máquina-ferramenta, parâmetros de corte plenamente adequados, e da aplicação mais correta dos fluidos de corte (JÚLIO, 2009).

Para o processo de alargamento, há a necessidade de uma ótima condição do pré-furo, pois ao primeiro contato do alargador com a borda desta pré-furação, todas as arestas principais de corte do alargador deverão estar igualmente carregadas num corte contínuo (JÚLIO, 2009).

Os alargadores são multifuncionais, garantem a dimensão e acabam um furo existente. Porém, como não realinham este furo, a tendência dos alargadores é seguir o furo onde penetram (MASON, 2000).

Outro aspecto importante na usinagem com alargadores é o sobremetal deixado (diferença entre o diâmetro do pré-furo e o diâmetro do furo alargado). A tabela 2.8 apresenta os valores recomendados para as sobremedidas no processo de alargamento. São valores referentes a alargadores fixos (STEMMER, 2005).

Tabela 2.8 – Sobremedidas em “mm” recomendadas para alargamento de furos.

Fonte: (STEMMER, 2005).

DIÂMETRO DOS FUROS	ACO E FOFO	Zn, COBRE E LIGAS DE ALUMINIO	PLASTICO
até 5mm	0,1 a 0,2	0,5	0,2
5 a 20mm	0,2 a 0,3	0,6 - 0,8	0,4
20 a 50mm	0,3 a 0,5	--	0,5
Maiorque 50mm	0,5 a 1,0	--	--

A quantidade mínima de metal a ser removido é influenciada pela composição e dureza da peça de trabalho. Por ser uma operação de usinagem, a formação do cavaco é um fator importante para a eficiência da operação. Se for pouco material a ser removido, a ferramenta irá apenas atritar a peça, ao invés de cortá-la, o que resulta em danos tanto para o alargador como para a superfície usinada. Para “metais moles”, a remoção de 0,20 mm do diâmetro por passe é próximo do mínimo, dependendo do comprimento do furo e da rigidez da máquina. Se a ferramenta for de metal duro essa diferença pode ser reduzida para 0,13mm. Para remoção menor do que 0,13mm de metal, o brunimento ou outro processo de usinagem é preferível (METALS HANDBOOK, 1989).

2.4.2 Alargadores de desbaste

São usados para aumentar o diâmetro de furos em bruto, como os obtidos por fundição ou forjamento. Os alargadores de desbaste possuem três ou mais canais,

com os respectivos gumes ou guias. A principal diferença para as brocas helicoidais é o fato de não possuírem o gume transversal (STEMMER, 2005).

2.4.3 Alargadores de acabamento

São ferramentas destinadas ao acabamento de furos com grande precisão de medidas e bom acabamento superficial. Possuem, normalmente, um número par de gumes de corte, os quais, geralmente, são retos. Alargadores com canais helicoidais são mais utilizados para usinagem em furos com interrupções na parede (STEMMER, 2005).

Os alargadores de acabamento em geral são de corte à direita. Usando-se uma hélice esquerda, o cavaco é empurrado para frente, evitando que prejudique a superfície já usinada. Alargadores com hélice à direita e corte a direita somente são utilizados em operações de furo cego, tendo em vista que o cavaco é puxado para cima, penetrando entre as paredes usinadas e prejudicando o acabamento (STEMMER, 2005).

Para operações de alargamento onde não se tem prévia experiência sobre qual velocidade de corte e avanço utilizar, o bom senso recomenda que se utilize inicialmente velocidade de corte e avanço moderados, de forma a observar se houve sinais de trepidação da ferramenta ou qualquer outro sinal anormal nas condições de usinagem. Caso não seja observado nenhum problema pode-se aumentar um dos dois (ou ambos) parâmetros até que se note presença de vibração. Chegando-se a este ponto, então ele será o referencial, e recomenda-se manter a velocidade de corte e avanço abaixo dos valores pré-determinados para que se obtenha o melhor acabamento da superfície e vida da ferramenta mais longa. (MACHADO, 2006)

2.4.4 Geometria dos alargadores

Os alargadores apresentam uma vasta configuração de características, o que permite obter ferramentas adequadas para praticamente todas as aplicações.

A Figura 2.16 mostra de forma genérica a nomenclatura dos alargadores, onde é possível observar o gume principal que apresenta um ou mais chanfros que

executam o corte, o comprimento e o ângulo deste chanfro é o que caracteriza a entrada do alargador e sua aplicação. O gume secundário de corte, responsável também pela guia e remoção de cavaco e pode-se apresentar em forma de hélice ou reta. A haste, região onde é fixada a ferramenta pode ser encontrada cilíndrica para fixação em pinças ou adaptadores e cônica para fixação direta no fuso da máquina (FERREIRA, 2011).

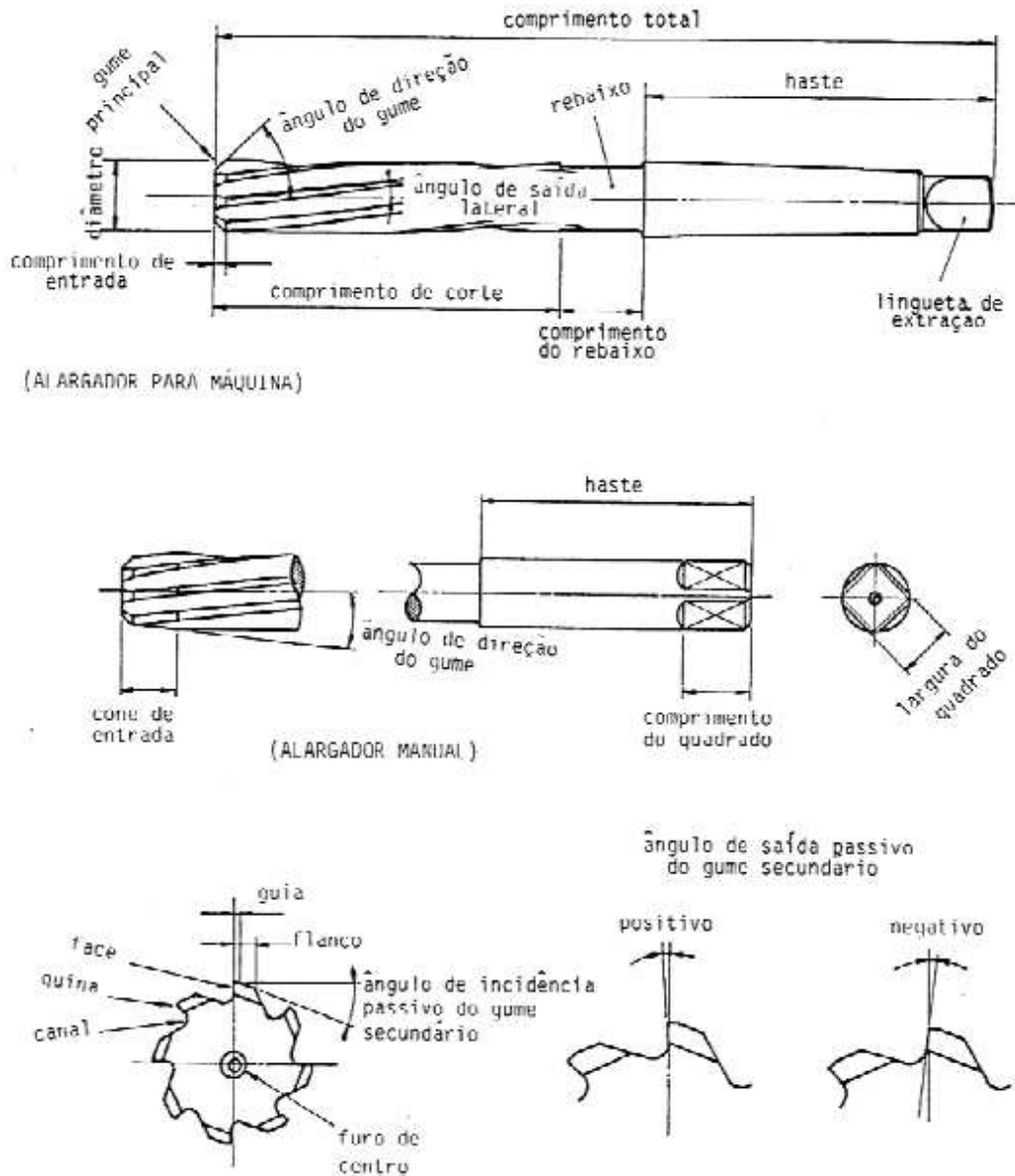


Figura 2.16 – Nomenclatura do Alargador.

Fonte: (STEMMER, 2005)

2.4.4.1 Ângulo de entrada

A entrada do alargador define sua aplicação e seus resultados, a Figura 2.17 mostra diversas configurações de entradas usualmente aplicadas. A Figura 2.17a possui entrada de 45° . Um alargador pode combinar mais de um ângulo de entrada sendo o primeiro para maior retirada de material e o segundo com maior função de acabamento e calibração do furo (Figura 2.17b e 2.17c). É possível também encontrar o tipo de entrada escalonada. Estas ferramentas possuem dois diâmetros, o primeiro para guiar o alargador no pré-furo e o segundo para realizar a usinagem (Figura 2.17d) (FERREIRA, 2011).

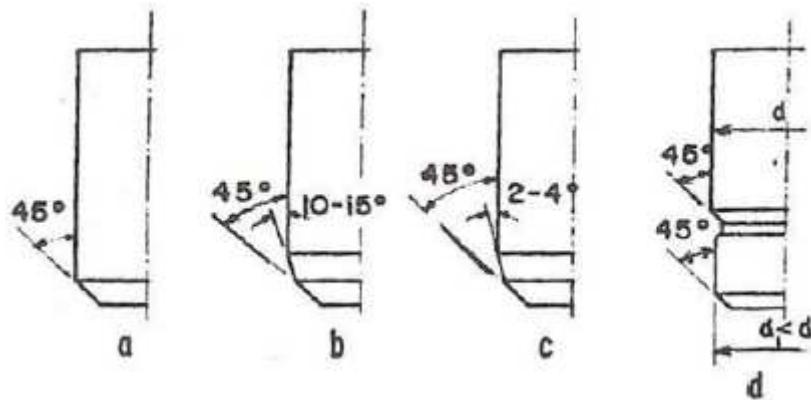


Figura 2.17 – Tipos de Entrada. (STEMMER, 2005)

2.4.4.2 Ângulo da Hélice

A superfície de saída de cavaco pode se apresentar de duas formas, reta ou helicoidal. Os alargadores de canais retos (Figura 2.18a e 2.18b) são de menor custo e indicados para trabalhos mais precisos. Já para usinagem de furos onde ocorre a presença de corte interrompido os canais helicoidais são mais indicados por apresentarem menor comprimento de contato simultâneo entre as guias e a parede dos furos ocorrendo uma suavização na passagem destes com a superfície interrompida (FERREIRA, 2011).

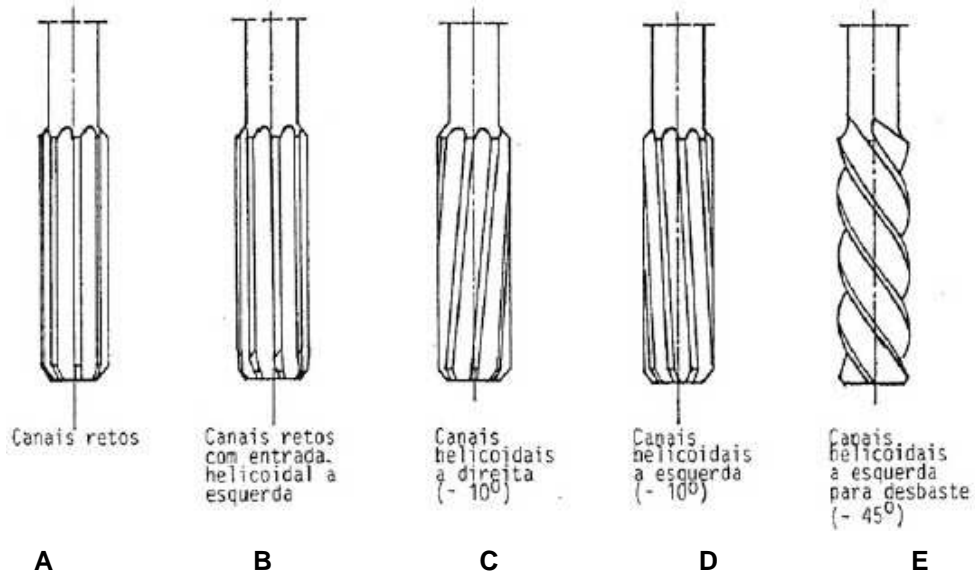


Figura 2.18 – Tipos de Hélice.

Fonte: (STEMMER, 2005)

Os canais helicoidais podem ser classificados em direita (Figura 2.18c) e esquerda (Figura 2.18d). Alargadores com corte à direita e hélice à direita são indicados para furos cegos, pois devido à sua inclinação mais positiva favorecem que o cavaco seja retirado para fora do furo. Em contrapartida, fica sujeito desta forma a riscos e esmagamento na superfície já usinada, provocado pelo escorregamento do cavaco nesta direção. Outra característica deste tipo de alargador é que o esforço de corte é direcionado no sentido do avanço fazendo com que a folga axial existente no eixo da máquina e na fixação tenha influência sobre o movimento suave de deslocamento, fazendo com que a ferramenta seja puxada para dentro do furo (STEMMER, 2005).

2.4.4.3 Alguns estudos com foco no processo de alargamento

Estudos recentes apresentam resultados importantes para a usinagem de furos com baixa rugosidade. Esses resultados podem ser utilizados como valiosas fontes de informações para trabalhos futuros.

Almeida (2008) investigou a influência da geometria do alargador, os parâmetros de corte do processo de alargamento e os revestimentos das ferramentas utilizadas atualmente para usinagem de ferro fundido cinzento e vermicular. A análise dos resultados foi pautada em parâmetros de qualidade tais como circularidade,

cilindricidade e rugosidade da superfície dos furos usinados. A figura 2.9 apresenta resumidamente os resultados obtidos no estudo.

Tabela 2.9 – Comparação geral entre os materiais testados.

Fonte: (ALMEIDA, 2008).

Material	Sobremetal	Guia cilíndrica	Revestimento	Velocidade de corte	Avanço
Ferro Fundido Cinzento	Maior	Menor	Helica	Menor	Maior
Ferro Fundido Vermicular	Maior	Menor	Alcrona	Menor	Maior

Dentre os principais resultados obtidos, o autor conclui que os revestimentos Hélica e Alcrona tiveram os melhores resultados no alargamento de furos em ferro fundido cinzento e vermicular respectivamente. Os furos com melhor qualidade dimensional foram obtidos quando o sobremetal para o alargamento foi da ordem de 0,25mm, com a redução das guias cilíndricas do alargador para 0,1mm, baixas velocidades de corte (40m/min) e maiores avanços (0,5mm/rot).

Nesse contexto de qualidade dos furos no processo de alargamento, Fonseca et. al (2009) obteve resultados semelhantes ao estudo de Almeida (2008). Em seu artigo, analisa o efeito da variação dos parâmetros de corte (sobremetal, guia cilíndrica e avanço) na rugosidade e nos desvios geométricos (erros de cilindridade e circularidade) durante o processo de alargamento de ferro fundido vermicular.

Os autores concluíram neste estudo que o sobremetal da ordem de 0,5mm garante a fabricação de furos alargados com melhor circularidade e cilindridade, porém para a rugosidade os melhores resultados foram obtidos com sobremetal na ordem de 0,2mm. As guias cilíndricas maiores (0,3mm) são positivas para a circularidade e cilindridade. Porém a rugosidade tem seu melhor resultado com guias cilíndricas estreitas (0,1mm). O avanço de 0,5 mm/rot contribui para a circularidade e cilindridade, porém para uma menor rugosidade precisou-se reduzir o avanço para 0,1 mm/rot. Por fim, os requisitos de circularidade e cilindridade tiveram os melhores resultados com a aplicação de lubrificação, enquanto que a rugosidade foi melhor na usinagem a seco.

Ohgo et al. (1979) elencaram que ao usinar o ferro fundido cinzento com alargadores de metal duro utilizando fluido de corte, verificaram que ao aumentar a velocidade de corte de 8 m/min para 40 m/min a tolerância do furo praticamente não

foi alterada, e ao diminuir o avanço de 0,25 mm/rot para 0,065 mm/rot obteve-se um melhor acabamento. Isso indica que o avanço exerce maior influência nas características dimensionais dos furos, sugerindo utilização de valores baixos de avanço para o processo de alargamento.

2.5 MATERIAIS PARA FABRICAÇÃO DE FERRAMENTAS

Os materiais utilizados atualmente para a fabricação de ferramentas de cortes podem ser agrupados levando em conta sua ordem cronológica de desenvolvimento e suas características químicas (FERRARESI, 2006):

- Aços – Carbono (com baixos teores de liga);
- Aços Rápidos;
- Ligas Fundidas;
- Metal Duro;
- Cermet;
- Materiais Cerâmicos:
- Diamantes;

Segundo Ferraresi (2006) a seleção do material a ser empregado na fabricação de uma ferramenta de corte deve passar pela análise de alguns fatores como:

- a) Material usinado;
- b) Natureza da operação de usinagem;
- c) Condições da máquina operatriz;
- d) Forma e dimensão da ferramenta;
- e) Custo do material para a ferramenta;
- f) Emprego de refrigeração ou lubrificação;

As ferramentas de Aço Rápido e Metal duro são as mais utilizadas na indústria atualmente. Os aços rápidos apresentam alta dureza a frio e a elevadas temperaturas, tenacidade, podem ser forjados, laminados, usinados, tornando-os bastante práticos e baratos. O metal duro pode ser dividido em várias classes, o que possibilita seu emprego em operações de usinagem de praticamente todas as ligas metálicas conhecidas (FERRARESI, 2006).

2.5.1 Aço rápido

O aço rápido é um material com alta qualidade de elementos de liga tais como tungstênio, molibdênio, cromo vanádio, cobalto e nióbio. É assim denominado por suportar maiores velocidades de corte (DINIZ *et. al.*, 2006).

É um material tenaz, com elevada resistência ao desgaste e elevada dureza a quente, podendo ser empregado até temperaturas de corte da ordem de 600° C. Sua estrutura metalográfica no estado temperado é martensítica com carbonetos incrustados (DINIZ *et.al.*, 2006).

Em geral, os aços rápidos podem ser divididos em duas categorias: i) categoria “T”, que compreende os tipos predominantemente ao tungstênio; ii) categoria “M”, que compreende os tipos predominantemente ao molibdênio. A tabela 2.10 apresenta, de forma sumária, a composição e as características dos aços rápidos.

Tabela 2.10 – Composição e características dos aços rápidos.

Fonte: (DINIZ *et. al.*, 2006).

Tipo de Aço	Classificação SAE	% C	% Mn	% Si	% Cr	% V	% W	% Mo	% Co	Tenacidade	Resistência ao desgaste	Dureza a quente
ao W	T1	0,70	0,30	0,25	4,00	1,00	18,00	-	-	Baixa	Muito Boa	Muito Boa
	T2	0,85	0,30	0,25	4,00	2,00	18,00	-	-			
	T3	1,00	0,30	0,25	4,00	3,00	18,00	-	-			
	T7	0,80	0,30	0,25	4,00	2,00	14,00	-	-			
	T9	1,20	0,30	0,258	4,00	4,00	18,00	-	-			
ao W-Co	T4	0,75	0,30	0,25	4,00	1,00	18,00	-	5,00	Baixa	Muito Boa	Excelente
	T5	0,80	0,30	0,25	4,00	2,00	18,00	-	8,00			
	T6	0,80	0,30	0,25	4,00	1,50	20,00	-	12,00			
	T8	0,80	0,30	0,25	4,00	2,00	14,00	-	5,00			
aoMo	M1	0,80	0,30	0,25	4,00	1,00	1,50	8,00	-	Baixa	Muito Boa	Muito Boa
	M2	0,85	0,30	0,25	4,00	2,00	6,00	5,00	-			
	M3	1,00	0,30	0,25	4,00	2,75	6,00	5,00	-			
	M4	1,30	0,30	0,25	4,00	4,00	5,50	4,50	-			
	M10	0,85	0,30	0,25	4,00	2,00	-	8,00	-			
aoMo-Co	M6	0,80	0,30	0,25	4,00	1,50	4,00	5,00	13,00	Baixa	Muito Boa	Excelente
	M30	0,85	0,30	0,20	4,00	1,25	2,00	8,00	5,00			
	M34	0,85	0,30	0,25	4,00	2,00	2,00	8,00	8,00			
	M35	0,85	0,30	0,25	4,00	2,00	6,00	5,00	5,00			
	M36	0,85	0,30	0,25	4,00	2,00	6,00	5,00	8,00			

2.5.2 Metal duro

O metal duro é o mais importante material para ferramentas utilizado na indústria moderna. Suas principais características são dureza a temperatura ambiente, dureza a quente, resistência ao desgaste e tenacidade. Essas combinações são possíveis através da variação da composição do material. É um produto da metalurgia do pó, também conhecido como carboneto de tungstênio sinterizado (FERRARESI, 2006).

Em seu processo de fabricação, o pó sinterizado é feito de partículas duras de carbonetos combinado com um ou mais metais do grupo do ferro (ferro, níquel ou cobalto), formando um corpo de alta dureza e resistência a compressão. As partículas duras, carbonetos de tungstênio, têm seu tamanho variando entre 1 μ m a 10 μ m e ocupam de 60 a 90% do volume do material. O material aglomerante é, na maioria das vezes, o cobalto (DINIZ *et. al.*, 2006).

Outra característica importante no metal duro é seu coeficiente de dilatação térmica. O valor desse coeficiente é de cerca da metade do valor do aço, em temperaturas desde a ambiente até 675°C (DINIZ *et. al.*, 2006).

Atualmente, já são produzidos metais duros com partículas com cerca de 0,1 μ m, melhorando muitas características do material para a fabricação de ferramentas. Os metais duros com micro grão são classificados com o tamanho do grão: fino (0,8 a 1,3 μ m), submicrométrico (0,5 a 0,8 μ m), ultrafino (0,2 a 0,5 μ m) e nanométrico (menor que 0,2 μ m). Devido ao fator de empacotamento que os grãos finos propiciam, quanto menor o grão maior a dureza, resistência ao desgaste e tenacidade do material (DINIZ *et.al.*, 2006).

2.5.2.1 Classe do Metal Duro

O metal duro pode ser classificado em três grupos, designados pelas letras P, M e K.

O grupo P, dividido nos subgrupos de P1 a P50, apresenta elevada dureza a quente e resistência ao desgaste, pois contem em sua estrutura elevado teor de TiC

+ TaC. Essa é a classe mais resistente ao mecanismo de desgaste por cratera, pois exige temperaturas mais elevadas para reagirem com o ferro dos aços (DINIZ *et.al.*, 2006).

O grupo K, dividido nos subgrupos K1 a K40, é composto de carbonetos de tungstênio aglomerados pelo cobalto. São indicados para usinagem de materiais frágeis e que formam cavaco curto, pois não são resistentes ao mecanismo de desgaste por cratera, e ao sofrerem uma pequena deformação já se rompem (DINIZ *et.al.*, 2006).

O grupo M, dividido nos subgrupos M1 a M40, possui características intermediárias aos grupos P e K. Sua aplicação é a mais variada, tendo como a mais usual usinagem em aços inoxidáveis (DINIZ *et.al.*, 2006).

A tabela 2.11 apresenta, de forma sumária, a composição química e as características dos metais duros em suas variadas classes.

Tabela 2.11 – Composição e características dos metais duros.

Fonte: (DINIZ *et. al.*, 2006).

Classe	% WC	% TiC + TaC	% CO	Densidade (g/cm ³)	Dureza (HV)	Resistência a Ruptura Trnasv (Kgf/mm ²)
P1	30	64	6	7,2	1800	75
P10	55	36	9	10,4	1600	140
P20	76	14	10	11,9	1500	150
P30	82	8	10	13	1450	170
P40	77	12	11	13,1	1400	180
P50	70	14	16	12,9	1300	200
M10	84	10	6	13,1	1650	140
M20	82	10	8	13,4	1550	160
M30	81	10	9	14,4	1450	180
M40	78	7	15	13,5	1300	200
K10	92	2	6	14,8	1650	150
K20	91,5	2,5	6	14,8	1550	170
K30	89	2	9	14,5	1450	190
K40	88	-	12	14,3	1300	210

2.6 FORMAÇÃO DE CAVACO

A formação do cavaco influencia muitos fatores relativos à usinagem, tais como o desgaste da ferramenta, os esforços de corte, o calor gerado na usinagem, a penetração no fluido de corte, entre outros. Aspectos econômicos, de qualidade das peças usinadas, segurança do operador, utilização da máquina estão diretamente ligados ao processo de formação de cavaco (DINIZ *et.al.*, 2006).

A formação do cavaco é basicamente influenciada pela deformabilidade, ductilidade e resistência, ou estado metalúrgico do material da peça. Um aumento da resistência ou uma diminuição da ductilidade leva a uma melhor quebra do cavaco.

A deformabilidade do material da peça é verificada pela resistência ao cisalhamento como função do alongamento. Estruturas que tenham embutidos em sua constituição básica componentes duros (obtidos por um tratamento térmico de crescimento de grão) levam a formação de cavaco com recalque irregular de quebra mais fácil (WOSNIAK, 2011).

A remoção do cavaco pode ser auxiliada pela utilização de um ciclo intermitente de furação onde a interrupção do avanço da ferramenta e a sua retirada de dentro do furo expulsam os cavacos e limpam os canais da broca. Contudo esta pratica gera um aumento nos tempos de usinagem. Além desta, outra alternativa aplicada para remoção dos cavacos é a injeção de fluido de corte sob pressão através de canais na broca diretamente no fundo furo (STEMMER, 2005).

Shaw (1984) menciona o uso quebra-cavaco (superfícies de saída das ferramentas com formatos especiais) como o método mais utilizado no controle do cavaco através da redução da curvatura do mesmo, seja ele postiço ou integral, contribuindo com a proteção da aresta de corte da ferramenta

Na usinagem do ferro fundido o cavaco é arrancado, característica comum em materiais frágeis ou de estrutura heterogênea, nos quais fragmentos da peça são arrancados em formato de lascas ou pedaços. O cisalhamento se dá em relação à grafita, que possui a menor resistência mecânica e pela descontinuidade na matriz. Portanto, 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).

Para Schröeter; Weingaertner, (2001) uma das características da usinagem dos ferros fundidos é a geração de cavacos do tipo cisalhado ou arrancado, causando vibrações na ferramenta, o que pode provocar pequenos lascamentos, caso o material da ferramenta seja frágil. Cavacos cisalhados ou arrancados também geram menos calor na interface com a ferramenta, devido ao menor atrito dos cavacos nos canais de escoamento das brocas, o que possibilita a utilização de ferramentas de aço rápido na operação, mesmo sendo mais sensíveis à temperaturas elevadas.

A figura 2.19 apresenta o mecanismo de formação de cavacos em ferros fundidos cinzentos e nodulares.

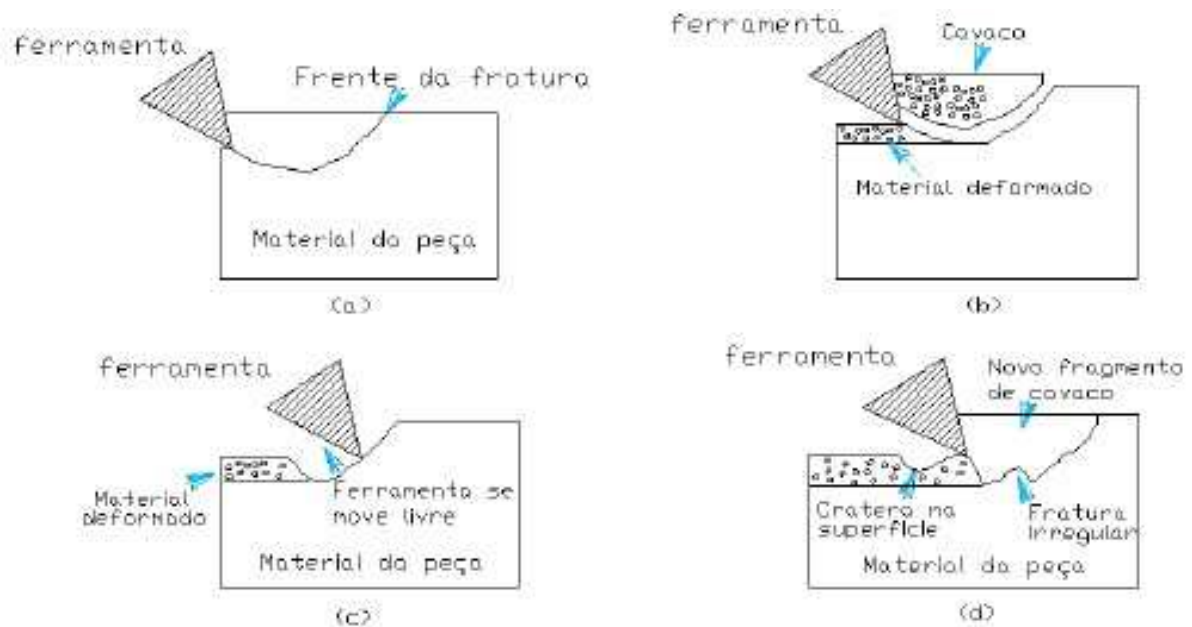


Figura 2.19 – Formação do cavaco no Ferro Fundido.

Fonte: (OLIVEIRA, 2011)

Durante a usinagem, a ferramenta comprime o material abaixo do flanco criando uma fratura que se propaga à frente do gume (a). Com o movimento de corte da ferramenta o fragmento de material se separa da peça (b). Como o cavaco foi arrancado a frente da ferramenta, a mesma move-se livre sem contato com a peça até encontrar a superfície da peça (c). O ciclo tem início novamente, criando uma nova fratura no material, deixando para trás pequenas crateras na superfície, o que contribui para o aumento da rugosidade (d). Nos ferros fundidos nodulares a maior deformação plástica e menor propagação de trincas deste material torna o cavaco

mais contínuo. O ferro fundido vermicular, por possuir propriedades entre o nodular e o cinzento, apresenta uma formação intermediária de cavacos (OLIVEIRA, 2011).

2.6.1 Tipos de cavaco

Pode-se classificar os cavacos de uma usinagem em três tipos principais.

2.6.1.1 Cavaco contínuo

Apresenta-se na forma de lamelas justapostas em uma disposição contínua e agrupadas em grupos lamelares. O cavaco contínuo é comum na usinagem de materiais dúcteis e homogêneos, nos quais são empregados avanços considerados pequenos a médios. Forma-se geralmente com velocidade de corte superior a 60 m/min (valor referente ao material aço) (WOSNIAK, 2011).

2.6.1.2 Cavaco cisalhado

O cavaco cisalhado forma-se em grupos lamelares bem distintos e justapostos. Ocorre quando há a diminuição da resistência do material no plano de cisalhamento, proveniente do aumento da deformação, à heterogeneidade da estrutura metalográfica ou a vibrações externas que conduzem às variações da espessura de cavaco. Este tipo de cavaco é comum quando emprega-se grandes avanços, velocidades de corte inferiores a 100 m/min (valor referente ao material aço) e ângulo de saída pequeno (WOSNIAK, 2011).

2.6.1.3 Cavaco de ruptura ou fragmentado

Apresenta-se na forma de fragmentos arrancados da peça usinada. Na região de cisalhamento, ocorre a ruptura completa do material em grupos lamelares, os quais permanecem separados. Esta forma de cavaco é comum na usinagem de materiais frágeis ou de estrutura heterogênea, tais como ferro fundido ou latão. Conforme as condições de usinagem (avanço, velocidade de corte e ângulo de saída) pode-se passar do cavaco contínuo ao de cisalhamento ou vice-versa.

2.6.2 Forma do cavaco

Os cavacos gerados nos processos de usinagem podem ser diferenciados através de sua forma. Estas formas de cavaco representam características importantes ao processo aplicado, muitas vezes dificultando a operação de usinagem, prejudicando o acabamento superficial da peça, desgastando mais ou menos a ferramenta. Podendo até mesmo danificar e quebrar a mesma. A figura 2.20, mostra diversas formas de cavaco e sua designação (WOSNIAK, 2011).

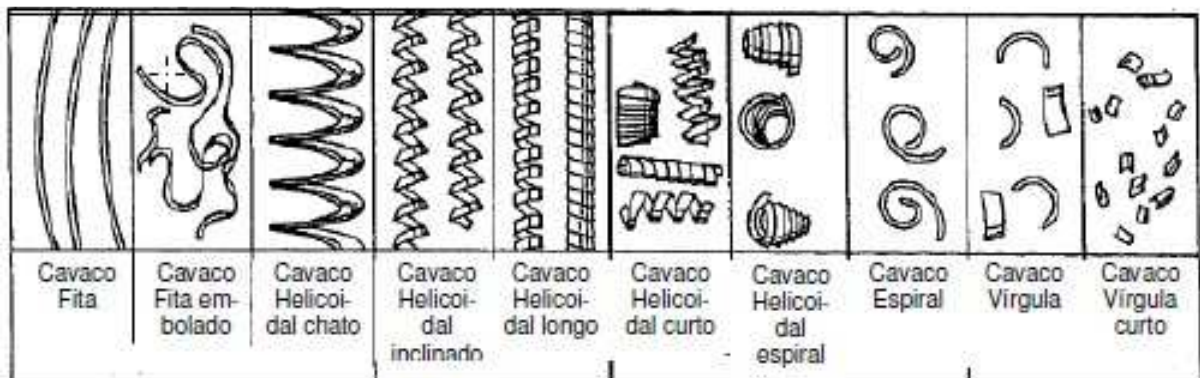


Figura 2.20 – Forma do cavaco.

Fonte: (WOSNIAK, 2011)

2.7 MECANISMOS DE DESGASTE

Define-se o desgaste em ferramentas de corte como uma perda gradual de material do corpo pela ação de contato físico da ferramenta com a peça e o próprio cavaco em um meio seco ou úmido, onde vários são os fenômenos causadores do desgaste (KÖNIG e KLOCKE, 1997).

Entre os principais agentes causadores do desgaste em ferramentas de corte podem-se citar a abrasão mecânica, a adesão, a difusão e a formação de óxidos. A figura 2.21 mostra os principais mecanismos de desgaste em função da temperatura de corte no processo de usinagem.

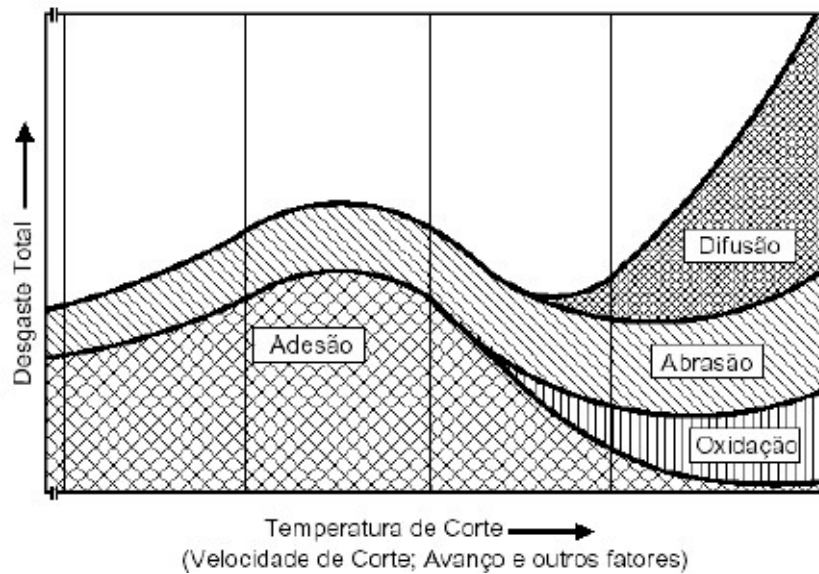


Figura 2.21 – Principais mecanismos de desgaste na usinagem.

Fonte: (OLIVEIRA, 2011)

A medida que a temperatura de corte aumenta, é possível observar o comportamento e a alternância entre os mecanismos de desgaste predominantes. Neste sistema tribológico, alguns mecanismos de desgaste prevalecem sobre os outros. Isso ocorre devido a alguns fatores, tais como o material da ferramenta e da peça, as condições de corte, a geometria da ferramenta e o meio lubri-refrigerante afetarem a temperatura e a pressão na região de corte (OLIVEIRA, 2008).

2.7.1.1 Abrasão mecânica

A abrasão mecânica é uma das principais causas de desgaste de ferramentas. Tanto o desgaste frontal quanto o de cratera podem ser gerados por abrasão. O desgaste gerado pela abrasão está diretamente ligado à presença de partículas duras no material da peça e a temperatura de corte, que reduz a dureza da ferramenta. Quanto maior a dureza a quente da ferramenta, maior sua resistência aos aços de materiais abrasivos. Às vezes, partículas duras arrancadas de outras regiões da ferramenta por aderência ou mesmo por abrasão e arrastadas pelo movimento da peça, causam o desgaste abrasivo em uma área adjacente da ferramenta (DINIZ *et.al.*, 2006).

2.7.1.2 Adesão

Quando duas superfícies metálicas são postas em contato, sob cargas moderadas, baixas temperaturas e baixas velocidades de corte, entre elas forma-se um extrato metálico que provoca a adesão. A resistência desse extrato é elevada, podendo levar a ruptura em um dos metais ao tentar separá-los. Partículas da superfície de um metal migram para a superfície do outro, sendo um exemplo na usinagem a chamada aresta postiça (DINIZ *et.al.*, 2006).

2.7.1.3 Difusão

A difusão consiste na transferência de átomos de um material para o outro, o que causa variações nas propriedades na camada superficial da ferramenta. Estas reações químicas provocam a formação de compostos químicos menos resistentes à abrasão. Para que ocorra o desgaste por difusão são necessários três fatores combinados: elevadas temperaturas na região de contato, afinidade química entre a ferramenta e o material da peça e o tempo de contato (OLIVEIRA, 2008).

A difusão é a responsável pelo desgaste de cratera em altas velocidades de corte, pois na superfície de saída da ferramenta é que se tem a condição necessária para a difusão dos materiais, isto é, alta temperatura (devido a altas velocidades e a zona de aderência) e tempo de contato cavaco-ferramenta (DINIZ *et. al* 2006).

2.7.1.4 Oxidação

A presença de ar, água e altas temperaturas geram oxidação na maioria dos materiais. O tungstênio e o cobalto formam um filme de óxido poroso sobre a ferramenta durante a usinagem, que são facilmente levadas pelo atrito, causando desgaste. O desgaste gerado pela oxidação se forma, normalmente, nas extremidades do contato cavaco-ferramenta devido ao acesso do ar na região (DINIZ *et.al.*, 2006).

2.8 FORÇAS DE USINAGEM

O conhecimento da força de usinagem possibilita estimar a potência do equipamento necessário para a realização do processo e está também relacionada com o desgaste das ferramentas de corte, tornando um fator importante na determinação da usinabilidade de um material. Condições de corte que apresentem uma maior força de usinagem refletem numa maior dificuldade de usinagem do material. Assim, para uma melhor usinabilidade, se faz necessários valores mais baixos dos esforços de corte (CAVALCANTE, 2010).

Segundo Machado (2006), ao se aumentar a velocidade de corte as forças de usinagem diminuem, produzindo um melhor acabamento da superfície. Para materiais considerados dúcteis, esta melhoria é rápida até certa velocidade crítica, devido à contínua redução das dimensões da aresta postiça de corte (APC). Sabe-se que os ferros fundidos cinzento e maleável produzem cavacos curtos e estão propensos à formação da APC quando usinados sob baixas velocidade de corte, favorecendo o desenvolvimento do desgaste de flanco na ferramenta através do mecanismo da abrasão. Por isso recomenda-se trabalhar com velocidades de corte mais elevadas e empregar fluido refrigerante de forma abundante.

A usinagem pode ser considerada dependente de dois fatores principais (TRENT, 1984):

- a) Área dos planos de cisalhamento primário e secundário;
- b) Resistência ao cisalhamento do material da peça no plano de cisalhamento primário e secundário.

Qualquer parâmetro que afete esses fatores terá um efeito direto sobre as forças de usinagem. Os principais são: material da peça e da ferramenta; geometria da ferramenta; desgaste da ferramenta; lubrificação; refrigeração; velocidade de corte; avanço; profundidade de corte. Pode-se afirmar que todos os parâmetros que contribuem para a movimentação livre do cavaco por sobre a superfície de saída da ferramenta, atuam no sentido de diminuir a força de usinagem e vice-versa.

Durante o corte, uma broca helicoidal é submetida a esforços de torção devido à rotação da broca e a esforços de compressão, devido ao avanço da ferramenta. Deste modo, para determinar os esforços de um processo de furação, calcula-se o

momento torsor e a força de avanço. O momento torsor pode ser medido diretamente através de um dinamômetro na peça ou na ferramenta (DINIZ *et.al.*, 2006).

A figura 2.22 mostra a distribuição de forças de usinagem envolvidas no processo de furação, atuando em cada aresta da ferramenta. Sendo F_c a força de corte, F_f a força de avanço e F_p a força passiva.

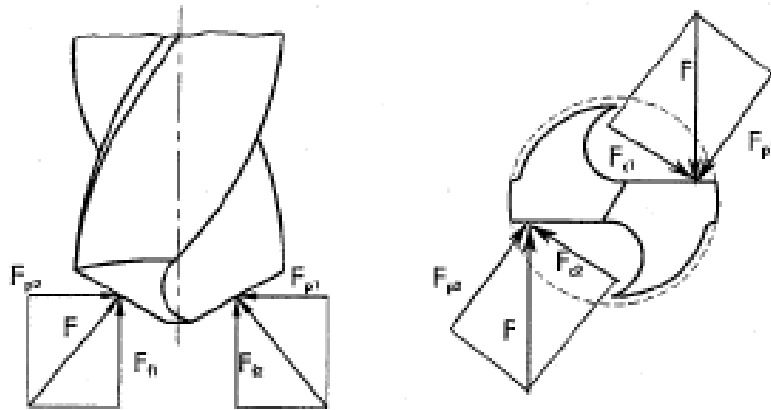


Figura 2.22 – Forças atuantes nas arestas principais de corte.

Fonte: (STEMMER, 2005)

As determinações das forças de usinagem, durante o processo, podem ser medidas através de sistemas com transdutores de força, aplicando o princípio piezoelétrico que produz uma carga elétrica proporcional à aplicação de uma força no cristal. A determinação da força de corte com a utilização de dinamômetros pode se tornar inviável quando a usinagem é realizada em linhas de produção seriada, apresentando dificuldades de adaptação e controle do equipamento durante a realização do processo, (CAVALCANTE, 2010).

2.9 TENSÕES RESIDUAIS

Tensões residuais são aquelas que permanecem no componente mesmo depois de cessadas as forças externas anteriormente aplicadas sobre ele. Este estado de tensões é auto equilibrante e, portanto, a resultante das forças e de momentos que as tensões residuais produzem é zero (SOARES, 1998).

As tensões residuais podem ser introduzidas deliberadamente ou de forma acidental durante os diversos processos de fabricação tais como soldagem,

tratamentos térmicos, nas operações de conformação mecânica de forjamento, trefilação, laminação, dobramento e nos processos mecânicos de usinagem ou jateamento de partículas (SOARES, 1998).

As tensões residuais são comumente classificadas em três tipos principais (SOARES, 1998):

a) Tensões residuais do tipo 1: são também chamadas de macroscópicas ou macro tensões residuais, e se estendem ao longo do componente por vários grãos. As macro tensões residuais são provenientes de condições ou fontes mecânicas, térmicas ou químicas que afetam volume considerável do material estendendo-se por área comparável às dimensões do equipamento. Estas tensões permanecem equilibradas em todo o corpo e têm sua origem em deformações plásticas macroscópicas.

b) Tensões residuais do tipo 2: comumente chamadas de tensões microestruturais, estão presentes em um grão ou numa parte deste, estando equilibradas em alguns grãos vizinhos e tendo sua origem em deformações plásticas microscópicas.

c) Tensões residuais do tipo 3: chamadas de tensões micro localizadas, estendem-se por pequenas distâncias interatômicas, dentro de uma pequena porção de um grão, estando também equilibradas em uma pequena parte do grão e tendo sua origem em defeitos cristalinos, particularmente discordâncias.

As tensões residuais do tipo 2 e 3 são consideradas microtensões, que não podem ser evitadas em materiais policristalinos, e são mais importantes para o estudo do comportamento micro estrutural. As tensões residuais do tipo 1 são particularmente importantes em engenharia para análise estrutural em componentes, uma vez que podem comprometer ou aumentar a vida útil de um equipamento (SOARES, 1998).

Operações de usinagem como corte, fresagem, furacão, torneamento e retifica, podem introduzir tensões residuais trativas ou compressivas, dependendo do material e das condições de usinagem tais como velocidade de corte, refrigerante e ferramenta utilizada. Estas tensões residuais têm sua origem na pressão exercida pela ferramenta e no aquecimento localizado, que gera tensões residuais (SOARES, 1998).

2.10 DIFRAÇÃO DE RAIOS X

Conforme definição de Cofino (2010), a difração é um fenômeno de espalhamento de radiação eletromagnética por um arranjo periódico de centros de

espalhamento, com espaçamento da mesma ordem de magnitude do comprimento de onda da radiação incidente.

A difração de raios-X é, atualmente, o método não destrutivo mais utilizado para medição de tensão residual. Nesse método, comparam-se as deformações nos cristais policristalinos de um material com os parâmetros de rede do cristal do mesmo material, sem deformação.

Ao direcionar um feixe de raios-X para superfície de um corpo, uma parte dos raios é absorvida pelos átomos enquanto outra parte é enviada de volta em todas as direções da área irradiada. Através desse método, mede-se a intensidade máxima de raios difratados para um determinado ângulo de varredura. Assim é possível mensurar o espaçamento interplanar dos planos de difração. A figura 2.23 representa, esquematicamente, um sistema com difração de raio-X (SOUSA, 2012).

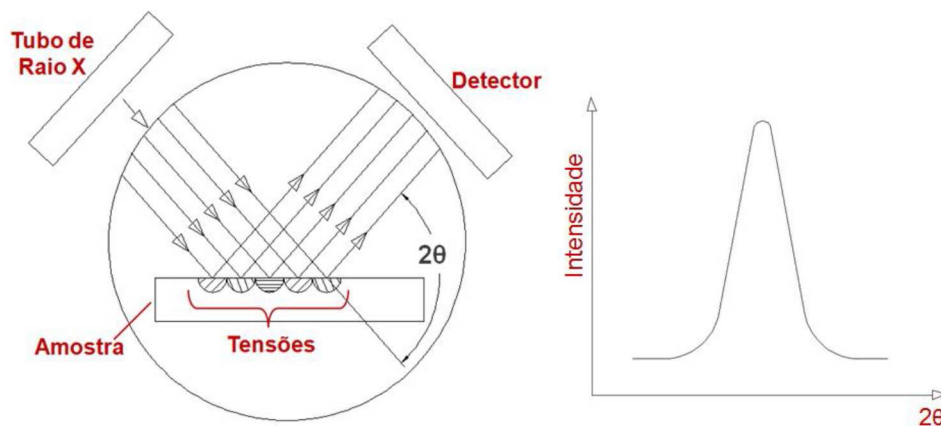


Figura 2.23 – Incidência dos raios X sobre a amostra. Intensidade do raio difratado para um determinado 2θ

Fonte: (SOUSA, 2012).

A irradiação de um material cristalino, por feixes de raios-X monocromáticos com comprimento de onda λ , proporciona um espalhamento dos feixes pelos átomos que compõem o material. Um feixe difratado pode ser definido como um feixe composto de um grande número de raios espalhados reforçando-se mutuamente. As ondas espalhadas tendem a interferir entre si de modo similar à difração de luz visível, de acordo com a distribuição regular dos átomos no material. A Figura 2.24 representa a difração dos raios-X (CALLISTER, 2007).

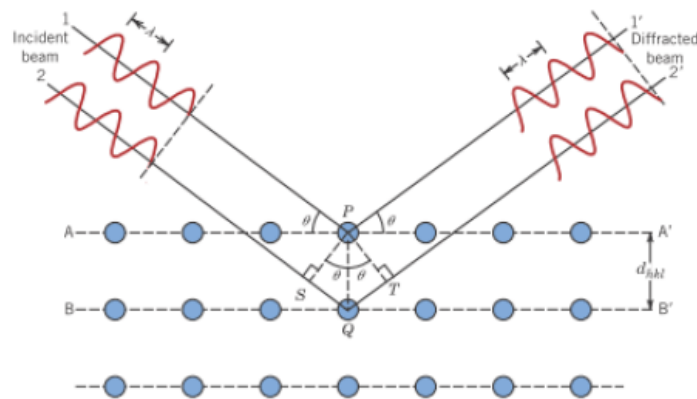


Figura 2.24 – Representação dos Raios-X difratados pelos planos AA' e BB'

Fonte: (CALLISTER, 2007)

O ângulo formado pela direção de incidência dos raios-X e o ângulo do raio difratado é designado como 2θ , sendo a metade deste ângulo o ângulo de Bragg. Mais precisamente, as condições de difração são expressas pela equação de Bragg (Eq 1.0):

$$n\lambda = 2d \cdot \sin(2\theta) \quad (\text{Eq 1.0})$$

Onde $n = 1, 2, 3, \dots$ denota a ordem da difração, λ é o comprimento de onda do raio X e d é a distância interplanar do cristal. Portanto, qualquer mudança na distância interplanar implica na mudança do ângulo de difração. Esta difração ocorre a partir de uma fina camada superficial que é cerca de $20 \mu\text{m}$. Se a superfície está sobre compressão, então o espaçamento interplanar " d " é maior do que no estado livre de stress, como resultado do efeito de Poisson (ANDEROGLU, 2004).

Quando é feita a varredura da superfície de um material utilizando esse método, é obtido um espectro que mostra os picos de difração os quais são característicos para cada material, conforme pode ser visto na figura 2.25.

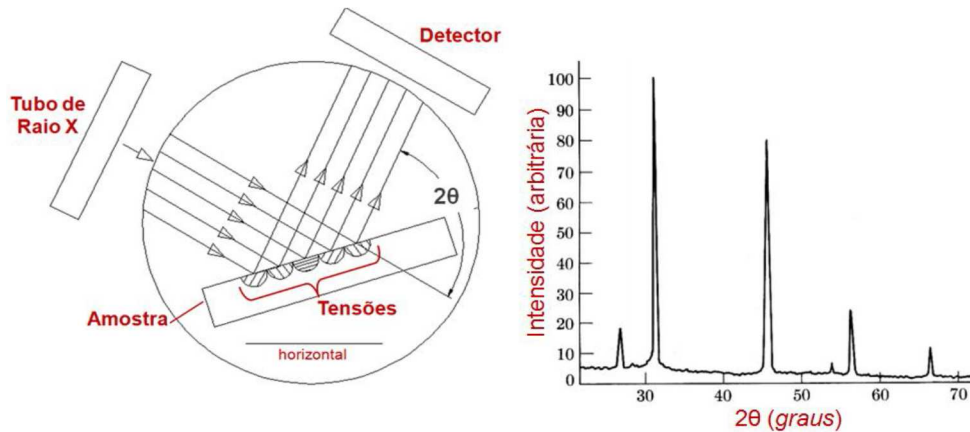


Figura 2.25 – Varredura da superfície da amostra

Fonte: (SOUSA, 2012)

Comparando os picos de um mesmo material, um sem deformação e o outro com deformação plástica, os picos do material deformado poderá aparecer de diversas formas. Para ângulos maiores, a distância interplanar é menor quando comparado com o material sem deformação plástica, apresentando tensão residual de compressão. No caso de ângulos menores, a distância interplanar será maior, gerando tensões residuais trativas, conforme representado na figura 2.26 (SOUSA, 2012).

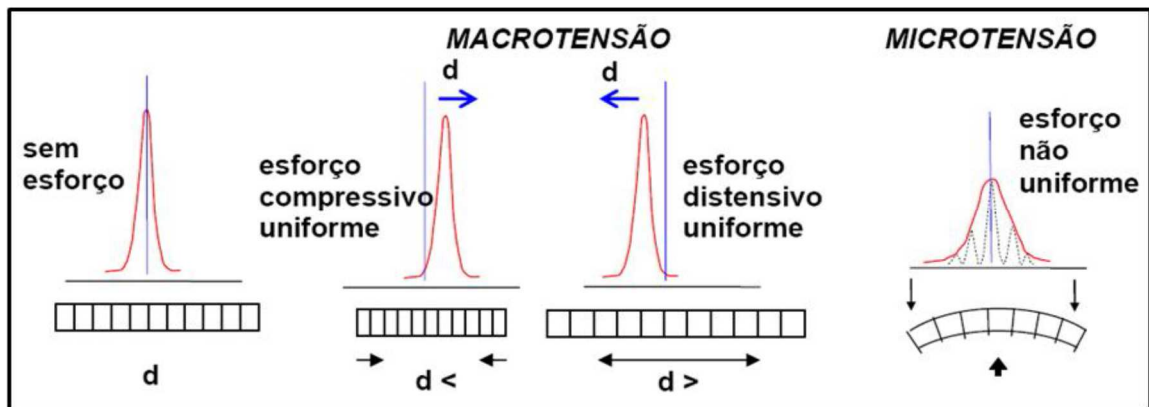


Figura 2.26 - Deslocamento dos picos de difração quando comparados com material sem deformação.

Fonte: (SOUSA, 2012)

Então, lendo-se o ângulo de difração pode-se estimar o valor da deformação do cristal e o valor da tensão residual existente naquela região do corpo. Este será o método aplicado para mensurar as tensões residuais geradas nos furos usinados nos ensaios práticos do presente trabalho.

3 MÉTODOS, MATERIAIS E EQUIPAMENTOS

Neste capítulo será apresentada uma descrição dos métodos, materiais e equipamentos utilizados na realização dos experimentos práticos, assim como a metodologia aplicada.

A estrutura do estudo inicia-se com a definição dos requisitos de qualidade e produtividades esperados para estabelecer os critérios de validação dos resultados e a análise comparativa entre as ferramentas testadas. Em seguida, é feita a caracterização do material utilizado, conhecendo as características que possam influenciar na usinabilidade do ferro fundido cinzento GG30. Após, as ferramentas são apresentadas, descrevendo os materiais e as geometrias com as quais foram fabricadas. O método experimental é estabelecido, definindo os parâmetros de corte utilizados e as rotinas de usinagem a serem seguidas. Por fim, é feita uma descrição do centro de usinagem utilizado nos ensaios e os equipamentos empregados para medição de rugosidade, forças de usinagem, tempo de ciclo e tensões residuais.

Nesta etapa, o objetivo é a obtenção de dados e informações que permitirão a análise dos processos de furação por brocas alargadoras e alargamento convencional, com foco nas condições físicas dos furos obtidos e na produtividade atingida.

3.1 DEFINIÇÃO DOS REQUISITOS DE QUALIDADE E PRODUTIVIDADE

Para estabelecer critérios comparativos entre os processos testados, foram definidos requisitos de qualidade e produtividade a serem atingidos na usinagem. O relatório da visita à Montadora, apresentado no Anexo A, foi utilizado como referência para a escolha. O referencial teórico apresentado e a experiência prática do fabricante das ferramentas também serviram de apoio para esta determinação de critérios.

A lista segue também a ordem de importância de cada requisito nos critérios comparativos.

1. Rugosidade = Máxima 0,8 Ra
2. Tempo de ciclo = Máximo 10 segundos

3. Tensão Residual = Máxima 800 MPa (limite de resistência à tensão de compressão do material)
4. Forças de usinagem = Monitoramento da geometria da ferramenta que exerce maior esforço de avanço na usinagem.

3.2 CARACTERIZAÇÃO DA AMOSTRA

O material utilizado na pesquisa foi o Ferro Fundido Cinzento GG30 fornecido pela empresa Fundição Tupy. Esse material é o mesmo utilizado na fabricação de blocos de motores além de diversas aplicações na indústria em geral. As amostras possuem 208 mm de diâmetro por 40 mm de espessura.

3.1.1 Ensaio de dureza

O primeiro passo para conhecer as condições de usinabilidade do ferro fundido utilizado foi a medição da dureza. O ensaio de dureza foi realizado no laboratório de materiais da Universidade Tecnológica Federal do Paraná, utilizando o durômetro da marca EMCO-TEST M4C 025 GM3 conforme fotografia apresentada na figura 3.1.



Figura 3.1 – Durômetro EMCO-TEST M4C 025 GM3

Fonte: O autor

O corpo de prova foi submetido à medição de dureza para avaliação de sua resistência mecânica, com resultados expressos na escala Brinell. Durante o procedimento, foi utilizada uma esfera de 2,5mm com 187.5 Kgf de carga aplicada. A figura 3.2 apresenta os pontos determinados para medição da dureza.



Figura 3.2 – Amostra para Ensaio de Dureza

Fonte: O autor

Foram definidos nove pontos para o ensaio em uma sequência do centro para a periferia da amostra. Considerando que haja uma diferente taxa de resfriamento no material fundido, a microestrutura do centro do tarugo tende a ser diferente da microestrutura das regiões periféricas (MARMENTINI, 2009). Essas variações microestruturais podem afetar as condições de usinagem do material.

Em cada ponto, foram realizadas três medições de dureza, somando 27 medições por peça, sendo analisadas quatro amostras. Desta forma, pode-se observar a diferença de dureza ocasionada pela diferente taxa de resfriamento do centro da barra para a periferia.

3.2.2 Metalografia do material

Seguindo a norma ASTM E3-11 (2003), foram conduzidos ensaios metalográficos para caracterização do material. Para avaliar essas características, as amostras foram obtidas conforme a figura 3.3, seguindo o mesmo critério do ensaio de dureza, com amostras retiradas da região central até a periferia.

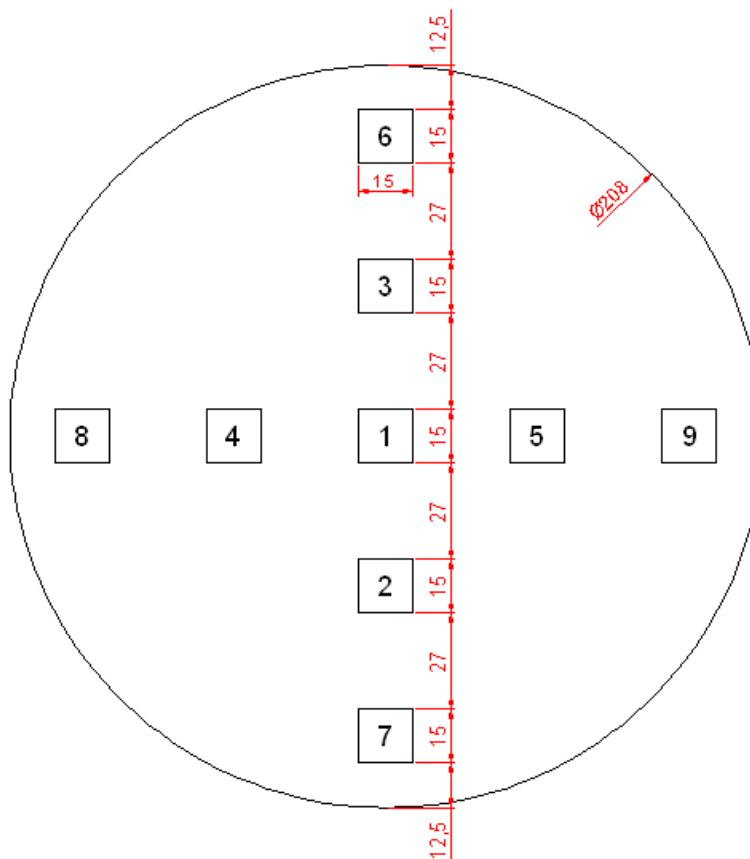


Figura 3.3 – Amostras para Ensaios Metalográficos







Fonte: O autor

Seguindo as posições definidas no ensaio de dureza, nove amostras de aproximadamente 15mm x 15mm foram cortadas e identificadas sequencialmente do centro para a periferia e submetidas aos ensaios de metalografia.

O ensaio metalográfico foi realizado no laboratório de materiais da Universidade Tecnológica Federal do Paraná e pode ser resumido conforme tabela 3.1.

Tabela 3.1 – Sequência de atividades no ensaio metalográfico

Fonte: O autor

		
a) Corte das Amostras	b)Embutimento das Amostras	c) Amostra Embutida
		
d) Lixamento da Amostras	e) Polimento das Amostras	f) Análise no Microscópio

A figura a) apresenta o corte das amostras feito em uma serra com disco abrasivo; b) mostra a máquina de embutimento na qual as amostras foram embutidas; c) apresenta a amostra já embutida; d) a lixadeira na qual as amostras passaram por lixamento sequencial com quatro granulometrias diferentes (lixa 220, 320, 600 e 1200); e) apresenta a politriz em que as amostras foram polidas com pasta de diamante; f) apresenta o microscópio Olympus BX51M em que as microestruturas das amostras foram analisadas.

3.3 FERRAMENTAS DE USINAGEM

Após conhecer as características do material, quatro tipos de ferramentas foram produzidas para aplicação nos testes práticos: i) broca com dois gumes de corte; ii) alargador com seis gumes de corte; iii) broca alargadora com quatro gumes de corte; iv) broca alargadora com seis gumes de corte.

As ferramentas foram fornecidas pela empresa Ferramentas Sartori LTDA (FerSart). Todas foram produzidas com o material em Metal Duro K40, classe de boa tenacidade indicada para usinagem de materiais frágeis e que formam cavaco curto

(assim como o ferro fundido), pois não são resistentes ao mecanismo de desgaste por cratera, e ao sofrerem uma pequena deformação já se rompem (DINIZ *et.al.*, 2006).

Foram aplicadas a todas as ferramentas o revestimento nitreto de titânio e alumínio (TiAlN) sendo esse o revestimento indicado pelo fornecedor da ferramenta, comum para aplicação em ferro fundido.

A máquina operatriz na qual serão realizados os ensaios não comporta aplicação de ferramentas com refrigeração interna, portanto as ferramentas serão fabricadas a partir de um *blank* maciço e a refrigeração será por inundação.

A seguir, as ferramentas serão descritas detalhadamente.

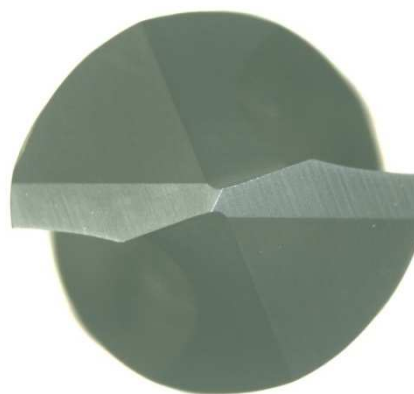
3.3.1 Broca convencional com dois gumes de corte

Sua geometria de corte conta com dois gumes de corte, sendo canais helicoidais a 30°. Considerando uma broca para executar um pré-furo no processo de alargamento, seu diâmetro foi de 9,7mm, seguindo o valor de sobremetal proposto na literatura (STEMMER, 2005).

Para a afiação da ponta, foi utilizada uma broca com afiação em cruz, sendo esta uma afiação, sugerida pelo fabricante por ser comum para usinagem de ferro fundido cinzento, com possibilidade de reafiações mais acessíveis. A figura 3.4 apresenta a broca que foi utilizada (a) e sua respectiva afiação (b).



a- Layout da broca



b- Tipo de afiação

Figura 3.4 – Broca Helicoidal em Metal Duro

Fonte: O autor

3.3.1. Alargador com seis gumes de corte

Sua geometria conta com seis gumes de corte, ângulo de entrada de 45° e canais retos, sugerida por Ferreira (2011) para operações de maior precisão. O diâmetro foi de 10mm.

Conforme estudo de Almeida (2008), o alargador apresenta melhores resultados na usinagem de ferro fundido com sobremetal na ordem de 0,25mm e guias cilíndricas da ferramenta com 0,1mm de espessura. Portanto, o alargador do teste foi fabricado com guias cilíndricas de 0,1mm e o sobremetal, já definido pela broca convencional que realizou o pré-furo, foi de 0,3mm seguindo recomendações de Stemmer (2005), para a usinagem de ferro fundido.

A figura 3.5 mostra o alargador que foi utilizado nos testes (a) e sua respectiva afiação de topo (b).



a- Layout do Alargador

b- Tipo de afiação

Figura 3.5 – Alargador Canais Retos em Metal Duro

Fonte: O autor

3.3.2 Broca alargadora com quatro gumes de corte

Sua geometria conta com quatro gumes de corte, com canais helicoidais a 30° . O diâmetro foi de 10mm e a afiação de ponta em cruz, sendo a mesma afiação da broca convencional de dois gumes. A figura 3.6 mostra a broca alargadora que foi utilizada nos testes (a) e sua respectiva afiação (b).



a- Layout da broca

b- Tipo de afiação

Figura 3.6 – Broca Alargadora com Quatro Gumes de Corte em Metal Duro

Fonte: O autor

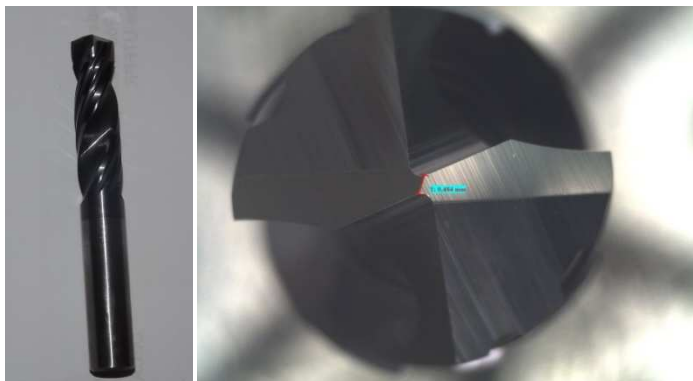
Diferentemente da broca de dois gumes, a broca alargadora de quatro gumes conta com diâmetro de 9,7 milímetros, nos primeiros cinco milímetros de seu comprimento, e então passa a ter um diâmetro escalonado de 10 milímetros. Esse escalonado, também chamado pelos fabricantes de piloto, é característico para essa família de ferramentas, sendo o mesmo responsável pela furação e alta remoção do cavaco, deixando o acabamento do furo para os canais que formam o diâmetro de 10 milímetros. A figura 3.7 mostra a fotografia da medição da guia cilíndrica para broca alargadora de quatro cortes, esclarecendo a existência de um diâmetro escalonado.

**Figura 3.7 - Diâmetro escalonado da broca alargadora com quatro gumes**

Fonte: O autor

3.3.3 Broca alargadora com seis gumes de corte

Sua geometria conta com seis gumes de corte, com canais helicoidais a 30°. Os diâmetros foi de 10mm e a afiação de ponta em cruz, sendo a mesma afiação da broca convencional de dois gumes. A figura 3.8 mostra a broca alargadora que foi utilizada nos testes (a) e sua respectiva afiação (b).



a- Layout da broca b- Tipo de afiação

Figura 3.8 – Broca Alargadora com Seis Gumes de Corte em Metal Duro

Fonte: O autor

Assim como na broca alargadora com seis gumes, a broca alargadora de seis gumes conta com um diâmetro de 9,7 milímetros, nos primeiros cinco milímetros de comprimentos, e então passa a ter um diâmetro de 10 milímetros. A figura 3.9 mostra a fotografia da medição da guia cilíndrica para broca alargadora de seis gumes, esclarecendo a existência de um diâmetro escalonado.

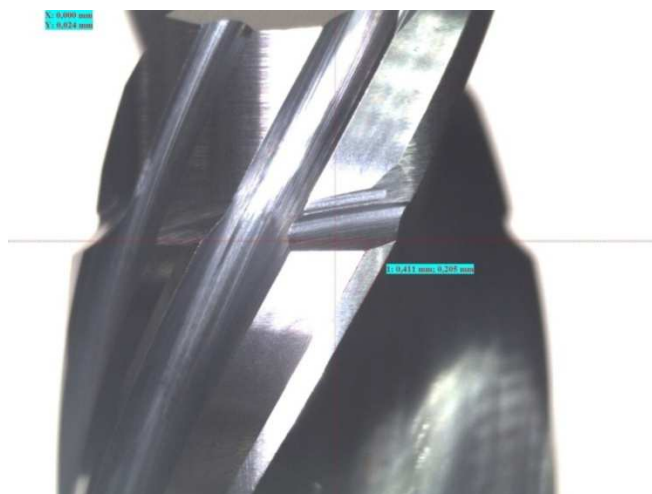


Figura 3.9 – Diâmetro escalonado da broca alargadora com seis gumes de corte

Fonte: O autor

3.4 PLANEJAMENTO DO EXPERIMENTO

Conhecendo os recursos disponíveis para os testes práticos, iniciou-se o planejamento experimental definindo o *layout* de usinagem das amostras. A usinagem foi realizada nas duas faces da peça, com nove furos em cada região (central, intermediária e periférica), totalizando 27 furos por face.

O projeto de furação das amostras pode ser observado na figura 3.10.

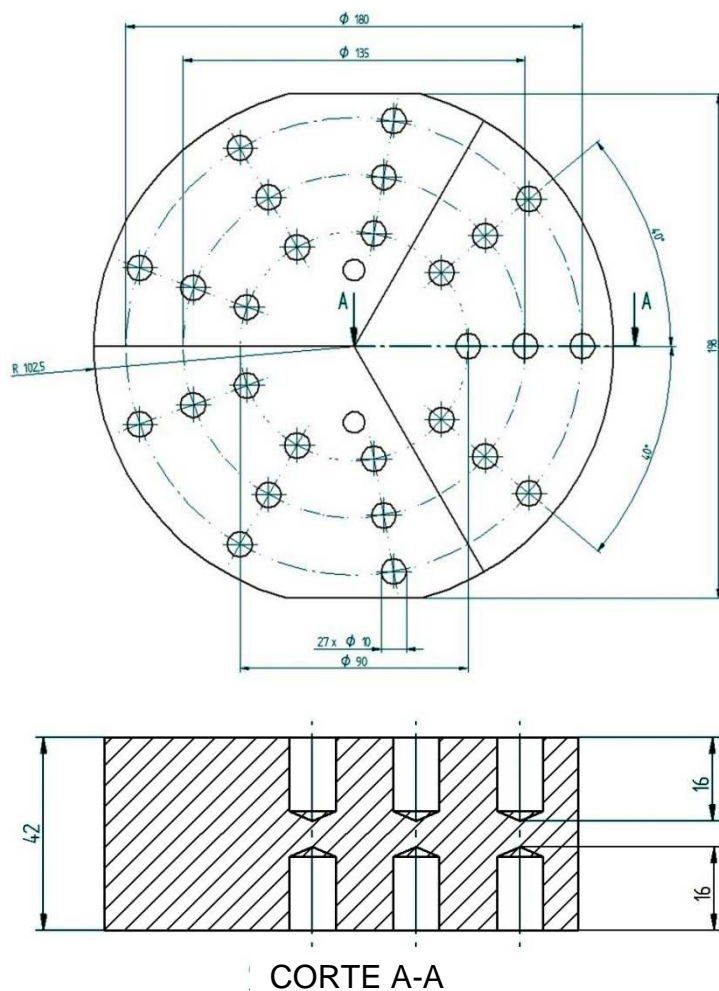


Figura 3.10 – Projeto de furação das amostras de Ferro Fundido Cinzento

Fonte: O autor

3.4.1 Planejamento do processo de furação com brocas alargadoras e broca convencional

Foram definidas como variáveis de controle a velocidade de corte e o avanço das ferramentas aplicadas na usinagem. Para as ferramentas da família das brocas foram testadas três variações para cada parâmetro, sendo estes escolhidos através ensaios preliminares e respeitando os parâmetros máximos indicados pelo fornecedor das ferramentas (100 m/min de velocidade de corte e 0,4 mm/rot de avanço).

A tabela 3.2 apresenta as combinações de parâmetros de corte aplicadas.

Tabela 3.2. Combinações de parâmetros de corte para ensaio de furação.

Ensaio	VC (m/min)	Avanço (mm/rot)	Furos
1	80	0,1	3
2	80	0,2	3
3	80	0,4	3
4	90	0,1	3
5	90	0,2	3
6	90	0,4	3
7	100	0,1	3
8	100	0,2	3
9	100	0,4	3

O cruzamento das variáveis de controle resultou em nove ensaios diferentes, nos quais cada broca usinou 27 furos, uma face da amostra por ferramenta, obtendo-se 0,43 metros lineares (27 furos com 16mm de profundidade) para cada ferramenta, somando um total de 1,3 metros lineares (81 furos de 16mm de profundidade) na usinagem das três brocas. A figura 3.11 apresenta layout de furação, no qual a amostra foi dividida em três grandes seções.

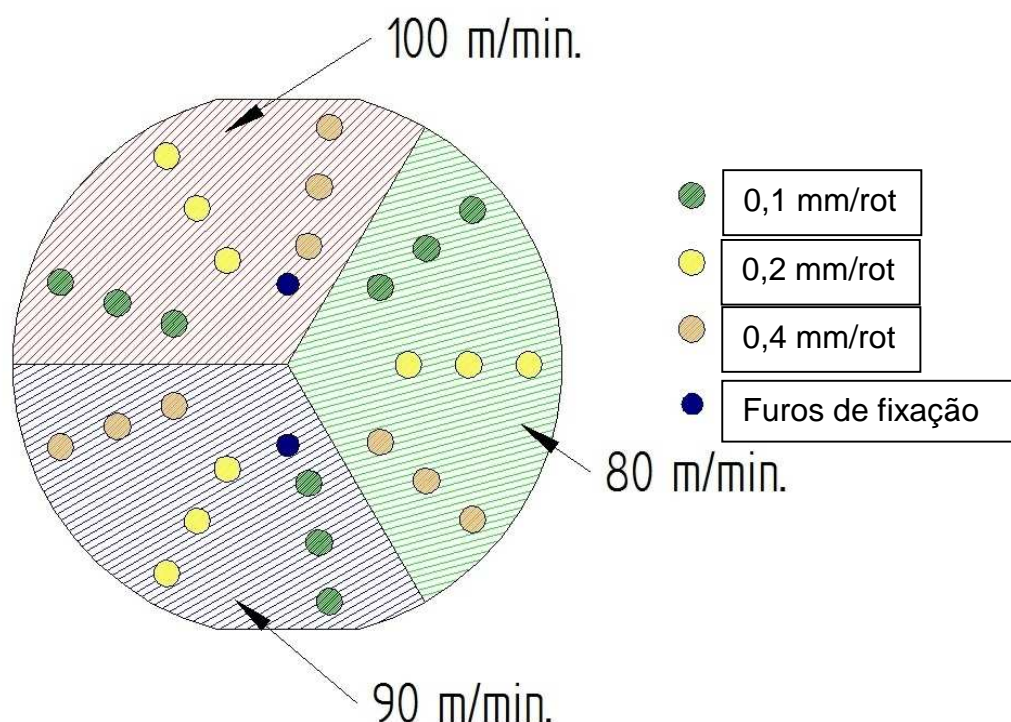


Figura 3.11 – Layout da amostra no ensaio de furação

Fonte: O autor

3.4.2 Planejamento do processo de alargamento

Os testes com o alargador seguiram a mesma sistemática variando o avanço e a velocidade de corte com três parâmetros diferentes, estando estes apresentados na tabela 2.

Bezerra (1998) conseguiu baixos valores de rugosidade utilizando avanços de 0,1 mm/rot, na usinagem de um liga de Alumínio-Silício. Ohgoet al. (1979) obteve melhor acabamento do furo ao diminuir o avanço de 0,25 mm/rot para 0,065 mm/rot, na usinagem de ferro fundido cinzento. Observou também que a velocidade de corte, ao passar de 8 m/min para 40 m/min, teve pouca influência na rugosidade e tolerância dimensional dos furos.

Portanto, considerando a intenção de se obter baixa rugosidade, entende-se, pela literatura estudada, que o avanço é o parâmetro de corte com maior influência nessa operação. Seguindo as referências de estudos anteriores em conjunto com a

orientação do fabricante das ferramentas, determinaram-se valores de avanços baixos, e uma variação mais ampla na velocidade de corte.

A tabela 3.3 apresenta as combinações de parâmetros de corte aplicadas, nos testes com o alargador.

Tabela 3.3. Combinações de parâmetros de corte para ensaio de alargamento.

Fonte: O autor

Ensaio	Broca convencional		Alargador		Furos
	VC (m/min)	Avanço (mm/rot)	VC (m/min)	Avanço (mm/rot)	
1	100	0,2	30	0,08	3
2	100	0,2	30	0,11	3
3	100	0,2	30	0,15	3
4	100	0,2	50	0,08	3
5	100	0,2	50	0,11	3
6	100	0,2	50	0,15	3
7	100	0,2	60	0,08	3
8	100	0,2	60	0,11	3
9	100	0,2	60	0,15	3

Anterior à usinagem com o alargador foram realizados pré-furos com a broca de dois gumes de corte utilizando a combinação de parâmetros de corte que obteve os melhores resultados de rugosidade para esta ferramenta, conforme será apresentado no capítulo 4. Esses parâmetros foram fixados em 0,2 mm/rot de avanço e 100 m/min de velocidade de corte.

Assim como no ensaio das brocas, o cruzamento das variáveis de controle resultou em nove ensaios diferentes, nos quais o alargador usinou 27 furos, obtendo-se 0,43 metros lineares (27 furos com 16mm de profundidade). A figura 3.12 apresenta layout de alargamento, no qual a amostra foi dividida em três grandes seções.

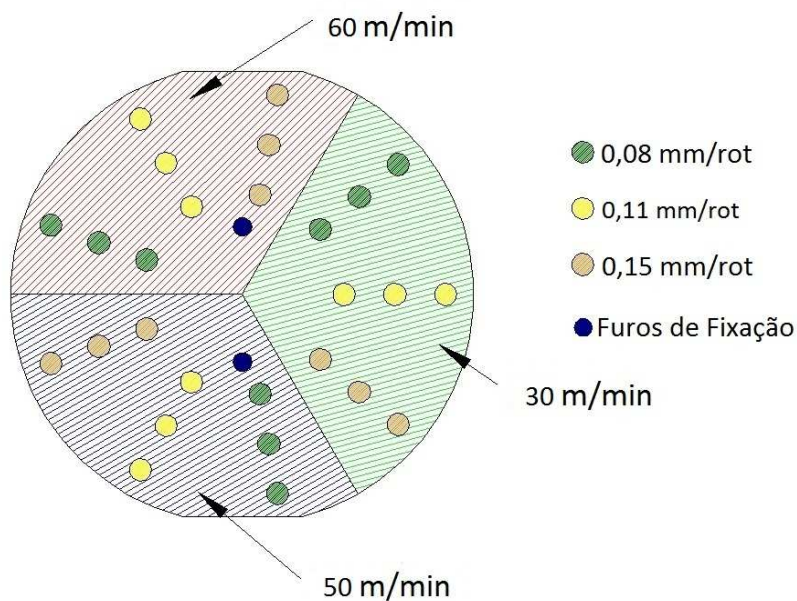


Figura 3.12 – Layout da amostra no ensaio de Alargamento

Fonte: O autor

Para realização de todos os testes foram produzidos 108 furos com 16 mm de profundidade, totalizando 1,73 metros lineares usinados, consumindo duas amostras do ferro fundido GG30 de 208 mm de diâmetro por 40 mm de espessura, além de um conjunto de ferramentas (uma broca convencional, uma broca alargadora de quatro cortes, uma broca alargadora de seis cortes e um alargador).

A figura 3.13 apresenta uma amostra usinada conforme planejamento descrito no presente capítulo.



Figura 3.13 – Amostra usinada

Fonte: O autor

3.5 MÁQUINA DE USINAGEM

O ensaio de furação foi realizado na Empresa Decatec, em um centro de usinagem CNC da marca FANUC ROBODRILL, modelo α -T14iF com quatro eixos. O equipamento possui um sistema de refrigeração com capacidade de 120 litros. O fluido lubri-refrigerante empregado foi uma emulsão de óleo em água onde 5% da mistura foi um óleo sintético e 95% água. O método de refrigeração aplicado foi o de inundação através de dutos direcionados à região de contato entre a ferramenta e a peça. A máquina possui um comando CNC Fanuc 31i e linguagem ISO. A figura 5 mostra a máquina que foi utilizada na usinagem. A figura 3.14 apresenta a fotografia da máquina a ser utilizada.



Figura 3.14 – Centro de usinagem FANUC ROBODRILL utilizado nos ensaios práticos

Fonte: O autor

3.4.1. Dispositivo de fixação

As ferramentas foram montadas em um mandril de fixação hidráulica com um cone ISO BT-30 para garantir a força de aperto e um erro de batimento máximo na ordem de 0,003 mm. Para fixação correta da ferramenta, foi utilizada uma pinça para hastes com diâmetro de 10 mm. A figura 3.15 apresenta o sistema de fixação das ferramentas.

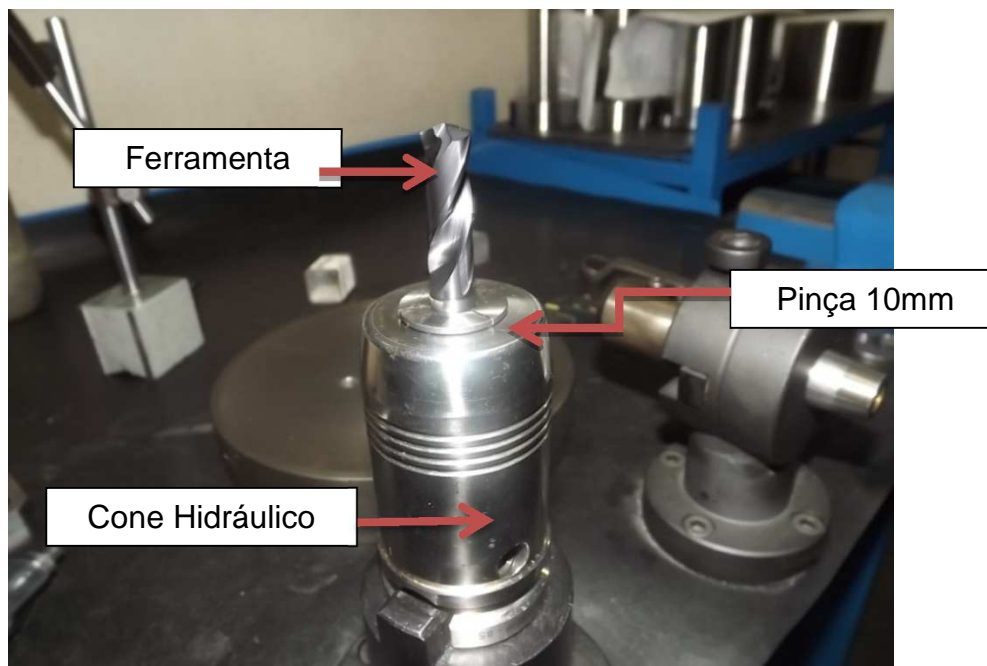


Figura 3.15 – Mandril hidráulico com fixação para diâmetro 10mm

Fonte: O autor

O corpo de prova foi preso à plataforma piezoelétrica por dois parafusos M8, sendo esta presa ao centro de usinagem por morsa. A figura 3.16 apresenta o sistema de fixação da amostra.

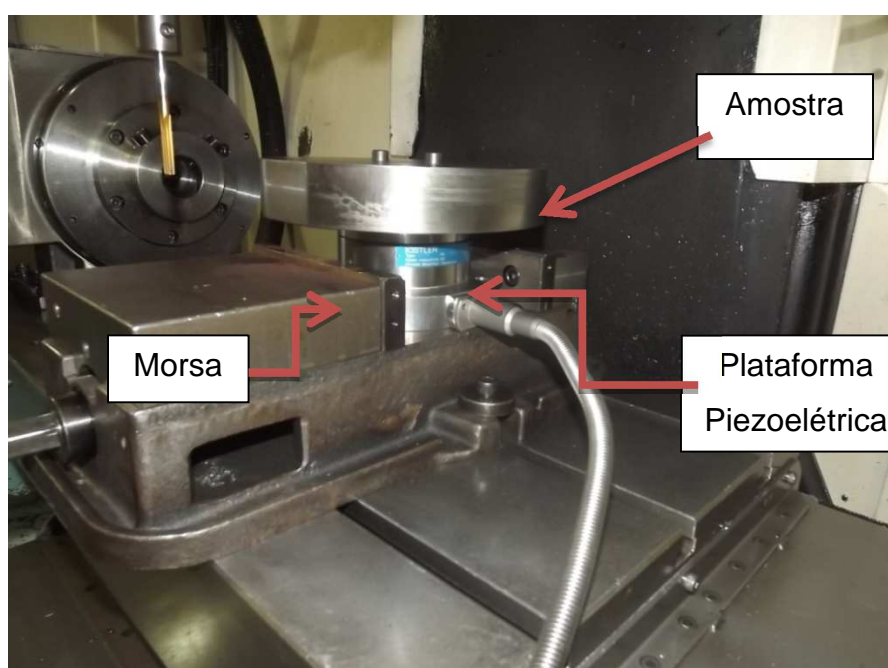


Figura 3.16 – Fixação da amostra ao centro de usinagem

Fonte: O autor

3.6 MEDIÇÕES DURANTE OS ENSAIOS PRÁTICOS

A rugosidade dos furos obtidos na usinagem foi o parâmetro principal para comparar as diferentes geometrias das ferramentas aplicadas bem como as variações nos parâmetros de corte. O parâmetro Ra, o mais comum nas aplicações industriais, foi escolhido como critério comparativo, embora o mesmo possa encobrir imperfeições na superfície. O parâmetro Rt também foi mensurado e considerado como informação de apoio. Além da rugosidade, o tempo de ciclo, as forças geradas no processo de remoção do cavaco e a tensão residual na parede dos furos produzidos também foram avaliados.

3.6.1 Rugosidade

Para a medição da rugosidade foi utilizado um rugosímetro portátil da Taylor Hobson modelo Surtronic 25. Este instrumento possui agulha do apalpador de diamante com raio de ponta de $5\mu\text{m}$, resolução de $0,01\ \mu\text{m}$. Os dados foram compilados através do software Taly Profile Lite, utilizando filtro gaussiano e *cut off* de $0,8\ \text{mm}$. A Figura 3.17 apresenta o equipamento utilizado. Para determinar a rugosidade Ra foram utilizados a média de três valores medidos para cada furo.



Figura 3.17 – Rugosímetro Taylor Hobson modelo Surtronic 25

Fonte: O autor

3.6.2 Medição das forças de avanço

A medição das forças de avanço foi obtida através do sistema de medição de forças de usinagem composto por: uma plataforma piezoelétrica Kistler® modelo 9272A, plataforma piezoelétrica Kistler® 9265B, um amplificador de sinal modelo 5070A da marca Kistler®, uma placa de aquisição de dados modelo USB 6259 BNC da National Instruments, e um microcomputador com software de processamento de sinais Labview. A medição de forças de usinagem foi realizada no sentido do avanço, não sendo apresentados valores para o momento torsor. A figura 3.18 apresenta a ilustração do equipamento utilizado.



Figura 3.18 – Plataforma Piezoelétrica Kistler® modelo 9272^a

Fonte: O autor

A medição das forças de usinagem esta relacionada com o desgaste das ferramentas de corte, a qualidade do furo obtido e a potência do equipamento utilizado.

3.6.3 Tempo de ciclo na usinagem

O tempo de ciclo foi obtido através do comando do centro de usinagem que realizou a usinagem. As medições consideram o tempo total de processo, ou seja, desde o avanço da ferramenta no magazine da máquina até seu retorno à posição inicial. A figura 3.19 mostra o painel da máquina que realizou a usinagem.



Figura 3.19 – Painel do Centro de Usinagem

Fonte: O autor

3.6.4 Medição das tensões residuais

Destaca-se que as tensões residuais geradas na usinagem dos furos foram mensuradas no laboratório de materiais da Universidade Tecnológica Federal do Paraná, através do método de difração de raio X, sendo utilizado o difratômetro da marca Shimadzu modelo XRD-7000. Esse equipamento tem potência de raios X de

3KW, com velocidade de varredura de 0,05 a 25 graus por minuto (θ) e distância dos raios X (eixo) de 85mm (SHIMADZU, 2014). Figura 3.20.

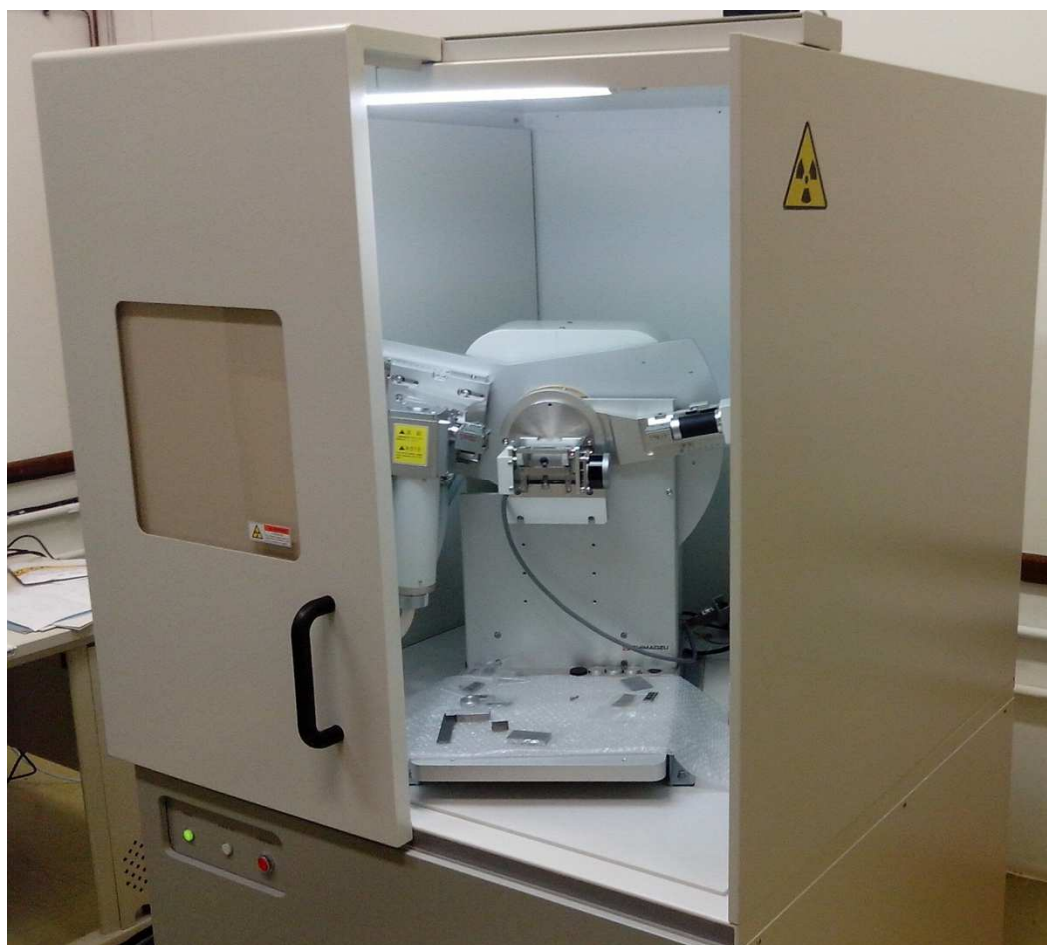


Figura 3.20 – Difratorômetro Shimadzu XRD-7000

Fonte: O autor

Conforme apresentado na seção 2.9 do presente trabalho, somente as tensões residuais do tipo 1 (macrotensões) foram consideradas e mensuradas, já que as tensões do tipo 2 e 3 são inerentes ao processo de fabricação da matéria prima e foram consideradas constantes para todos os ensaios.

As tensões residuais, quando não introduzidas de forma deliberada, são rastros deixados pelos processos de fabricação, assim como a usinagem. Mensurar essas tensões residuais ajudou no entendimento do mecanismo de corte, verificando a influência da severidade na remoção de cavaco em cada processo testado. As tensões residuais também agregam características que podem melhorar ou piorar a resistência e a funcionalidade dos produtos usinados.

Foram analisadas 27 amostras, nove para a broca alargadora de quatro gumes, nove para a broca alargadora de seis gumes e nove para o alargador de seis gumes. Nesse ensaio não foram analisadas amostras com os furos usinados pela broca convencional de dois gumes, pois não atenderam os requisitos mínimos no teste de rugosidade, sendo descartadas deste teste comparativo.

Todas as amostras foram extraídas da região periférica dos tarugos, estabelecendo uma região única para análises comparativas. Foram cortadas pelo processo de eletroerosão a fio com dimensões conforme figura 3.21.

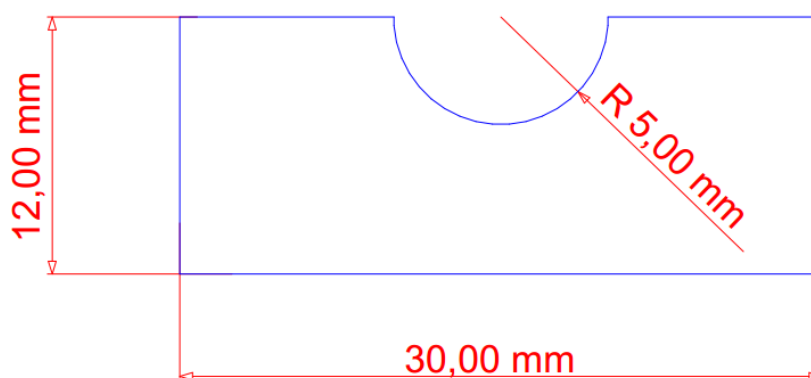


Figura 3.21 – Desenho da amostra para ensaio de tensão residual

Fonte: O autor

A figura 3.22 apresenta a amostra preparada para o ensaio.



Figura 3.22 – Amostra preparada para ensaio de tensão residual

Fonte: O autor

As amostras foram numeradas de 1 a 27, mantendo como referência a geometria das ferramentas e os parâmetros de corte utilizados na usinagem de cada furo. A tabela 3.4 apresenta o plano do ensaio para medição de tensões residuais.

Tabela 3.4 Plano para medição da tensão residual.

Broca de 4 Gumes				Broca de 6 Gumes				Alargador de 6 Gumes			
Amostra	Furo	VC (m/min)	Avanço (mm/rot)	Amostra	Furo	VC (m/min)	Avanço (mm/rot)	Amostra	Furo	VC (m/min)	Avanço (mm/rot)
1	28	80	0,1	10	55	80	0,1	19	82	30	0,08
2	31	80	0,2	11	58	80	0,2	20	85	30	0,11
3	34	80	0,4	12	61	80	0,4	21	88	30	0,15
4	37	90	0,1	13	64	90	0,1	22	91	50	0,08
5	40	90	0,2	14	67	90	0,2	23	94	50	0,11
6	43	90	0,4	15	70	90	0,4	24	97	50	0,15
7	46	100	0,1	16	73	100	0,1	25	100	60	0,08
8	49	100	0,2	17	76	100	0,2	26	103	60	0,11
9	52	100	0,4	18	79	100	0,4	27	106	60	0,15

Dez ângulos Ψ (psi) foram selecionados para compor a base estatística de representação de dados. Foram escolhidos os valores de Ψ entre 0° à $+45^\circ$, variando em 5° de uma medição para outra, conforme o ângulo varia, o pico de difração também sofre alterações, como pode ser visto na figura 3.23, para uma varredura em torno do ângulo de 156° para dez ângulos diferentes.

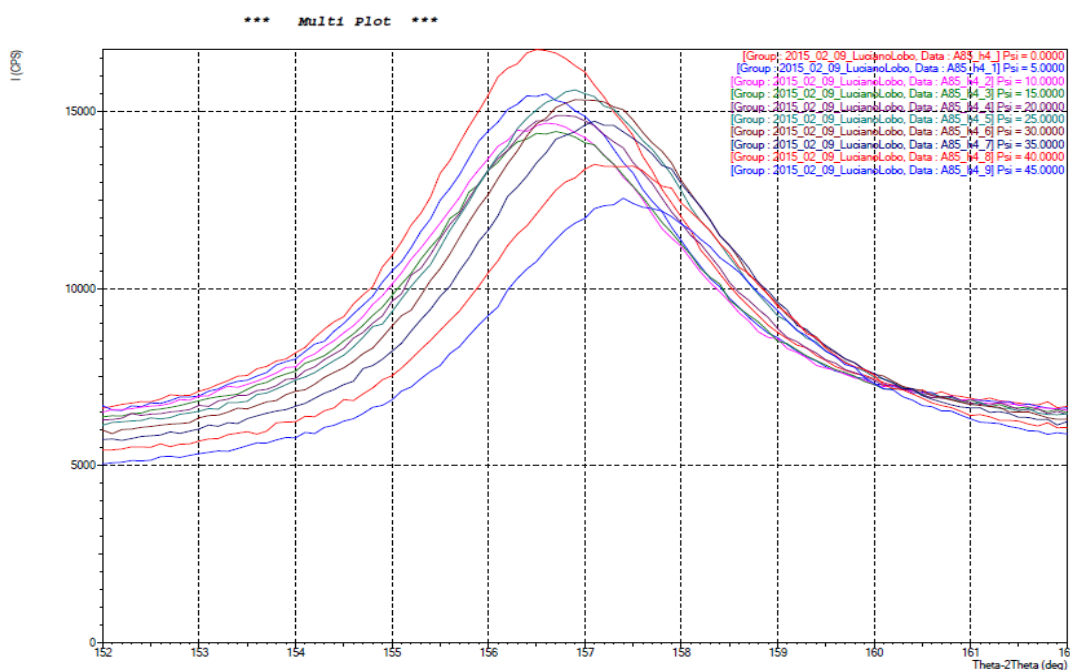


Figura 3.23 – Variação da inclinação do pico (211) de difração do ferro fundido em função da inclinação Ψ da amostra

Fonte: O autor

A figura 3.24 mostra o gráfico gerado pelo software do difratômetro, no qual é calculado o coeficiente angular da reta para determinar a tensão residual. Dez medições de Ψ foram realizadas para compor a reta, produzindo o gráfico $\sin^2\Psi$ vs 2θ .

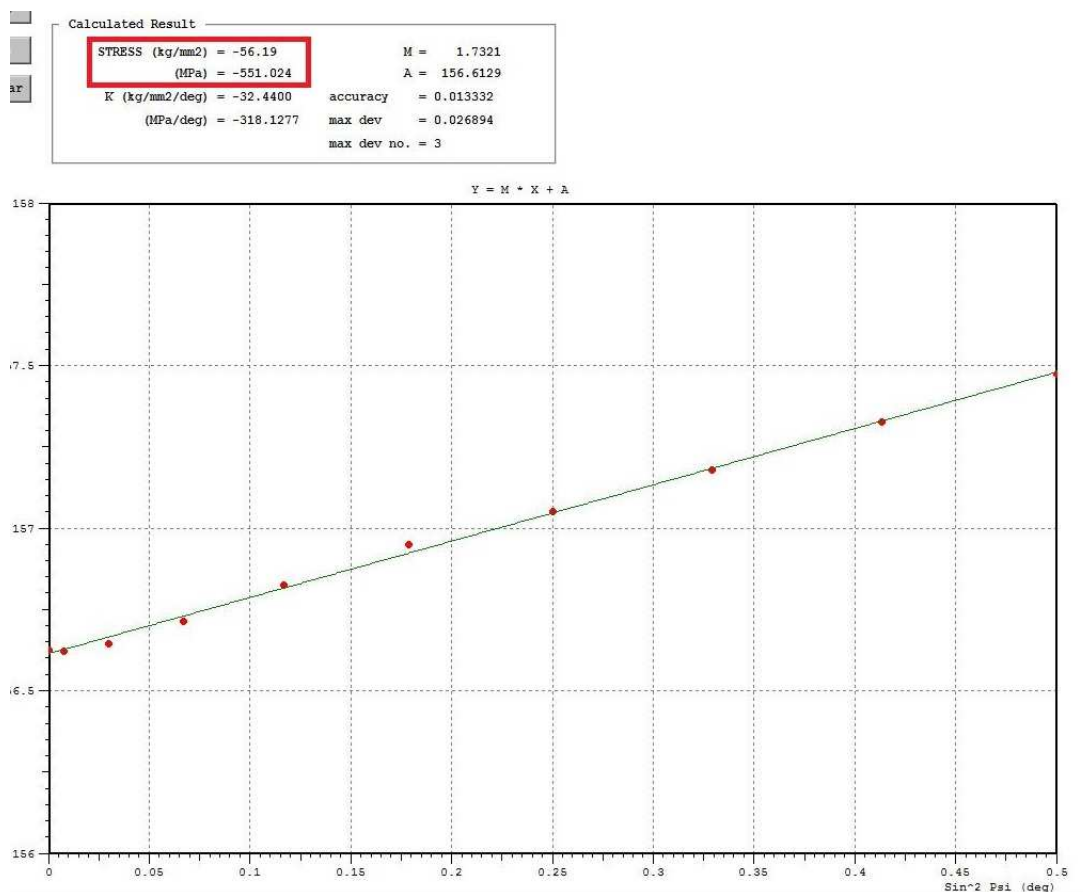


Figura 3.24 – Reto gerado pelo software do difratômetro para cálculo da tensão residual

Fonte: O autor

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Nesta seção serão apresentados os resultados obtidos nos ensaios práticos e as análises decorrentes deste estudo. O capítulo está estruturado de forma a apresentar primeiramente os resultados referentes ao material, com a análise da dureza no item 4.1 e a análise metalográfica no item 4.2. O item 4.3 trará os resultados das medições de rugosidade dos furos, correlacionando com os parâmetros de cortes utilizados. A seguir, são retratados os resultados dos ensaios com forças de usinagem (item 4.4), tempo de ciclo (item 4.5) e tensões residuais (item 4.6). Por fim, no item 4.7, é realizada uma correlação entre os resultados obtidos em todos os ensaios (rugosidade, forças de usinagem, tempo de ciclo e tensões residuais), no qual os desempenhos das ferramentas são analisados e comparados entre si.

4.1 ANÁLISE DA DUREZA

O ensaio conduzido demonstra um aumento significativo na dureza do material no sentido do centro para a periferia da barra. A figura 4.1 mostra a representação gráfica dos valores mensurados.

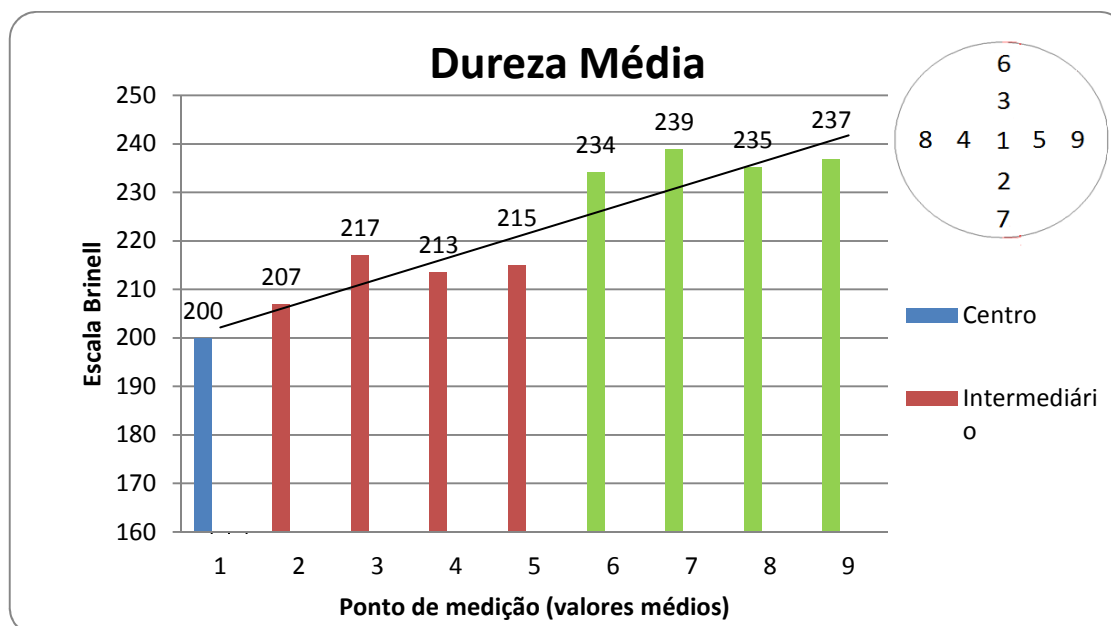


Figura 4.1 – Gráfico da medição de dureza

Fonte: O autor.

Cada ponto é representado pela média das medições realizadas nas quatro amostras. O ponto central, representado pela cor azul, obteve a menor média alcançando o valor de 200 Brinell. Os pontos intermediários, representados pela cor vermelha, tiveram variação de 207 a 217 Brinell. Enquanto os pontos da região periférica da barra, representados pela cor verde, foram os que obtiveram maior valor de dureza, variando de 234 a 239 Brinell. Há uma tendência de aumento de dureza, com variação aproximada de 16% entre o centro, região menos dura, para a periferia, região mais endurecida.

4.2 ANÁLISE METALÓGRAFICA DO FERRO FUNDIDO CINZENTO GG30

A análise metalográfica do material apresenta a diferença na fração volumétrica de grafita de acordo com a região da barra. As nove amostras foram preparadas e fotografadas em microscópio com lente de aumento de 100 vezes. A figura 4.2 apresenta a fotografia da estrutura do material na região central (amostra número 1).



Figura 4.2: Região central da amostra

Fonte: O autor

A imagem apresenta uma estrutura com matriz 100% perlítica e grafitas lamelares, e fração volumétrica de 11,12% de grafita e 88,88% de perlita, com variação de mais ou menos 1%.

A região intermediária é representada na imagem 4.3, obtidas através das amostras de números 2, 3, 4 e 5.

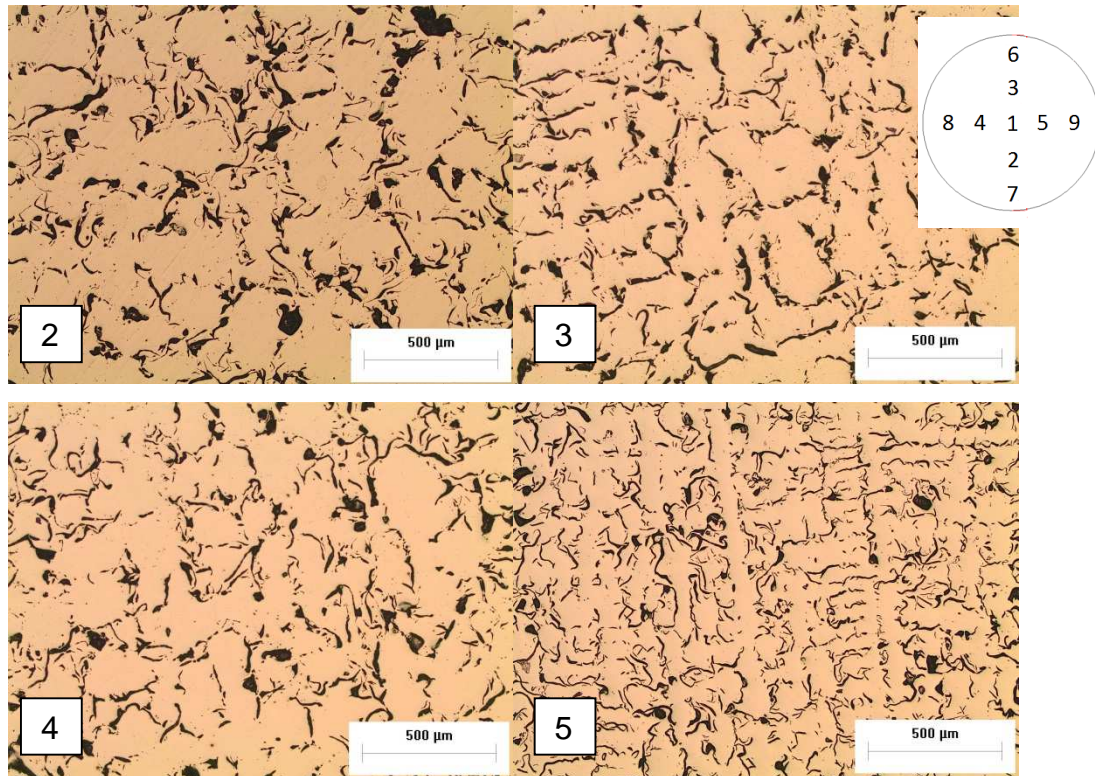


Figura 4.3: Região intermediária da amostra

Fonte: O autor.

Nesta região, o material mantém a matriz perlítica e apresenta um aumento no percentual de grafita, quando comparado à região central, sendo:

- Amostra 2 = 14,36% de grafita e 85,64% de perlita;
- Amostra 3 = 12,00% de grafita e 88,00% de perlita;
- Amostra 4 = 12,79% de grafita e 87,21% de perlita;
- Amostra 5 = 14,45% de grafita e 85,55% de perlita;

A região periférica é representada na figura 4.4, obtida através das amostras de número 6, 7, 8 e 9.

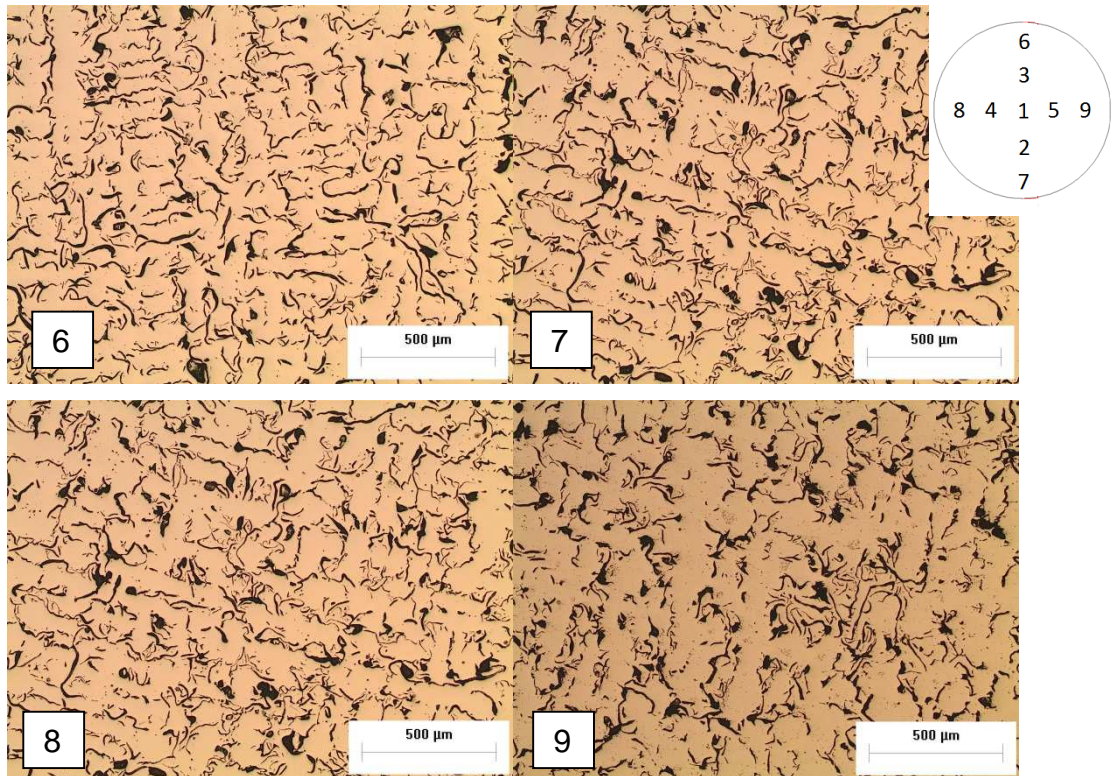


Figura 4.4: Região periférica da amostra

Fonte: O autor.

Assim como nas demais regiões, a matriz permanece 100% perlítica e a concentração de grafita aumenta ainda mais em relação à região central, sendo:

- Amostra 6 = 15,40% de grafita e 84,60% de perlita;
- Amostra 7 = 15,76% de grafita e 84,24% de perlita;
- Amostra 8 = 18,53% de grafita e 81,47% de perlita;
- Amostra 9 = 17,04% de grafita e 82,96% de perlita.

A representação gráfica da variação na fração volumétrica do material analisado pode ser observada na figura 4.5.

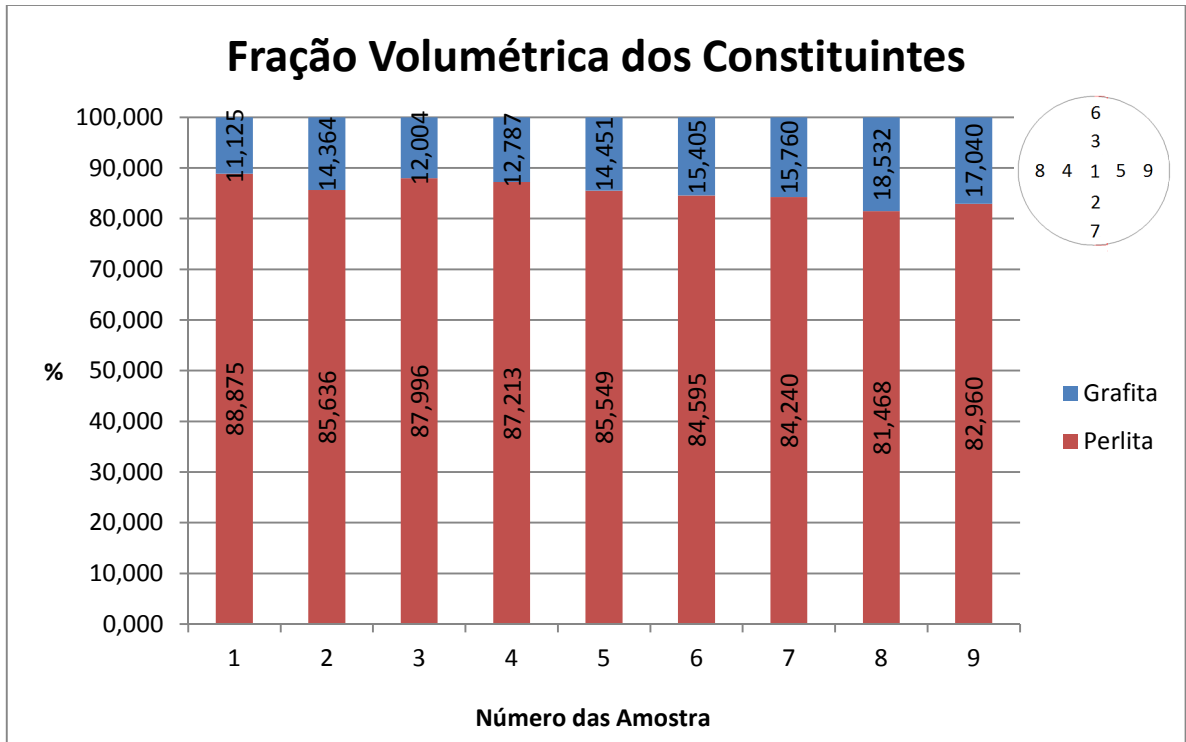


Figura 4.5: Variação na fração volumétrica do material

Fonte: O autor

Observa-se que o percentual de grafita cresce do centro (ponto 1) para a periferia do material (pontos 6, 7, 8 e 9), chegando a uma variação máxima de 7,41%. Conseqüentemente, o percentual de perlita diminui ao seu valor mínimo na região periférica.

Os resultados de dureza apresentados na Fig. 4.1 são condizentes com as frações volumétricas de cada constituinte, apresentadas na Fig. 4.5. Os valores de dureza observados foram proporcionais às quantidades de grafita na microestrutura. A região periférica, que apresentou a maior fração de grafita, também apresentou maior valor de dureza (239 HB).

Conforme estudo de Meurer (2014), o material estudado é considerado de boa usinabilidade, com grafitas em forma de lamelas, facilitando a propagação de trincas e ruptura do cavaco. A região periférica possui uma condição de usinabilidade sensivelmente maior que a região central, já que apresenta maior resistência, diminuindo o mecanismo de adesão responsável pela formação de aresta postiça.

A figura 4.6 mostra o mapeamento da estrutura do material, seguindo a referência de posição determinado pelo corte das amostras, com ampliação de 100 vezes.

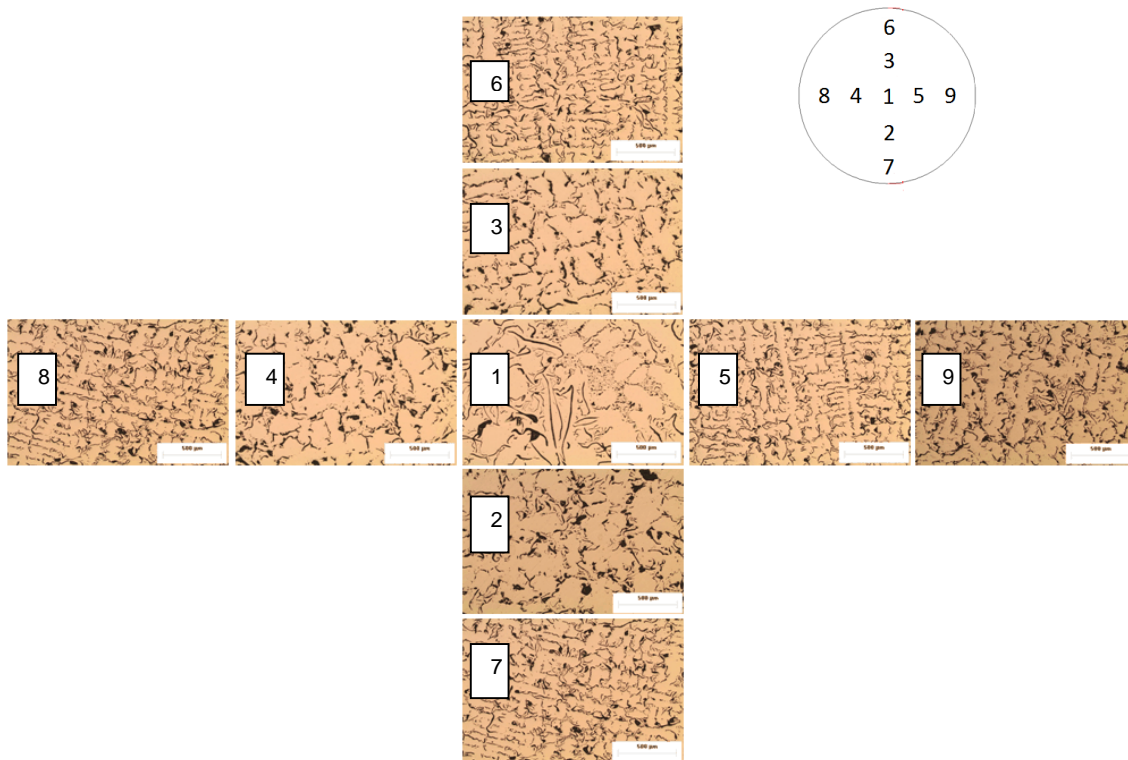


Figura 4.6: Mapeamento da estrutura do material

Fonte: O autor.

Posicionando as micrografias lado a lado, é possível observar a diferença estrutura do material em cada região. Assim como apresentado no estudo de Marmentini (2009), a maior velocidade de resfriamento na região periférica inibiu o crescimento dos grãos de grafita devido a limitação do mecanismo de difusão dos átomos de carbono da matriz para as lamelas de grafita aumentando a quantidade da mesma nas extremidades da amostra. Observando a região central, verificam-se grãos de grafita maiores e em menor quantidade, decorrentes da menor velocidade para resfriamento nesta região, possibilitando que o mecanismo de difusão ocorresse por um tempo maior.

A matriz metálica pode ser observada na figura 4.7, na qual as amostras passaram por ataque químico de Nital 2% com ampliação de 1000 vezes.

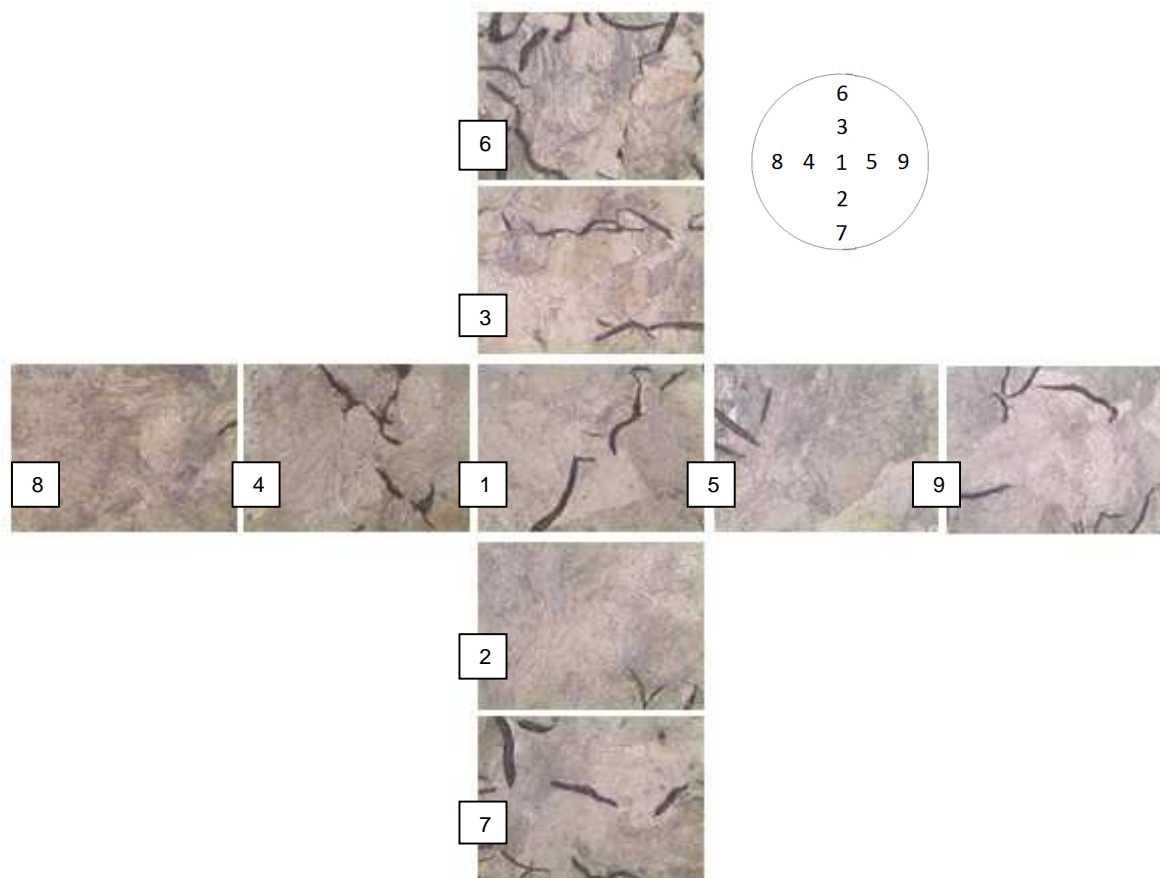


Figura 4.7: Matriz metálica

Fonte: O autor

Após os ensaios metalográficos, classifica-se o material como ferro fundido cinzento de matriz 100% perlítica com grafita lamelar.

4.3 ANÁLISE DA RUGOSIDADE X PARÂMETROS DE CORTE

Através da usinagem realizada conforme tabelas apresentadas na seção 3.4 do presente trabalho (Planejamento Experimental), os furos foram submetidos a medições de rugosidade, sendo mensurados três furos para cada combinação dos parâmetros de corte.

Os resultados estão expressos no parâmetro Ra, considerando o valor médio das três medições e confiabilidade de 95%, podendo ser observado na sequência de gráficos a seguir.

4.3.1 Resultados para broca convencional com dois gumes de corte

A figura 4.8 apresenta os resultados de rugosidade em Ra obtidos na usinagem com a broca convencional com dois gumes de corte.

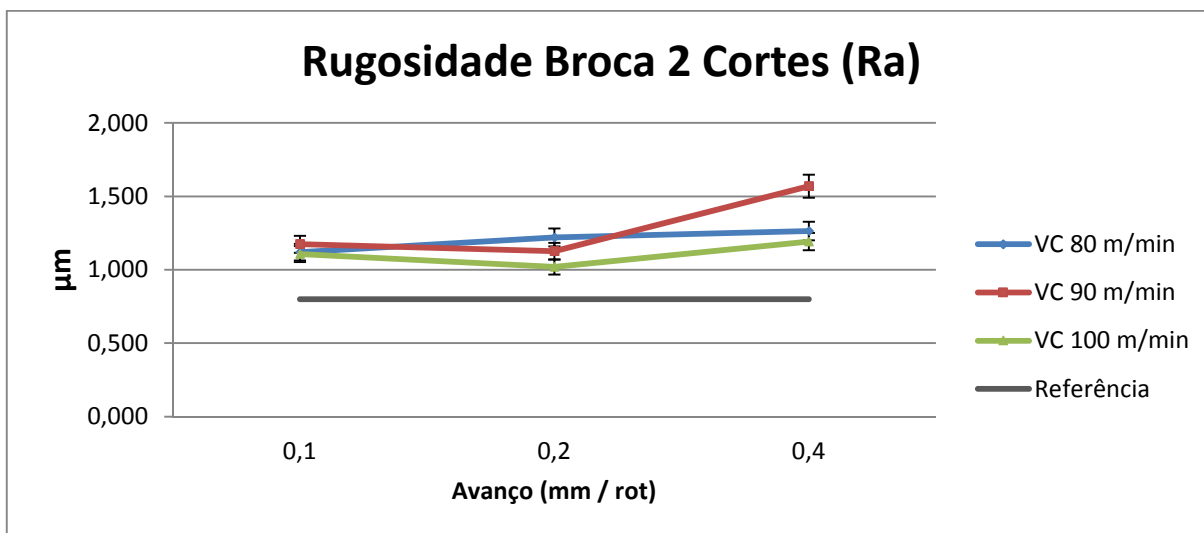


Figura 4.8. Rugosidade Ra na usinagem com broca convencional com 2 gumes de corte

Fonte: O autor

A figura 4.9 apresenta os resultados de rugosidade em Rt obtidos na usinagem com a broca convencional com dois gumes de corte.

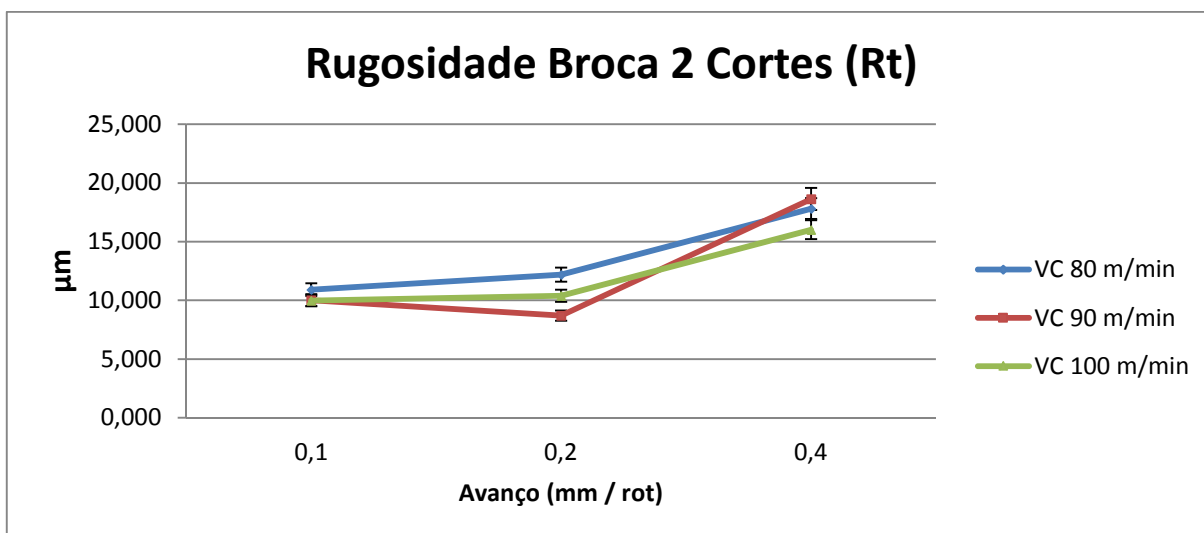


Figura 4.9. Rugosidade Rt na usinagem com broca convencional com 2 gumes de corte

Fonte: O autor

Observa-se uma tendência de aumento nos valores da rugosidade conforme o avanço aumenta. Há um aumento na altura dos picos e profundidade dos vales

causados pelas marcas decorrentes do avanço, apresentados pelos valores de rugosidade em Rt.

O melhor resultado obtido foi com a velocidade de corte em 100 m/min e avanço e 0,2 mm/rot, considerando o parâmetro de referência Ra.

Para os avanços de 0,1 e 0,4 mm/rot, mesmo variando a velocidade de corte, os valores de rugosidade médios podem ser considerados iguais sob a ótica estatística, já que as dispersões dos resultados apresentam-se sobrepostos.

A broca com dois gumes de corte se mostrou incapaz de atingir rugosidade com valores próximos a 0,8 Ra, chegando ao valor mínimo de 1,109 Ra e valor máximo de 1,507 Ra, representando 29,51% de variação nos valores de rugosidade.

4.3.2 Resultados para broca alargadora com quatro gumes de corte

A seguir, as figuras 4.10 e 4.11 apresentam os resultados de rugosidade obtidos na usinagem com a broca alargadora com quatro gumes de corte.

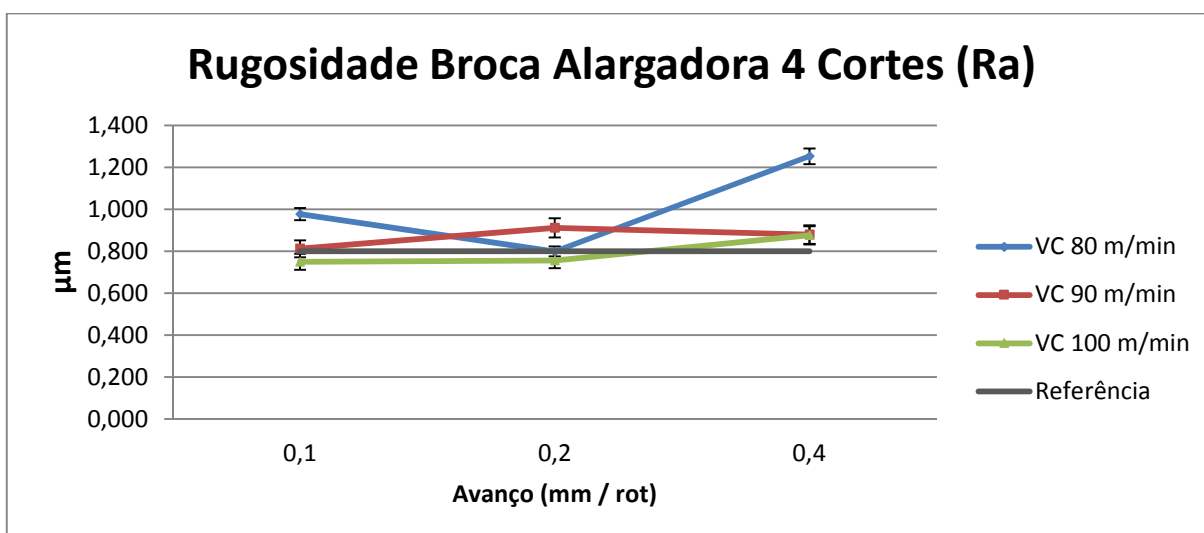


Figura 4.10 Rugosidade Ra na usinagem com broca alargadora com 4 gumes de corte

Fonte: O autor

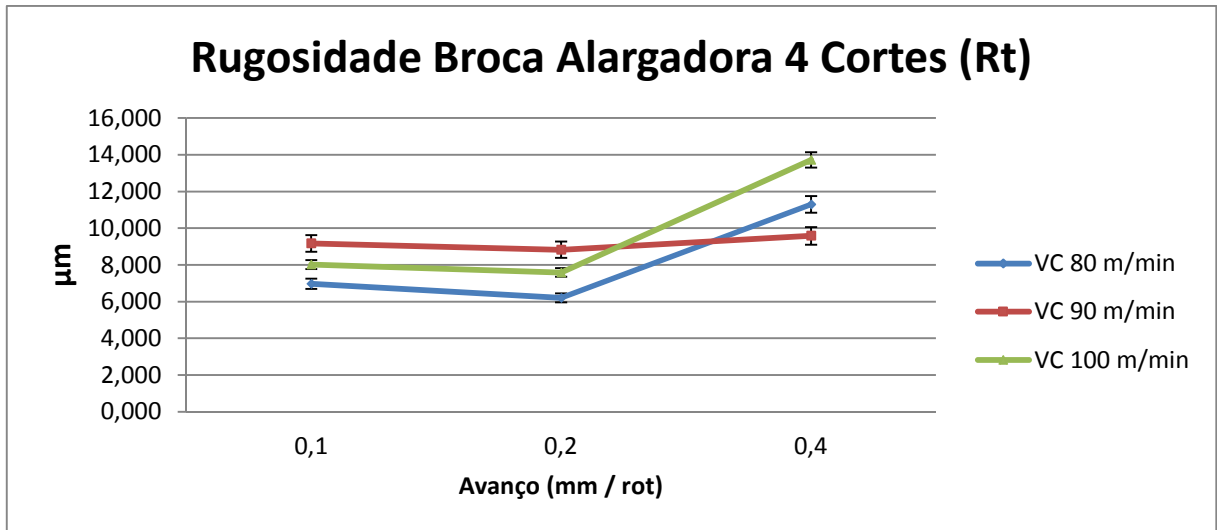


Figura 4.11 Rugosidade Rt na usinagem com broca alargadora com 4 gumes de cortes

Fonte: O autor

Assim como na broca de dois cortes, observa-se uma tendência de aumento nos valores de rugosidade conforme o aumento do avanço. Nota-se também uma redução nos valores da rugosidade em Rt, quando comparado com a broca convencional com dois gumes de corte. Os canais auxiliares da broca alargadora funcionam como facas de acabamento, proporcionando maior estabilidade à ferramenta e quebrando a altura dos picos gerados pelo movimento de avanço.

O melhor resultado obtido na usinagem com broca alargadora com quatro gumes de corte foi com os parâmetros de velocidade de corte de 100 m/min e avanço de 0,1 mm/rot, considerando também o parâmetro em Ra.

Em valores absolutos, a broca alargadora com quatro gumes de corte obteve melhor qualidade na usinagem dos furos que a broca com dois gumes. Três das nove combinações de parâmetros de corte testados alcançaram valores inferiores a 0,8 Ra, chegando a um valor mínimo de 0,750 Ra e valor máximo de 1,253 Ra, com variação de 40,16% nos valores de rugosidade.

4.3.3 Resultados para broca alargadora com seis gumes de corte

Na sequência, as figuras 4.12 e 4.13 apresentam os resultados obtidos na usinagem com a broca alargadora com seis gumes de corte.

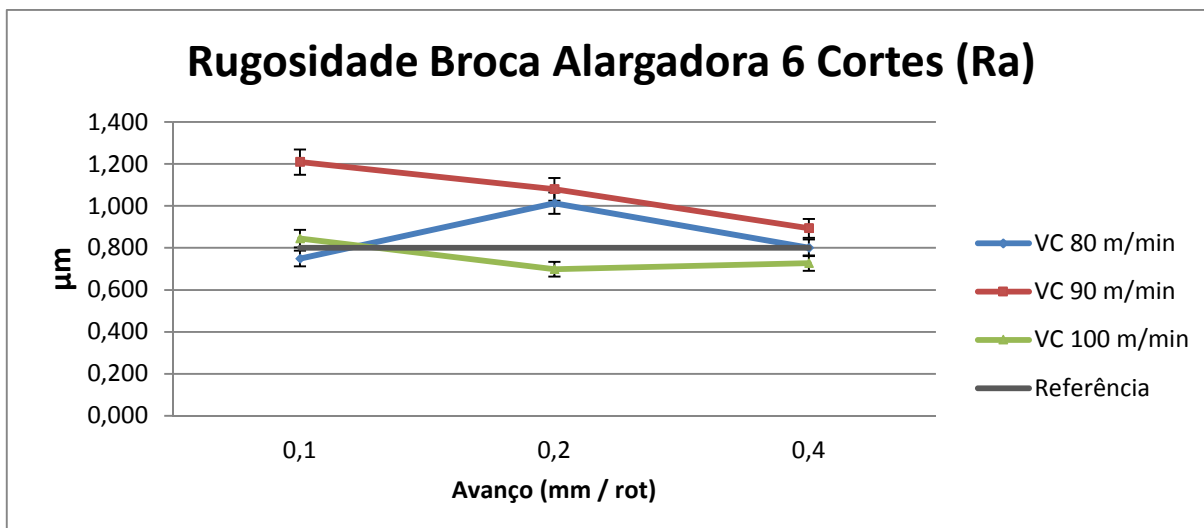


Figura 4.13 Rugosidade Ra na usinagem com broca alargadora com 6 gumes de cortes

Fonte: O autor

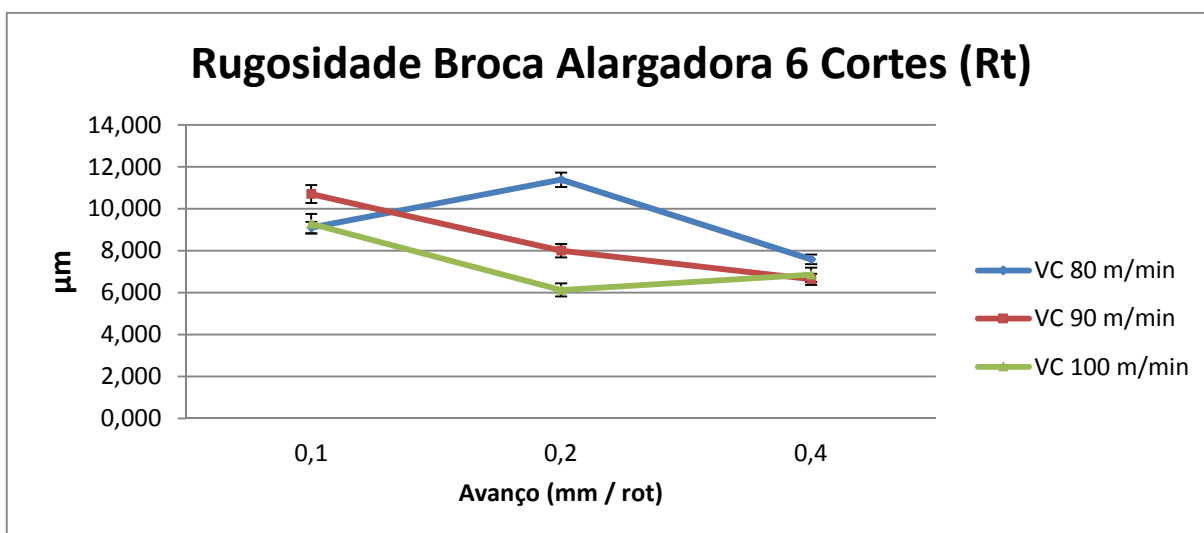


Figura 4.14 Rugosidade Rt na usinagem com broca alargadora com 6 gumes de corte

Fonte: O autor

Diferente das demais, a rugosidade dos furos realizados pela broca alargadora com seis gumes de corte sofreu menor influência do fator avanço, com leve tendência de queda nos valores absolutos conforme o avanço aumenta. Assim como ocorre com a broca alargadora com quatro gumes de corte, a maior quantidade de canais deixa a usinagem mais estável, além de seus gumes atuarem como gumes de acabamento do furo quebrando os picos de rugosidade gerados pelo movimento de avanço, mantendo a rugosidade Rt com valores mais baixos quando comparados com a broca convencional com dois gumes de corte.

O melhor resultado ocorreu com velocidade de corte de 100 m/min e avanço de 0,2 mm/rot, chegando a um valor mínimo de 0,698 Ra e um valor máximo de 1,209 Ra, variando 42,25%. Nesse ensaio, quatro das nove combinações de parâmetros de corte testados atingiram o valor limite de 0,8 Ra.

4.3.4 Resultados para alargador com seis gumes de corte

A seguir, as figuras 4.15 e 4.16 apresentam os resultados obtidos na usinagem com o alargador com seis gumes de corte.

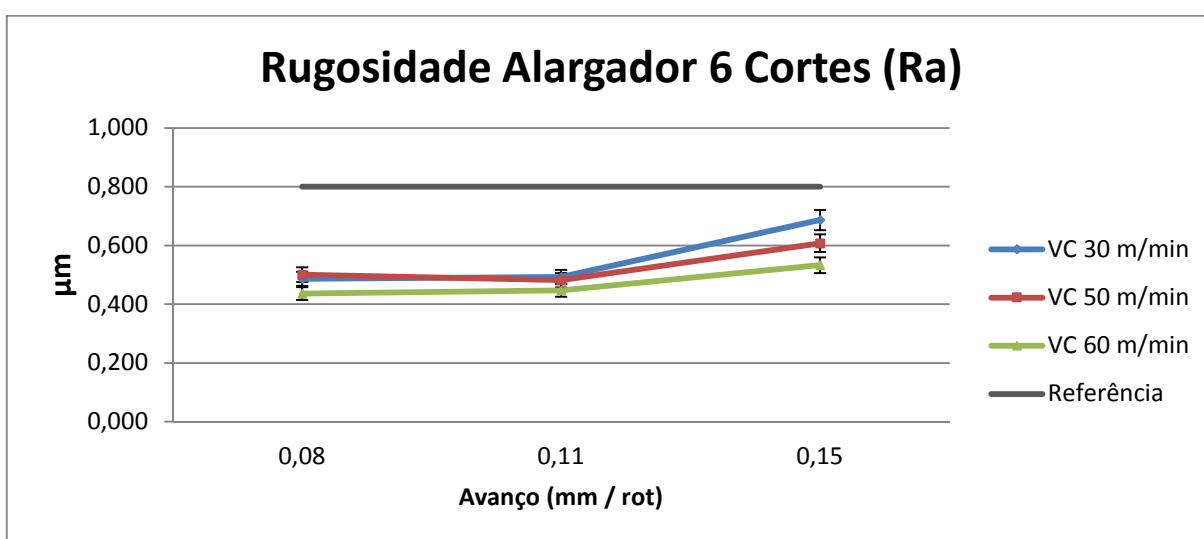


Figura 4.15 Rugosidade Ra na usinagem com alargador com 6 gumes de corte

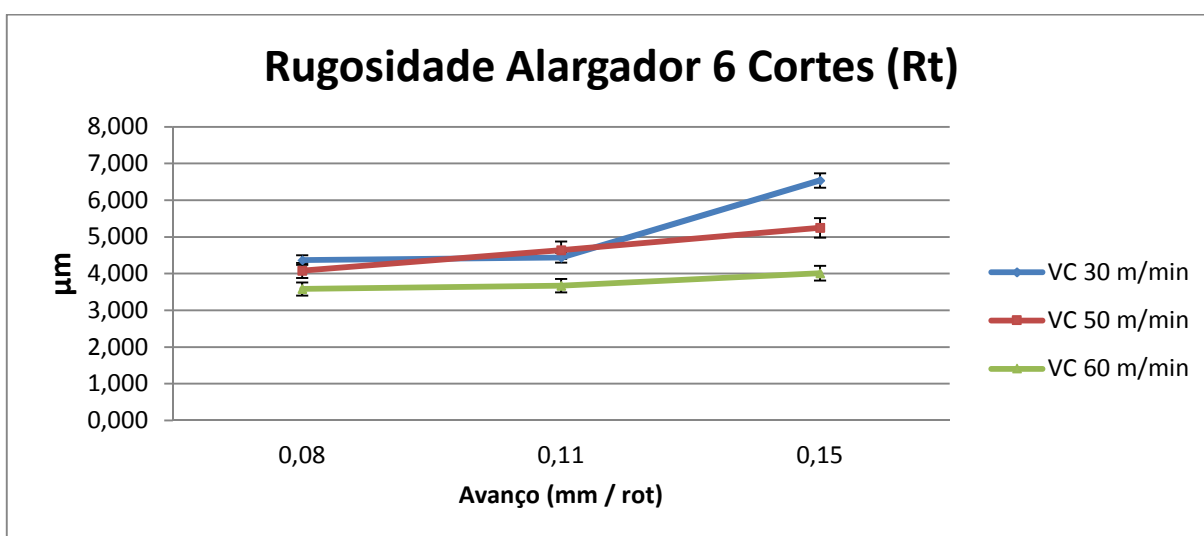


Figura 4.16 Rugosidade Rt na usinagem com alargador com 6 gumes cortes

Fonte: O autor

O processo de usinagem utilizando o alargador apresentou os melhores resultados de rugosidade entre as quatro geometrias de ferramentas testadas.

Todas as combinações atenderam o requisito de 0,8 Ra, ocorrendo uma tendência de aumento nos valores absolutos de acordo com o aumento do avanço. Os valores em Rt também obtiveram redução considerável, quando comparado com os processos de furação por brocas.

O valor mínimo de rugosidade ocorreu com a velocidade de corte de 60 m/min e avanço de 0,08 mm/rot atingindo 0,436 Ra, sendo o maior valor de 0,686 Ra, variando 36,43% do melhor para o pior resultado.

Para avanços de 0,08 e 0,11 mm/rot, os resultados foram muito similares, considerando que as dispersões dos resultados se sobrepõem. A uma leve tendência de melhora da rugosidade com valores de velocidades de corte mais elevados (60 m/min). Observa-se mais claramente a influência dos parâmetros de corte com avanço mais elevado, na qual também se obteve aumento nos valores de rugosidade.

A figura 4.17 apresenta os quatro melhores de rugosidade resultados obtidos em cada geometria testada, com valores expressos em Ra.

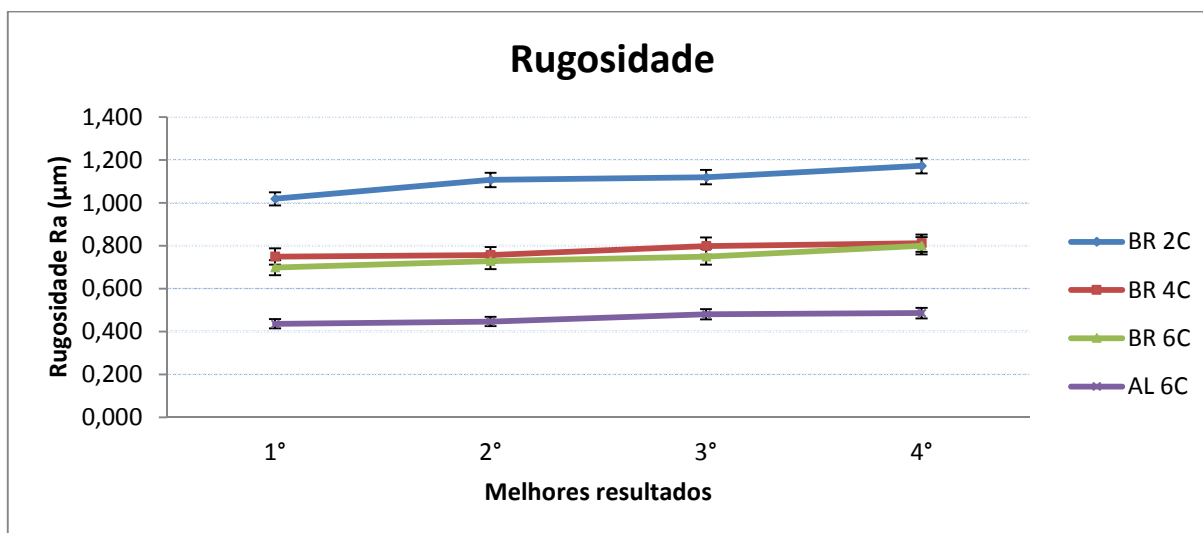


Figura 4.17 Resultados de rugosidade por tipo de ferramenta

Fonte: O autor

Sintetizando os resultados, a tabela 4.1 apresenta as combinações de parâmetros de corte, por ferramenta, que atingiram o objetivo de usinar furos dentro

do limite de rugosidade 0,8 Ra. Para o alargador foram listados os quatro melhores resultados, tendo em vista que todos atingiram a meta.

Tabela 4.1. Combinações de parâmetros de corte por ferramentas dentro do limite 0,8 Ra

Fonte: O autor

Parâmetros de corte que atingiram 0,8 Ra								
Posição	1°		2°		3°		4°	
	VC (m/min)	Avanço (mm/rot)	VC (m/min)	Avanço (mm/rot)	VC (m/min)	Avanço (mm/rot)	VC (m/min)	Avanço (mm/rot)
Broca 4c	100	0,1	100	0,2	80	0,2		
Broca 6c	100	0,2	100	0,4	80	0,1	80	0,4
Alargador	60	0,08	60	0,11	50	0,11	30	0,08

4.4 ANÁLISE DA FORÇA DE USINAGEM

Com a medição de forças de usinagem durante os ensaios de usinagem, é possível verificar como os melhores parâmetros de corte, considerados para obter baixa rugosidade, influenciam no processo de usinagem e nas condições dos furos fabricados. A figura 4.18 mostra os valores absolutos médios das forças de usinagem no sentido do avanço, expressos em *Newton*, seguindo a sequência dos parâmetros de corte que obtiveram os melhores resultados na medição de rugosidade. Os valores apresentam confiabilidade de 95%.

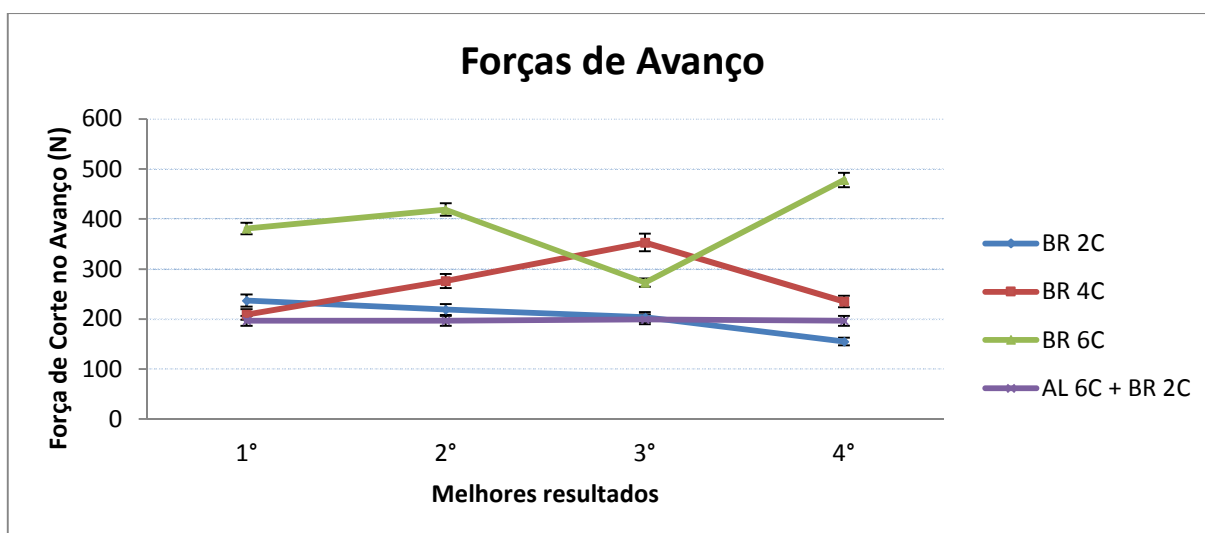


Figura 4.18 Resultados médios da força de usinagem por tipo de ferramenta

Fonte: O autor

O alargador, em sua aplicação direta, exerceu forças de avanço que variam em torno de 81 N. Valores muito abaixo dos obtidos com as brocas, já que remove apenas 0,3mm de material. Portanto, para avaliar as forças de avanço no processo de alargamento, foram somados os valores das forças exercidas na utilização da broca com dois gumes de corte na usinagem do pré-furo com os valores das forças exercidas pelo alargador.

Observa-se que há uma correlação entre a rugosidade e as forças de avanço. Há uma tendência de aumentos nas forças conforme os resultados de rugosidade também aumentam. O alargamento se demonstrou o processo cujas forças menos influenciaram na rugosidade, com valores praticamente constantes.

Dentre as brocas, a broca alargadora com seis gumes de corte foi a ferramenta que exerceu maior força de avanço nos testes, em valores absolutos, seguida da broca alargadora com quatro gumes e, por fim, da broca convencional com dois gumes de corte.

Os resultados dos testes também mostraram que os parâmetros de corte influenciaram pouco nos resultados de forças de avanço do processo de alargamento, que permaneceram praticamente constantes, com valores absolutos que só foram superados por uma combinação de parâmetros de corte da broca convencional com dois gumes que atingiu o valor de 155 N. As brocas apresentaram maior oscilação, com tendência de redução do esforço de corte a medida que a velocidade de corte aumenta. Castillo (2005) obteve resultados semelhantes, concluindo em seu estudo que os parâmetros de corte influenciam pouco no esforço de usinagem, principalmente com as ferramentas novas. O desgaste das ferramentas, causadas principalmente pelos mecanismos de adesão e abrasão, é o principal fator que eleva os valores de forças na usinagem.

Para avaliar a influência das forças de avanço sobre as ferramentas e as características dimensionais e físicas dos furos obtidos, os valores de forças mensurados foram divididos pelo número de gumes de corte das ferramentas, sendo demonstrado, em valores médios, na figura 4.19.

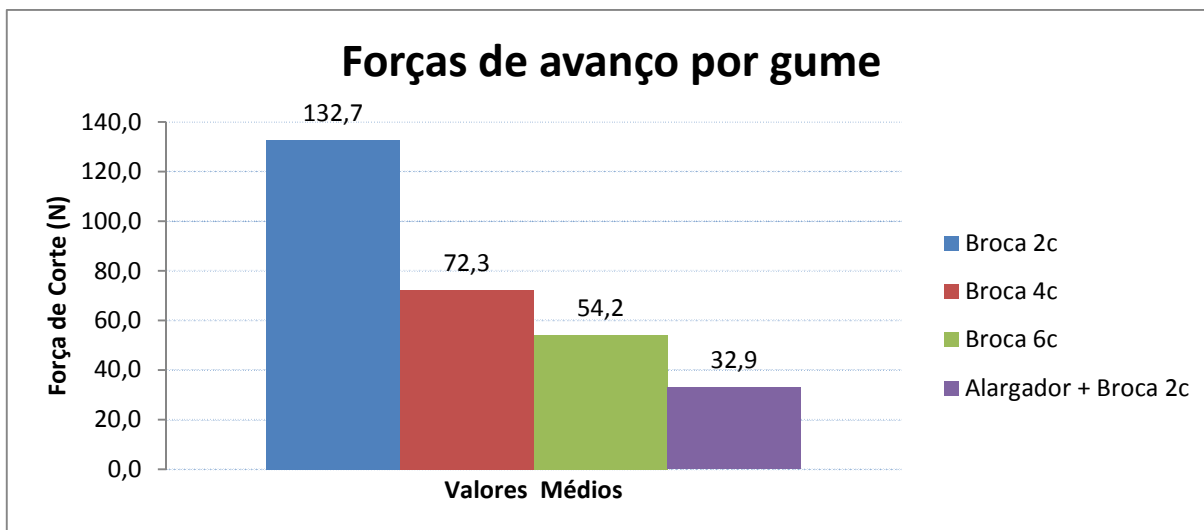


Figura 4.19. Resultados médios das forças de usinagem distribuída por gume

Fonte: O autor

A distribuição das forças por gume transmite com maior clareza a influência das forças de avanço sobre as ferramentas testadas. Quanto maior a quantidade de canais das ferramentas, menor o esforço aplicado sobre cada gume, contribuindo com o aumento da vida útil, preservando-as dos mecanismos de desgaste e eventuais lascamentos.

Esse fator também influencia na qualidade dos furos obtidos, comprovando a correlação entre rugosidade x forças de usinagem. As ferramentas com melhores resultados na avaliação de rugosidade (alargador e broca alargadora com seis gumes) foram as que usinaram com menor esforço distribuído em seus gumes de corte.

Analisando os valores absolutos (não médios) da distribuição das forças por gume na usinagem com brocas alargadoras, observou-se que há uma tendência de diminuição nas forças de avanço quando se combina alta velocidade de corte com baixo avanço. A broca alargadora com seis gumes alcançou seu menor resultado (35,3 N) com os parâmetros de VC 100 m/min e avanço 0,1 mm/rot, ficando muito próximo ao valor médio do processo de alargamento. A broca alargadora com quatro gumes de corte também obteve o menor resultado (52,3 N) com os mesmos parâmetros da broca alargadora de seis gumes.

Em seu estudo com processo de mandrilamento, Tang (2007) observou que as forças de usinagem diminuía com o aumento da velocidade de corte. Segundo o autor, o aumento da temperatura na região do corte, quando se aumenta a velocidade

de corte, provoca a diminuição da resistência do material, melhorando as condições de usinabilidade. Assim, acredita-se que o fator temperatura exerça o mesmo efeito nos processos de furação e alargamento, já que os resultados obtidos nos dois estudos se assemelham.

4.5 ANÁLISE DO TEMPO DE CICLO

Embora o processo de alargamento obtenha melhores resultados quanto aos valores de rugosidade, é um processo habitualmente mais lento que o de furação por brocas. Com a medição dos tempos de ciclo, foi possível observar essa diferença entre os dois processos. As medições foram realizadas utilizando o cronômetro no comando do centro de usinagem e é representada na figura 4.20 pelo valor médio do tempo de usinagem dos três furos realizados com cada combinação dos parâmetros de corte. O gráfico segue o *ranking* dos parâmetros com melhores resultados nas medições de rugosidade.

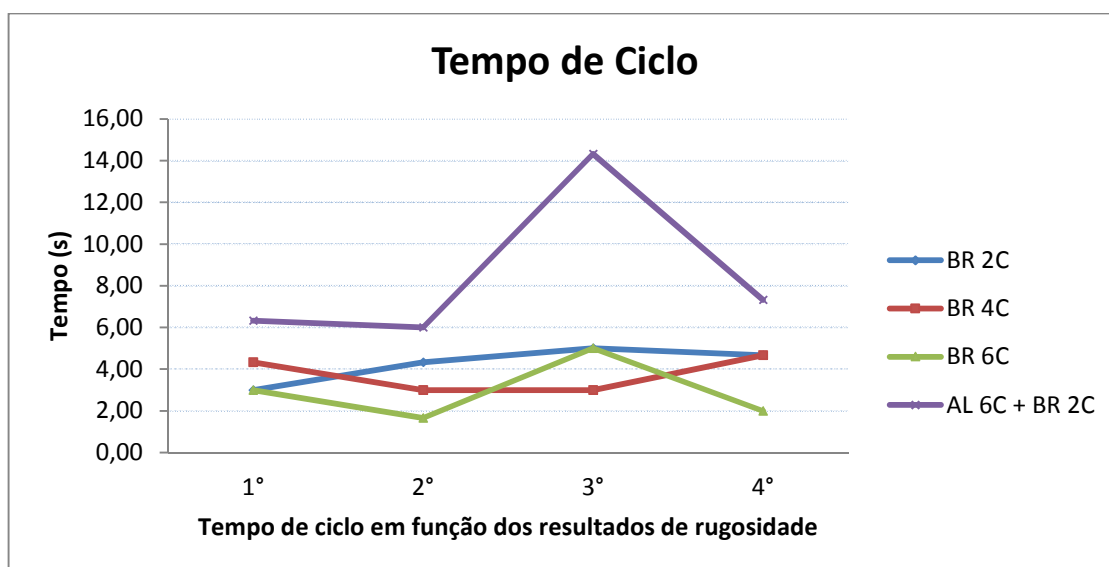


Figura 4.20 Resultados médios do tempo de ciclo por tipo de ferramenta

Fonte: O autor

Na avaliação do tempo por ciclo, observa-se que a broca alargadora com seis gumes de corte obteve os melhores resultados, já que usinou furos com rugosidade dentro de 0,8 Ra com tempos de ciclos menores. O melhor resultado atingido foi de

1,66 segundos, com a velocidade de corte 100 m/min, avanço de 0,4 mm/rot e rugosidade em 0,728 Ra.

A broca alargadora com quatro gumes usinou furos dentro da referência de 0,8 Ra com tempo de três segundos por ciclo, ou seja, 44,66 % mais lenta.

O alargador teve seu melhor resultado com o tempo de seis segundos, considerando a furação do pré-furo mais o acabamento com o alargador, ficando com um tempo 361,45 % acima quando comparado com a broca alargadora de seis gumes.

A broca com dois gumes de corte obteve tempos similares aos tempos das brocas alargadoras, porém não atingiram os requisitos mínimos na medição de rugosidade.

Nesse teste ficou evidente a influência da geometria das brocas alargadoras na velocidade do processo, mantendo baixos valores de rugosidade. A broca alargadora com seis gumes de corte suportou parâmetros de corte mais severos, mantendo os requisitos mínimos de rugosidade, principalmente no avanço, parâmetro de maior influência para a redução do tempo de ciclo.

Ao comparar os resultados do processo de furação por brocas alargadoras com os de alargamento, comprova-se, através dos diferentes parâmetros de corte usuais em cada processo, que a furação realiza a usinagem com velocidade muito superior.

4.6 ANÁLISE DAS TENSÕES RESIDUAIS

O objetivo desta análise de tensões residuais foi conhecer e comparar as tensões geradas na usinagem utilizando o processo de alargamento e furação com brocas alargadoras.

A tabela 4.2 apresenta os resultados das tensões residuais medidos nas 27 amostras.

Tabela 4.2 Resultados da medição de tensões residuais

Fonte: O autor

	Amostra	VC (m/min)	Avanço (mm/rot)	Tensão residual média (MPa)
Broca Alargadora de 4 gumes	1	80	0,1	-396
	2	80	0,2	-265
	3	80	0,4	-263
	4	90	0,1	-404
	5	90	0,2	-276
	6	90	0,4	-196
	7	100	0,1	-441
	8	100	0,2	-318
	9	100	0,4	-309
Broca Alargadora de 6 gumes	10	80	0,1	-354
	11	80	0,2	-301
	12	80	0,4	-223
	13	90	0,1	-388
	14	90	0,2	-269
	15	90	0,4	-163
	16	100	0,1	-336
	17	100	0,2	-217
	18	100	0,4	-153
Alargador 6 gumes	19	30	0,08	-500
	20	30	0,11	-489
	21	30	0,15	-474
	22	50	0,08	-551
	23	50	0,11	-511
	24	50	0,15	-484
	25	60	0,08	-526
	26	60	0,11	-497
	27	60	0,15	-463

Os resultados apresentados representam os valores médios de três medições por de tensões residuais por combinação de parâmetro de corte.

Os valores negativos significam que as tensões residuais são compressivas. Essas tensões, quando opostas a direção de carregamento trativo, reduzem o nível de tensão aplicada, inibindo a iniciação e propagação de trincas. Em contrapartida, podem gerar distorções geométricas, principalmente se o componente trabalhar em uma faixa de temperatura que permita o alívio das tensões.

Todos os valores de tensões residuais medidos estão dentro do limite de resistência à compressão do material ferro fundido cinzento GG30 (800 a 1000 MPa), apresentados na tabela 2.2 do presente trabalho.

4.6.1 TENSÕES RESIDUAIS X PARÂMETROS DE CORTE

A seguir, serão apresentados os resultados individuais das ferramentas testadas, verificando a influência dos parâmetros de corte na introdução de tensões residuais dos furos usinados.

A figura 4.21 apresenta o resultado de tensões residuais nos furos realizados pela broca alargadora de quatro gumes de corte.

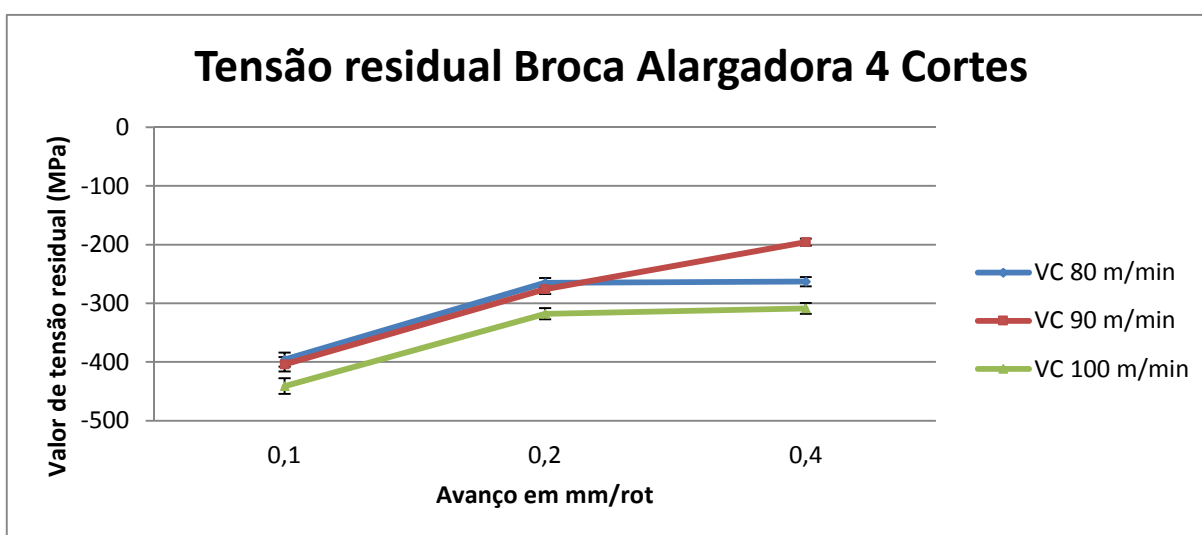


Figura 4.21 Resultados de tensões residuais com broca alargadora de quatro gumes de corte

Fonte: O autor

No processo de furação com broca alargadora de quatro gumes, o avanço apresentou maior influência que a velocidade de corte na geração de tensões residuais.

Os valores de tensões residuais baixaram a medida que o avanço aumentou de 0,1 mm/rot para 0,4 mm/rot. Efeito contrário ao da velocidade de corte, que obteve melhores resultados quando baixou de 100 m/min para 90 m/min. A melhor combinação de parâmetros para esta ferramenta foi velocidade de corte 90 m/min e avanço 0,4 mm/rot, atingindo -196 MPa.

A figura 4.22 apresenta o resultado de tensões residuais nos furos realizados peça broca alargadora de seis gumes de corte.

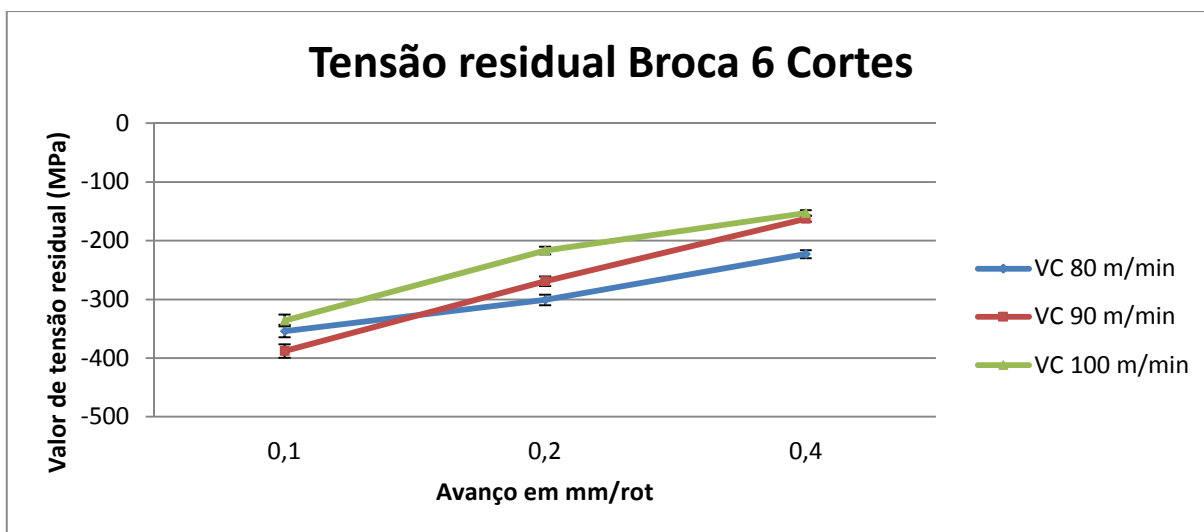


Figura 4.22 Resultados de tensões residuais com broca alargadora de seis gumes de corte

Fonte: O autor

Os resultados de tensões residuais mensurados no processo de furação com broca alargadora de seis gumes apresentaram tendência de redução da tensão proporcional a redução do avanço. A diferença para os resultados atingidos pela broca alargadora de quatro gumes foi que esta ferramenta obteve tensão mais baixas a medida que a velocidade de corte aumentou.

A melhor combinação para esta ferramenta foi com a velocidade de corte de 100 m/min e 0,4 mm/rot, atingindo o valor de -153 MPa (valor absoluto). A combinação de parâmetros com 90 m/min de velocidade de corte e 0,4 mm/rot apresentou resultado equivalente do ponto de vista estatístico, considerando dispersões sobrepostas.

Fechando as análises individuais, a figura 4.23 apresenta os valores de tensões residuais mensurados no processo de alargamento com alargador de seis gumes de corte.

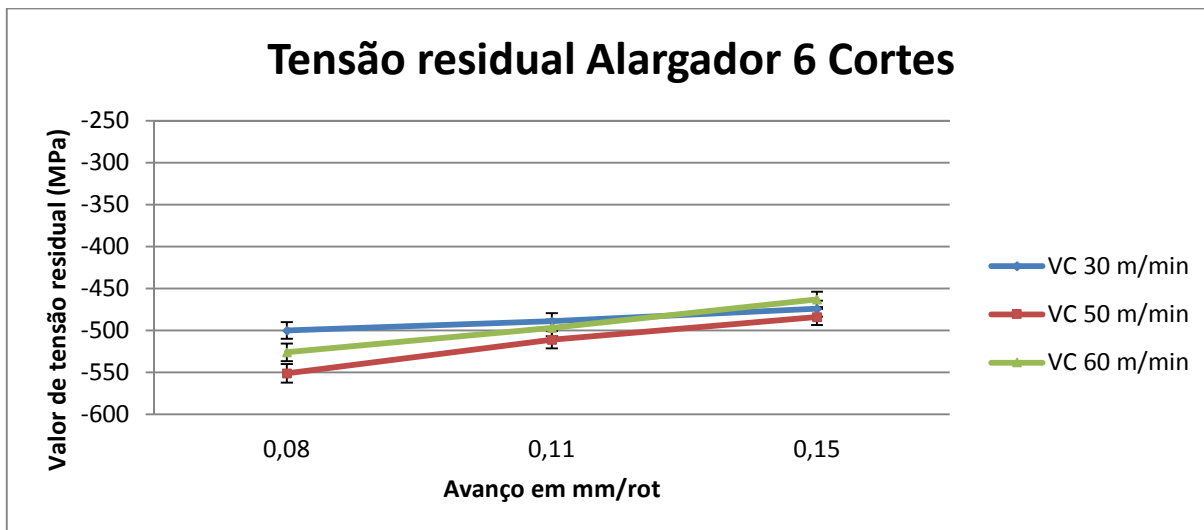


Figura 4.23 Resultados de tensões residuais com alargador com seis gumes de corte

Fonte: O autor

Assim como nas demais ferramentas, o aumento do avanço proporcionou valores de tensões mais baixos. A velocidade de corte, embora com pouca influência, obteve tendência de melhora com o maior valor testado. A melhor combinação de parâmetros foi com velocidade de corte em 60 m/min e avanço de 0,15 mm/rot, atingindo -463 MPa (valor absoluto), porém, estatisticamente, os resultados são equivalentes para os avanços de 0,11 mm/rot e 0,15 mm/rot.

Hioki (2006) obteve resultados semelhantes em relação à influência dos parâmetros de corte na geração de tensões residuais. Mesmo trabalhando com processo de usinagem e materiais diferentes, o comportamento das tensões foi compatível com os expostos no presente trabalho, no qual se obteve redução nas tensões com o aumento do avanço e da velocidade de corte.

Aumentar a velocidade de corte propicia também o aumento da temperatura na usinagem, assim, reduzindo os efeitos de origem mecânica e a resistência do material na região da usinagem, tornando as tensões residuais menos compressivas.

Os efeitos térmicos também podem ser atribuídos ao aumento do avanço, contribuindo para redução das tensões compressivas. Avanços mais baixos são mais suscetíveis aos efeitos mecânicos (abrasão e adesão) e tendem a elevar as tensões compressivas.

Seguindo estes conceitos, observa-se que as brocas alargadoras obtiveram melhores resultados no teste de tensões residuais justamente por trabalharem com parâmetros de corte mais elevados. Outro fator a se observar são as tensões geradas pela broca com dois gumes de corte, ao executar o pré-furo, podem ter influenciado para elevar os valores medidos, já que o alargador removeu apenas 0,15 milímetros de material das paredes dos furos.

A figura 4.24 apresenta o gráfico comparativo entre as três ferramentas, mostrando o comportamento de cada processo em função da tensão residual.

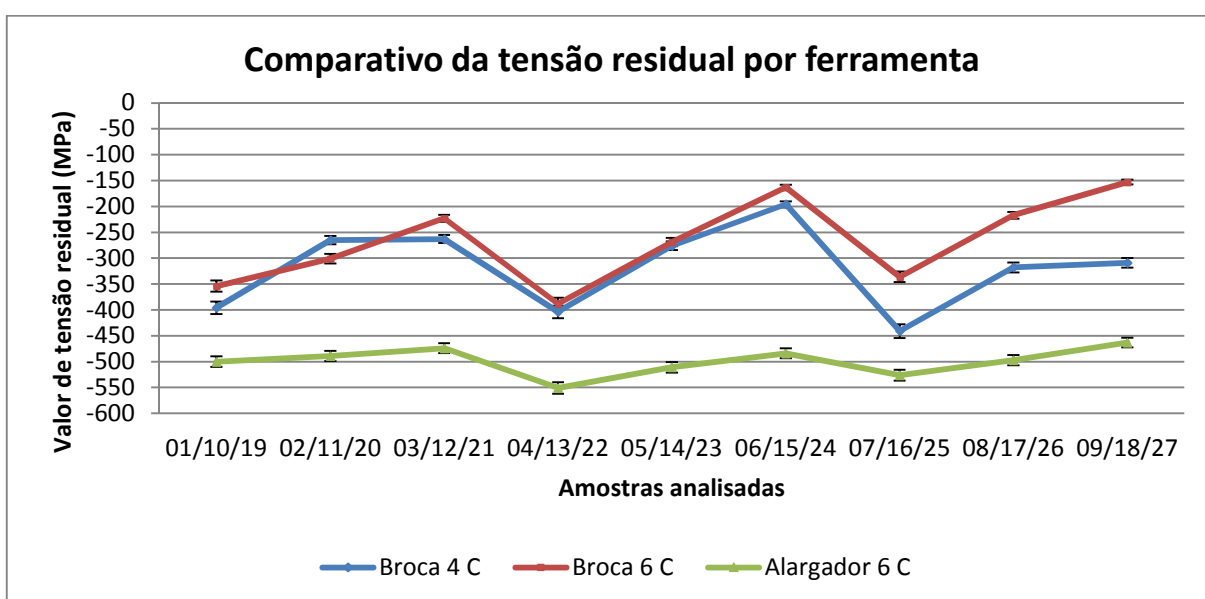


Figura 4.24 Comparativo das tensões residuais por ferramentas

Fonte: O autor

A broca alargadora com seis gumes de corte apresentou os resultados de tensões residuais mais baixos entre as três ferramentas testadas. Quando comparada com a broca alargadora de quatro gumes, percebe-se que a broca alargadora de seis gumes de corte obteve melhores resultados, principalmente, com valores de avanços mais elevados (representados no gráfico pelos três últimos pontos à direita). Embora a temperatura não tenha sido mensurada nos testes práticos, acredita-se que o maior atrito com a parede do furo, proveniente da maior quantidade de guias cilíndricas na broca com seis gumes de corte, aliado com avanço e velocidade de corte mais elevados, proporcione um aumento na temperatura da usinagem e reduzindo as tensões compressivas.

5 CONCLUSÕES

Os resultados apresentados no presente trabalho revelam características importantes do processo de furação com brocas alargadoras, utilizando o material ferro fundido cinzento GG30. Foi possível verificar a influência da quantidade de canais das brocas na qualidade dos furos usinados, bem como os melhores parâmetros de corte para obtenção de furos com rugosidade no limite de 0,8 Ra.

Todas as ferramentas testadas apresentaram bons resultados de rugosidade, considerando processos convencionais de furação e alargamento. A usinagem foi realizada em condições que contribuem para o estudo, em um centro de usinagem de alta capacidade e tecnologia, com fixação por mandril hidráulico e ferramentas especiais em metal duro com revestimento adequado para as operações. Essas condições nem sempre são encontradas na indústria, o que permite afirmar que a qualidade dos furos em um processo de usinagem depende de um conjunto de fatores e não apenas das ferramentas utilizadas.

Os principais pontos a serem enfatizados serão apresentados a seguir:

- Os parâmetros de corte, velocidade de corte e avanço, influenciaram diretamente nos resultados obtidos no presente estudo. Para atender o objetivo de produzir furos com rugosidade abaixo de 0,8 Ra, observou-se que o alargador teve resultados expressivos quando combinado alta velocidade de corte (60 m/min) e baixo avanço (0,08 mm/rot). As brocas alargadoras com quatro e seis gumes suportaram condições de usinagem mais severas sem perder qualidade no furo, com a broca de seis gumes obtendo seu melhor resultado de rugosidade com velocidade de corte de 100 m/min e avanço de 0,2 mm/rot.
- A diferença entre os piores e melhores resultados da rugosidade para cada combinação de parâmetro de corte, no qual as brocas alargadoras tiveram um aumento de rugosidade superior a 40% e o processo de alargamento variou cerca de 36%, deixou evidente a importância na escolha correta dos parâmetros de corte para cada processo. Isso representa significativos ganhos relacionados a qualidade, capacidade e produtividade do processo de usinagem utilizado.

- Aumentar a velocidade de corte também proporcionou a redução da força de avanço distribuída entre os gumes de corte. Desta forma, há uma redução no tamanho e quantidade de cavaco removido para cada rotação da broca, evitando que estes causem danos às paredes dos furos e a própria ferramenta, prevenindo o desgaste prematuro dos gumes e aumentando a vida útil. O provável aumento da temperatura proveniente de maiores velocidades de corte também se demonstrou um fator importante para a redução das forças de usinagem.
- Os parâmetros de corte influenciaram diretamente na tensão residual, diminuindo seus valores conforme o aumento do avanço e da velocidade de corte. Como todos os resultados ficaram dentro do limite de resistência à compressão do material, as tensões terão maior ou menor influência de acordo com a aplicação do componente usinado.
- Os testes com o alargador confirmaram as características desse processo, no qual foram obtidos os melhores resultados de rugosidade, porém com tempo de ciclo superior a três vezes aos obtidos com a broca alargadora com seis gumes corte.
- A broca convencional com dois gumes de corte não atingiu o valor de referência na rugosidade, 0,8 Ra. Esse desempenho era esperado, já que processos convencionais de furação chegam a apresentar rugosidades de aproximadamente 6,3 Ra.
- As brocas alargadoras foram capazes de produzir furos com rugosidade abaixo de 0,8 Ra e tempo de ciclo três vezes menor que o obtido com o alargamento.
- A maior quantidade de canais nas brocas alargadoras, especialmente na ferramenta com seis gumes, contribuiu para uma usinagem mais estável, dividindo as forças de usinagem pelos gumes de corte e proporcionando maior área de contato entre as guias da ferramenta e a parede do furo. A redução nos valores de rugosidade pode ser atribuída à geometria das brocas alargadoras, com canais desenvolvidos para realizar o alisamento da superfície do furo.

- Os testes demonstram que as brocas alargadoras agregam a velocidade característica dos processos de furação com boa qualidade superficial nos furos obtidos, chegando a valores de rugosidade que se assemelham aos do processo de alargamento.

Os resultados apresentados permitem afirmar que, em um processo bem estruturado e com os parâmetros de corte adequados, as brocas alargadoras podem substituir operações de alargamento com exigências de rugosidade em torno de 0,8 Ra. Alguns dos principais ganhos obtidos com essas ferramentas estão no tempo de ciclo, com uma usinagem superior a três vezes mais veloz, e nos custos do processo, reduzindo o número de ferramentas envolvidas na produção e o tempo de setup.

6 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Este estudo também poderá servir de apoio e incentivo para novas pesquisas acerca do assunto tratado. Desta forma, serão apresentadas algumas sugestões para trabalhos futuros que possam ampliar o conhecimento sobre os processos de furação por brocas alargadoras.

- a) Avaliar os resultados relacionados à geometria dos furos usinados, como diâmetro, circularidade e cilindridade. Essas características podem contribuir para validar o processo de furação por bocas alargadoras sob um ponto de vista não abordado neste trabalho, verificando se as ferramentas podem atingir tolerâncias dimensionais IT7 (expectativa dos fabricantes);
- b) Realizar teste de longa duração para avaliar a vida útil das brocas alargadoras, contribuindo com informações sobre aspectos econômicos do processo de usinagem com essas ferramentas;
- c) Testar as brocas alargadoras em outros materiais, como aços e ligas de alumínio, avaliando a influência da geometria da ferramenta sobre furos em diferentes condições de usinabilidade. Desta forma, pode-se aumentar o campo de aplicação e proporcionar novos desenvolvimentos à geometria destas ferramentas;
- d) Estudar de forma aprofundada o material após usinagem, realizando novos testes metalográficos nas paredes dos furos, buscando analisar a diferença entre a usinagem com o processo de alargamento e a furação por brocas alargadoras. A remoção de cavaco com parâmetros de corte mais severos, utilizados pelas brocas alargadoras, pode introduzir trincas e/ou outros aspectos que não puderam ser observados nos testes realizados neste trabalho;
- e) Investigar o efeito da temperatura na usinagem com brocas alargadoras e como esse fator pode influenciar no acabamento superficial dos furos e na vida útil da ferramenta. O controle da temperatura, através de testes com fluídos refrigerantes, pode trazer informações que contribuam com o desenvolvimento desta geometria de corte.

REFERÊNCIAS

ABNT Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 6409 Tolerâncias Geométricas- tolerâncias de formas, orientação, posição e batimento - generalidades, símbolos, definições e indicações de desenho.** Brasil, 1997.

ALMEIDA, Déborah Oliveira; MACHADO, Álisson Rocha. **Investigação de desvios geométricos no alargamento do ferro fundido cinzento.** Artigo. 16º Simpósio de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica. Uberlândia, Minas Gerais 2006.

ALMEIDA, D. O. **Investigação de desvios geométricos no alargamento de ferro fundido com ferramentas revestidas.** 2008. 117 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2008.

AMORIM, Heraldo, **Furação: Movimentos e Geometria de Ferramenta,** São Paulo, 2003. Disponível em <http://www.ufrgs.br/gpfai/>. Acesso em 09 de novembro de 2012.

ANDEROGLU, B.S.O. **Residual stress measurement using X-ray diffraction.** Texas, *Master of Science*, 2004, p. 12-42.

ASTM Standard E3-11, 2003e1, "Standard Guide for Preparation of Metallographic Specimens," ASTM International, West Conshohocken, PA, 2003, DOI: 10.1520/C0033-11E03, www.astm.org.

BEZERRA, A. A.; MACHADO, Á. R.; JÚNIOR, A. M. S. **Importância do ângulo de hélice no desempenho dos alargadores multicortantes.** Congresso Brasileiro de Engenharia Mecânica (Cobem) 99 / Águas de Lindóia (SP); Associação Brasileira de Ciências Mecânicas (ABCM) / Revista Máquinas & Metais, 2000.

BEZERRA, A.A. **Influência dos principais parâmetros no processo de alargamento de uma liga de alumínio-silício.** Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 1998.

CALLISTER, William D, Jr. **Materials Science and Engineering: An introduction.** 7 ed. Nova York: John Wiley & Sons, 2007.

CASTILLO, Willian Jefferson González. **Furação profunda de ferro fundido cinzento GG25 com brocas de metal duro com canais retos**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Departamento de Engenharia Mecânica. Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, 2005.

CAVALCANTE, Fabricio José Nobrega, **Análise de utilização de broca escalonada de canal reto no processo de furação em uma liga de alumínio utilizada na indústria automotiva**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Departamento de Engenharia Mecânica. Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 2010.

CHIAVERINI, V. **Aços e Ferros Fundidos**. Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais - ABM, 7ª Edição, 2002.

COFINO, Rachel Cristina, **Análise das Tensões Residuais em uma Junta Soldada em Condições Overmatch**. Trabalho de graduação em Engenharia dos Materiais, Centro Universitário da FEI, São Paulo, 2010.

COSTA, Eder Silva. **Apostila de usinagem do Centro de Educação Tecnológica de Minas Gerais**. Minas Gerais, 2006. Disponível em <<http://academicos.cefetmg.br/admin/downloads/2104/Apostila%20de%20Usinagem.pdf>>. Acesso em novembro de 2012.

DA SILVA, R.B. **Alargamento cônico de Ferro Fundido Nodular**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2001.

DIAS, Luiz Roberto Muñoz, **A influência do teor relativo perlita / ferrita na usinabilidade do ferro fundido cinzento**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Departamento de Engenharia Mecânica. FEM, Campinas, 2011.

DILLEY, D. N. et al. **An analytical study of the effect of process damping on reamer vibrations**. Journal of Sound and Vibration, p. 997-1015. 5 jan. 2004.

DINIZ, Anselmo Eduardo; MARCONDES, Francisco Carlos; COPPINI, Nivaldo Lemos. **Tecnologia da Usinagem dos Materiais**. São Paulo: Art Líber Ltda. 5a ed., 2006.

FERRARESI, Dino. **Fundamentos da Usinagem dos Metais**. São Paulo: Edgard Blucher, 5a ed., 2006.

FERREIRA, Mauricio Climaco. **Análise comparativa entre alargamento de ferramenta de gume único regulável e mandrilamento em ferro fundido nodular GGG40**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis 2011.

FERSART. Brasil: Web Site da Empresa, 2013. Disponível em www.fersart.com.br, acesso em novembro de 2013.

FONSECA, Marcelo D.; GONÇALVES Ricardo A.; MACHADO, Álisson R. **Investigação dos desvios geométricos no alargamento de ferro fundido cinzento com ferramentas revestida**. Artigo. 5º Congresso Nacional de Engenharia de Fabricação, Belo Horizonte, 2009.

GÂMBARO, Luiz Sergio. **Proposta de Otimização de Processo de Fabricação de Peças Cilíndricas por Meio da Têmpera por Retificação**. Dissertação de Pós-Graduação em Engenharia de Produção. UNIMEP. Santa Bárbara D'Oeste, São Paulo, 2006.

GODINHO, A. F. E. **Análise do mandrilamento de cilindros de blocos de motores em ferro fundido vermicular com diferentes concepções de ferramentas**. 2007. 129 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2007.

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

JEONG, Y. H., CHO, D. W. **Estimating cutting force from rotating and stationary feed motor currents on a milling machine**, *International Journal of Machine Tools & Manufacture* **42**. 2002.

JÚLIO, Vilmar. **Avaliação da redução do uso de fluido de corte no processo de alargamento de ferro fundido vermicular**. Dissertação de Mestrado, SOCIESC. Joinville, 2009.

KÖNIG, W., KLOCKE, F. **Fertigungsverfahren: drehen, fräsen, bohren**. 5 ed. Berlin: Springer, 1997, 471 p.

LOPES, Juliana dos Santos. **Análise e otimização do sequenciamento de produção de uma empresa de médio porte de embalagens plástica**. Monografia de Graduação em Engenharia de Produção, Universidade Federal de Juiz de Fora. Juiz de Fora, 2008.

MASON, F. **As várias configurações das ferramentas de acabamento de furos**. Tradução: Marco Aurélio Conceição. Adaptação: Alexandre Tadeu Simon. Revista Máquinas & Metais, 2000.

MAPAL. Brasil: Web Site da Empresa, 2013. Disponível em www.mapal.com, acesso em novembro de 2013.

MARMENTINI, MOZART MARCOS. **Análise da furação do ferro fundido nodular utilizando brocas de M2 nitretadas**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Departamento de Engenharia Mecânica. Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 2009.

Metals Handbook. **Machining**, Ninth Edition, ASM International, vol.16, 1989.

MEURER, Paulo Roberto; GUESSER, Wilson Luiz; BOEHS, Lourival. **Usinabilidade do ferro fundido cinzento ligado utilizado na fabricação de discos de freios automotivos**. Artigo. 4º Congresso Brasileiro de Engenharia de Fabricação. Águas de São Pedro, São Paulo, 2007.

OHGO, K., SATOH, A., MIZUNO, T. AND ITOH, T., **Relation between cutting conditions and precision in the reaming of gray iron castings**, Wear, vol. 52, n. 1, 1979, pp. 79-88.

OLIVEIRA, Valter Vander de. **Influência da geometria de brocas na furação de ferro fundido vermicular**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Departamento de Engenharia Mecânica. Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 2008.

Reuter, U., Schulz, H., Dawson, S., Hollinger, I., Robbins, M., Daeth, J. **“The Effect of Metallurgical Variables on the Machinability of Compacted Graphite Iron”**. Society of automotive engineers, Artigo, Alemanha, 2001, p 1-18.

RODRIGUES, Alessandro Roger. **Estudo da Geometria de Arestas de Corte Aplicadas em Usinagem com Altas Velocidades de Corte**. Dissertação de Doutorado em Engenharia Mecânica, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2005.

SANDVIK, Horman, **Mercado Brasileiro de Ferramentas Rotativas**, 2008. Disponível em <http://www.sandvik.com.br>. Acesso fevereiro de 2013.

SCHULER, G. M. B. H. **Metal Forming Handbook** /Schuler. Berlin, Heidelberg: Springer Verlag, 1998.

SERBINO, Edson Marcelo. **Um estudo dos mecanismos de desgaste em disco de freio automotivo ventilado de ferro fundido cinzento perlítico com grafita lamelar**. Dissertação de Mestrado em Engenharia Mecânica. Universidade de São Paulo, São Paulo, 2005.

SHIMADZU. Brasil: Web Site da Empresa, 2014. Disponível em <http://www.shimadzu.com.br/analitica/produtos/difratometros/xrd-7000.shtml>, acesso em janeiro de 2014.

SOARES, M. C. B. V. **Influência das tensões residuais no comportamento em fadiga e fratura de ligas metálicas**. Dissertação de Doutorado, Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares. São Paulo, 1998.

SOTO, Marcos. **Furação Profunda – (I), Métodos Ferramentas e suas Características**. São Paulo, 2003, Titex Plus. Disponível em <http://www.omundodausinagem.com.br/edicoes/2003/2/artigo_titex.pdf>. Acesso em 09 de novembro de 2012.

SOUSA, Diogo Antonio de. **Determinação de Tensões Residuais em Materiais Metálicos por meio de Ensaio de Dureza**. Dissertação de Mestrado, UFSJ. São João Del Rei – MG, 2012.

SOUZA, Sérgio Augusto de, **Ensaio mecânicos de materiais metálicos. Fundamentos teóricos e práticos**. São Paulo. Edgar Blücher, 1982.

STEMMER, Eric Caspar. **Ferramentas de Corte I**. Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, 5a ed. 2001.

STEMMER, Eric Caspar. **Ferramentas de Corte II**. Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, 3.ed. 2005.

SHAW, M. C. **Metal Cutting Principles**. New York: Oxford Science Publication, 1984.

TANG, Y.; SASAHARA, H. **Investigation of thermal behavior on cylinder liner. International.** Journal of Machine Tools & Manufacture, p. 2162-2171. 29 abr. 2007.

TRENT, E. M. **Metal Cutting.** 2. Ed. London: Butterworths, 1984. 245p.

UMARAS, Eduardo. **Tolerância Dimensional em Conjuntos Mecânicos: Estudo e Proposta para Otimização.** Dissertação de Mestrado, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2010.

USINAGEM TECH. **Qual o tamanho do mercado brasileiro.** Revista número 6, pagina 8 e 9, novembro 2011.

WOSNIAK, Fabio Augusto. **Análise do Processo de Furação Profunda no Aço AISI 4150.** Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Departamento de Engenharia Mecânica. Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 2011.

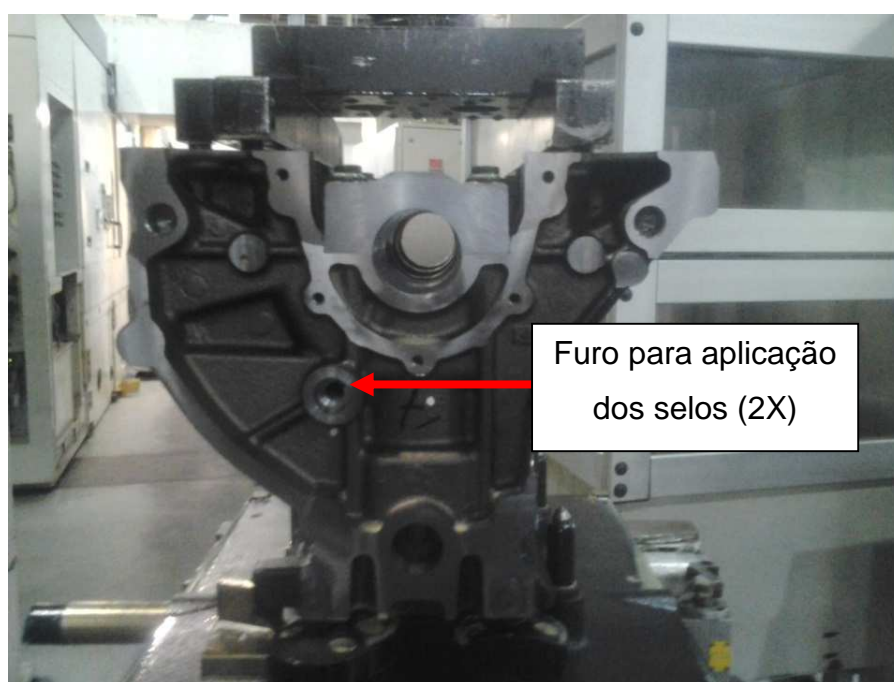
APÊNDICE A – RELATÓRIO DE VISITA TÉCNICA

Relatório de Visita Técnica

Visita técnica realizada na Empresa Renault do Brasil, no setor de usinagem do bloco dos motores, na data de 02 de julho de 2013, acompanhado pelo Técnico de Processos da Renault e o Representante Técnico da Empresa FerSart, fabricante de ferramentas.

Processo apresentado:

Usinagem dos furos para aplicação dos selos d'água nos blocos de motores 1.0 e 1.6.



Material Usinado:

Ferro Fundido Cinzento GG30

Máquina utilizada:

Groob BZ500T, com fluido refrigerante semi-sintético e sistema de fixação em cone hidráulico BT40.

**Processo de usinagem:**

- Velocidade de corte = 80 metros / minuto
- Avanço = 0,1 mm/rot
- Rotação = 1415 rpm
- Tempo de ciclo = 10 segundos por furo

Requisitos de qualidade:

- Diâmetro do furo = $18 \pm 0,035$ mm
- Verdadeira posição = 0,4mm
- Circularidade = 0,02mm
- Cilindricidade = 0,02mm
- Rugosidade = 0,8 Ra
- Profundidade da furação = $10,58 \pm 0,1$ mm