

Ricardo Pimentel

**MELHORIA DO PROCESSO DE FURAÇÃO DE FERRO
FUNDIDO CINZENTO COM BROCAS HELICOIDAIS DE
METAL-DURO**

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

Orientador: Prof. Rolf Bertrand Schroeter, Dr. Eng.

Florianópolis
2014

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

Pimentel, Ricardo Pimentel
MELHORIA DO PROCESSO DE FURAÇÃO DE FERRO FUNDIDO
CINZENTO COM BROCAS HELICOIDAIS DE METAL-DURO / Ricardo
Pimentel Pimentel ; orientador, Prof. Rolf Bertrand
Schroeter, Dr. Eng. - Florianópolis, SC, 2014.
161 p.

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

Inclui referências

1. Engenharia Mecânica. 2. Furação. 3. Brocas de metal-
duro. 4. Ferro fundido cinzento GG25. 5. Otimização da
usinagem. I. , Prof. Rolf Bertrand Schroeter, Dr. Eng.,
II. Universidade Federal de Santa Catarina. Programa de Pós-
Graduação em Engenharia Mecânica. III. Título.

Ricardo Pimentel

**MELHORIA DO PROCESSO DE FURAÇÃO DE FERRO
FUNDIDO CINZENTO COM BROCAS HELICOIDAIIS DE
METAL-DURO**

Esta Dissertação foi julgada adequada para obtenção do Título de “Mestre em Engenharia Mecânica”, e aprovada em sua forma final pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Santa Catarina.

Florianópolis, 27 de Junho de 2014.

Prof. Rolf Bertrand Schroeter, Dr. Eng.
Orientador

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

Banca Examinadora:

Prof. Walter Lindolfo Weingaertner, Dr.-Ing.
Universidade Federal de Santa Catarina

Prof. João Carlos Espíndola Ferreira, Ph.D.
Universidade Federal de Santa Catarina

Prof. Milton Pereira, Dr. Eng.
Instituto Federal de Santa Catarina

Este trabalho é dedicado à minha esposa, filhos, pai, mãe, irmãs e a todos que sempre estiveram ao meu lado.

AGRADECIMENTOS

A Deus por mais esta oportunidade concebida e realização.

Ao Professor Dr. Eng. Rolf Bertrand Schroeder, pela orientação, apoio, confiança e incentivo, meus sinceros agradecimentos.

Aos integrantes do Laboratório de Mecânica de Precisão (LMP), Felipe Gustavo Ebersbach, Felipe Sell, Fabrício Pereira e Vinicius Ferigollo Manfio, pelo grande apoio e proatividade.

Ao Laboratório de Mecânica de Precisão (LMP), Laboratório de Usinagem e Comando Numérico (USICON), Laboratório de Materiais (LABMAT) e Laboratório Central de Microscopia Eletrônica (LCME), por disponibilizar a infraestrutura e dar suporte necessário para a realização deste trabalho.

À Universidade Federal de Santa Catarina, principalmente ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica.

À empresa Rudolph S.A., em especial aos colaboradores Rodrigo Venâncio do laboratório de metrologia, aos preparadores Michel, Cristiano e André, ao técnico de ferramentas Marciano, aos engenheiros Laércio, Maurício e demais funcionários do departamento de engenharia de desenvolvimento de processos que direta ou indiretamente participaram deste trabalho, sem dúvidas a participação de vocês foi primordial para a idealização deste estudo de mestrado.

Aos Srs. Altair Suzena e Zico Rezini, diretor de operações e gerente de engenharia e qualidade, pela oportunidade e pelo apoio prestado e por considerarem este trabalho como uma contribuição para a melhoria dos processos de fabricação da empresa Rudolph S.A., além de acreditarem que iniciativas como essa tornam a empresa mais competitiva no mercado de fornecedor de soluções completas com foco em usinagem.

À Embraco Compressores e Fundição, pelos corpos de prova e pelo suporte técnico.

Aos meus pais, Wilson Pimentel e Rosilete Borges Tomé, pela motivação e conselhos valiosos.

Às minhas irmãs, Dr^a. Rafaela Pimentel e Vitória Tomé Evaristo, por todo o apoio.

À minha amada esposa Jussara e aos meus amados filhos Ricardo Pimentel Filho e Benjamin Pimentel, pela compreensão dos momentos de minha ausência para dedicação a este trabalho, pela motivação constante e apoio, meus sinceros agradecimentos.

Quão melhor é adquirir a sabedoria do que o ouro! e quão mais excelente é adquirir a prudência do que a prata!

(Provérbios 16:16)

RESUMO

A furação é um dos processos mais utilizados dentre os processos de fabricação com ferramentas de geometria de corte definida. Juntamente com o torneamento, é uma das operações mais importantes, envolvendo aproximadamente 33% de todas as operações de usinagem de metal, em especial a furação com o emprego de brocas helicoidais. Assim como o processo de furação, os componentes fundidos possuem grande importância na indústria em função da sua ampla utilização. Atualmente, nota-se um crescimento acentuado e constante da realização de serviços de usinagem em indústrias de fundição, agregando valor a estes componentes. Como geralmente o processo de furação é realizado nos últimos estágios de fabricação, problemas neste processo encarecem a produção devido às perdas indesejadas. Deste modo, a seleção de condições econômicas de usinagem é fundamental na otimização dos processos de fabricação, em um cenário de mercado cada vez mais competitivo, onde qualquer aprimoramento no sentido de aumentar a produção de um processo de usinagem representa um ganho significativo. Neste trabalho foram avaliados dois processos de furação específicos empregados na fabricação de blocos de ferro fundido cinzento GG 25, empregadas em compressores herméticos de refrigeradores. Foram definidas seis diferentes combinações de parâmetros de corte para cada processo de furação ensaiado, utilizando brocas de metal-duro com pontas intercambiáveis e helicoidais inteiriças. O objetivo do trabalho foi analisar estes dois processos de furação e determinar as melhores condições econômicas de usinagem, do ponto de vista de custo e tempo de fabricação por peça. Como critério de fim de vida das brocas foi definido a qualidade dos furos usinados, através do controle dos erros de circularidade verificados ao longo dos ensaios. Os resultados dos dados de circularidade, econômicos e de vida das ferramentas comprovaram que a variação dos parâmetros de corte influenciou consideravelmente os dados de saída avaliados. Além disso, através da seleção econômica evidenciou-se um ganho na ordem de 10% no tempo e custo de fabricação das brocas com pontas intercambiáveis de metal-duro e um ganho na ordem de 20% no tempo e custo de fabricação das brocas helicoidais inteiriças de metal-duro.

Palavras-chave: Furação, broca de metal-duro, ferro fundido cinzento GG25, otimização da usinagem.

ABSTRACT

Drilling is one of the most used machining processes among others manufacturing processes with cutting tools geometry defined. Along with the turning, drilling is one of the most important operations, involving approximately 33% of all metal cutting operations, specially the use of drilling with twist drills. As the drilling process, the cast components are very important in industry due to their extensive application. Currently, there is an intense and constant growth of performance of machining services in foundry industries, adding value to these components. Knowing that the drilling process is usually performed in the last stages of manufacture, problems in the process become more expensive due to production waste. Thus, determination of economic conditions of machining is critical to improve manufacturing processes, facing conditions increasingly competitive markets, in which any improvement to enhance the production of a machining process represents a significant gain. This study appraised two drilling processes used in the manufacture of castings of GG25 gray cast iron, applied in hermetic compressors for refrigerators. It was defined six different combinations of machining parameters for each drilling process, using carbide drills with indexable insert and solid twist drills. The aim is to analyze the two processes of drilling and determine the best economic conditions of machining, both minimum cost and maximum production per piece. The criterion for the end of life of drills set was quality of drilled holes, measuring roundness errors found during testing. The results of data of roundness, economics and life of the tools proved that the variation of cutting parameters has significantly influenced the output data evaluated. In addition, the economic selection showed a gain in the order of 10% in time and cost of manufacturing of drills with carbide indexable insert and a gain in the order of 20% in time and cost of manufacturing with solid twist carbide drills.

Keywords: Drilling, carbide drill, GG25 gray cast iron, optimization of machining.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Morfologia da grafita (ferro fundido cinzento).	35
Figura 2 - Propriedades mecânicas dos ferros fundidos cinzentos.	36
Figura 3 - Influência do percentual de ferrita/perlita na usinabilidade do aço (broca de metal-duro).	39
Figura 4 - Influência do percentual de cementita da perlita na vida da ferramenta (broca de aço rápido, $f = 0,229\text{mm}$).	40
Figura 5 - Alternativas do processo de furação segundo DIN8589.....	42
Figura 6 - Brocas Chatas.....	43
Figura 7 - Brocas helicoidais.	44
Figura 8 - Broca helicoidal com ponta intercambiável de metal-duro...44	
Figura 9 - Brocas escalonadas.	45
Figura 10 - Brocas de centro.	45
Figura 11 - Brocas com insertos intercambiáveis.	46
Figura 12 - Broca helicoidal com haste cilíndrica.	47
Figura 13 - Geometria da região cortante de uma broca helicoidal.....47	
Figura 14 - Espessura do cavaco e ângulo de ponta (σ).....49	
Figura 15 - Ângulo de incidência (α) e do gume transversal (ψ).50	
Figura 16 - Tipos de ângulo de hélice (δ).....51	
Figura 17 - Exemplo de broca com ponta intercambiável.	52
Figura 18 - Princípio de corte no gume principal de brocas helicoidais..53	
Figura 19 - Profundidade de corte no processo de furação.	54
Figura 20 - Diagrama de dureza-tenacidade dos materiais de ferramentas de corte.	56
Figura 21 - Classes de metal-duro, recomendações e aplicação.	57
Figura 22 - Principais desgastes presentes nas brocas.	59
Figura 23 - Localização das marcas de desgaste no flanco da broca.....60	
Figura 24 - Distribuição dos mecanismos de desgaste em função da temperatura de corte.	62
Figura 25 - Desvios geométricos na operação de furação.	63
Figura 26 - Erro de circularidade.	64
Figura 27 - Representação de uma tolerância “t” de cilíndricidade.65	
Figura 28 - Concavidade, convexidade e conicidade, respectivamente.65	
Figura 29 - Custos de fabricação por peça e elementos de custos envolvidos.	68
Figura 30 - Representação do intervalo de máxima eficiência (IME). ..71	
Figura 31 - Influência dos limites dos parâmetros de corte sobre a faixa de otimização.....72	
Figura 32 - Máquina-ferramenta utilizada nos ensaios.....73	

Figura 33 - Broca com ponta intercambiável.	74
Figura 34 - Broca helicoidal inteira.	74
Figura 35 - Circularímetro <i>Mitutoyo</i> 211-843D utilizado para medição do erro de circularidade dos furos de diâmetro 15,50mm.	76
Figura 36 - Máquina MMC <i>Carl Zeiss</i> Contura G2 utilizada para medição do erro de circularidade dos furos de diâmetro 5,40mm.	77
Figura 37 - Corpo de prova e localização dos furos.	79
Figura 38 - Micrografia de uma região do núcleo da amostra, onde se verificam as grafitas lamelares e a matriz metálica, sem ataque.	81
Figura 39 - Micrografia de uma região do núcleo da amostra, onde se verificam as grafitas lamelares e a matriz perlítica, ataque nital 2%.....	81
Figura 40 - Seção do corpo de prova para obtenção da dureza Brinell (HB)	82
Figura 41 - Sequência de realização dos experimentos.	83
Figura 42 - (a) Suporte montagem tipo weldon com cone Sk40; (b) Suporte montagem tipo térmico com cone Sk40.	86
Figura 43 - Representação esquemática das regiões de medição do erro de circularidade para o furo de 15,50mm.	87
Figura 44 - Representação esquemática das regiões de medição do erro de circularidade para o furo de 5,40mm.	87
Figura 45 - (a) Medição de circularidade do furo de 15,50mm no circularímetro. (b) Medição de circularidade do furo de 5,40mm na MMC.	88
Figura 46 - Exemplo de gráfico resultante da medição de circularidade dos furos de 5,40mm.	89
Figura 47 - Exemplo de gráfico resultante da medição de circularidade dos furos de 15,50mm.	89
Figura 48 - Microscópio eletrônico de varredura utilizado para avaliação das ferramentas.	90
Figura 49 - Curva de comportamento da circularidade para os furos de 15,50mm.	93
Figura 50 - Capabilidade da circularidade do furo de 15,50mm para a velocidade de corte de 85m/min.	95
Figura 51 - Capabilidade da circularidade do furo de 15,50mm para a velocidade de corte de 130m/min.	95
Figura 52 - Capabilidade da circularidade do furo de 15,50mm para a velocidade de corte de 150m/min.	96
Figura 53 - Curva de comportamento da circularidade para os furos de 5,40mm.	97
Figura 54 - Capabilidade do erro de circularidade do furo de 5,40mm sob velocidade de corte de 70m/min.	99

Figura 55 - Capabilidade do erro de circularidade do furo de 5,40mm sob velocidade de corte de 90m/min.	99
Figura 56 - Capabilidade do erro de circularidade do furo de 5,40mm sob velocidade de corte de 125m/min.	100
Figura 57 - Números de furos produzidos e comprimento usinado nos ensaios das brocas de ponta intercambiável.	101
Figura 58 - Gráfico do tempo de vida para avanços de 0,27 e 0,32mm e velocidades de corte 85, 130 e 150m/min.	102
Figura 59 - Curva de vida linearizada com de 0,27mm e velocidades de corte 85, 130 e 150m/min.	104
Figura 60 - Números de furos produzidos e comprimento usinado nos ensaios das brocas helicoidais inteiriças.	106
Figura 61 - Curva de tempo de vida para avanços de 0,21 e 0,28mm e velocidades de corte 70, 90 e 125m/min.	107
Figura 62 - Curva de vida linearizada sob avanço de 0,21mm e velocidades de corte 70, 90 e 125m/min.	108
Figura 63 - Custo de fabricação e elementos de custo por peça.	111
Figura 64 - Custo de fabricação e elementos de custo por peça.	114
Figura 65 - Micrografia da broca de ponta intercambiável após o ensaio 5.	116
Figura 66 - Micrografia da broca helicoidal inteiriça após o ensaio 12....	116

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Usinabilidade para diferentes ferros fundidos.	40
Tabela 2 - Parâmetros de usinagem recomendados para brocas em metal-duro e aço-rápido.	53
Tabela 3 - Critérios de fim de vida para as ferramentas ensaiadas.	75
Tabela 4 - Parâmetros de corte definidos para os ensaios.	78
Tabela 5 - Composição química do ferro fundido cinzento utilizado no estudo.....	80
Tabela 6 - Comparativo da porcentagem de perlita, distribuição, tamanho e forma da grafita do material utilizado nos ensaios e da norma do fofo GG-25.	80
Tabela 7 - Dureza (HB) média encontrada nos corpos de prova.	82
Tabela 8 - Dados das constantes da Equação de Taylor.	104
Tabela 9 - Dados das constantes da Equação de Taylor.	109
Tabela 10 - Informações de lote, tempos e custos para as brocas com ponta intercambiável.	110
Tabela 11 - Resultados das condições econômicas para o avanço de 0,27mm.	110
Tabela 12 - Resultados dos custos e tempos de fabricação por peça para todos os ensaios das brocas de pontas intercambiáveis.	112
Tabela 13 - Informações de tempos e custos das brocas helicoidais inteiriças.	113
Tabela 14 - Resultados das condições econômicas para o avanço de 0,21mm.	113
Tabela 15 - Resultados dos custos e tempos de fabricação por peça de todos os ensaios das brocas helicoidais inteiriças.	115

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
<i>apud</i>	Citado por, conforme ou segundo
ASTM	<i>American Society for Testing and Materials</i>
ASQC	<i>American Society for Quality Control</i>
DIN	<i>Deutsches Institut für Normung</i>
<i>et al</i>	Mais de dois autores
FoFo	Ferro Fundido
GG	Ferro Fundido Cinzento (Norma Alemã)
GP	Gume principal
GT	Gume transversal
HB	<i>Hardness Brinell</i>
IME	Intervalo de máxima eficiência
ISO	<i>International Standardization Organization</i>
LCME	Laboratório Central de Microscopia Eletrônica
LMP	Laboratório de Mecânica de Precisão
MEV	Microscópio Eletrônico de Varredura
NBR	Norma Brasileira
UFSC	Universidade Federal de Santa Catarina

LISTA DE SÍMBOLOS

Letras maiúsculas

C_V	[min]	Vida T para uma velocidade de corte v_c
D	[mm]	Diâmetro da broca
Fe_3C	[--]	Carboneto de Ferro (cementita)
K_F	[\$]	Custo de fabricação por peça
K_{ML}	[\$/h]	Custo de máquina e operador por hora
K_{WT}	[\$]	Custo de ferramenta por vida
L_f	[mm]	Vida da ferramenta medida em percurso de avanço
Si_3N_4	[--]	Nitreto de silício
TiAlN	[--]	Nitreto de titânio alumínio
TiN	[--]	Nitreto de titânio
nc-TiAlN	[--]	Nanocomposto multicamada de nitreto de titânio alumínio em matriz de nitreto de silício
Ra	[μ m]	Rugosidade média
T	[min]	Vida da ferramenta
T_{ok}	[min]	Vida da ferramenta de ótimos custos
T_{oz}	[min]	Vida da ferramenta para ótimo tempo de produção
kW	[--]	Quilowatts
F_c	[N]	Força inercial centrífuga

Letras minúsculas

a_p	[mm]	Profundidade de corte
b	[mm]	Largura da usinagem
f	[mm]	Avanço da broca
h	[mm]	Espessura da usinagem
k	[--]	Constante para toda faixa de velocidade de corte
l	[mm]	Comprimento do furo usinado
m	[--]	Tamanho do lote de peças
n	[rpm]	Rotação
t_c	[min]	Tempo total de fabricação de uma peça
t_h	[min]	Tempo principal
t_n	[min]	Tempo secundário de usinagem

t_r	[min]	Tempo de preparação da máquina
t_w	[min]	Tempo de troca de ferramenta
V_c	[m/min]	Velocidade de corte
V_{cok}	[m/min]	Velocidade de corte de ótimos custos
V_{coz}	[m/min]	Velocidade de corte para ótimo tempo de produção

Letras gregas

α	[°]	Ângulo de incidência
γ	[°]	Ângulo de saída
δ	[°]	Ângulo de hélice
σ	[°]	Ângulo da ponta da broca
ψ	[°]	Ângulo do gume transversal
ω	[rad/s]	Velocidade angular

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	28
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	33
2.1 O PROCESSO DE USINAGEM.....	33
2.2 FERRO FUNDIDO CINZENTO.....	34
2.2.1 Usinabilidade do ferro fundido cinzento	37
2.3 PROCESSO DE FURAÇÃO.....	41
2.3.1. Brocas helicoidais	46
2.3.2 Brocas com pontas intercambiáveis	51
2.3.3 Parâmetros de corte e variáveis do processo de furação	52
2.3.4 Materiais para ferramentas de furação	55
2.4 CRITÉRIOS DE FIM DE VIDA.....	58
2.4.1 Tipos de desgastes e avarias em brocas	58
2.4.2 Causas e mecanismos de desgastes	61
2.4.3 Desvios geométricos na operação de furação	63
2.4.4 Erro de Circularidade	64
2.4.5 Erro de Cilindricidade	65
2.5 HISTÓRICO E FUNDAMENTOS DOS ESTUDOS DE CUSTO DA USINAGEM.....	66
2.5.1 Condições econômicas de usinagem	66
3 MATERIAIS E MÉTODOS	73
3.1 MÁQUINA-FERRAMENTA.....	73
3.2 CARACTERIZAÇÃO DAS FERRAMENTAS.....	73
3.3 CRITÉRIOS DE FIM VIDA DAS BROCAS.....	75
3.4 PARÂMETROS DE CORTE.....	77
3.5 MEIO LUBRIRREFRIGERANTE UTILIZADO.....	78
3.6 CORPOS DE PROVA.....	79
3.7 CARACTERÍSTICAS MECÂNICAS E COMPOSIÇÃO QUÍMICA.....	79
3.8 ANÁLISE MICROESTRUTURAL.....	80
3.9 DUREZA.....	82
4 PLANEJAMENTO E EXECUÇÃO EXPERIMENTAL	83
4.1 PRÉ-ENSAIOS DE FURAÇÃO.....	84
4.2 ENSAIOS DE FURAÇÃO.....	85
4.3 FIXAÇÕES DO CORPO DE PROVA E DAS FERRAMENTAS...85	

4.4 AVALIAÇÃO DA CIRCULARIDADE DOS FUROS.....	86
4.5 AVALIAÇÃO DA CONDIÇÃO FINAL DAS BROCAS.....	90
5 APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS.....	91
5.1 ANÁLISE DA CIRCULARIDADE DOS FUROS.....	92
5.1.1 Circularidade dos furos de diâmetro 15,50mm.....	92
5.1.2 Circularidade dos furos de diâmetro 5,40mm.....	97
5.2 RESULTADOS E ANÁLISES DA VIDA DAS FERRAMENTAS.....	100
5.2.1 Vida das brocas de ponta intercambiável.....	100
5.2.2 Vida das brocas helicoidais inteiriças.....	105
5.3 ANÁLISE ECONÔMICA.....	109
5.3.1 Condições econômicas para as brocas com ponta intercambiável.....	109
5.3.2 Condições econômicas das brocas helicoidais inteiriças.....	113
5.4 ANÁLISE DAS BROCAS.....	115
6 CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	119
6.1 CONCLUSÕES.....	119
6.2 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	121
REFERÊNCIAS.....	123
APÊNDICE A - Resultado das medições das brocas empregadas nos ensaios de furação.....	131
APÊNDICE B - Especificações técnicas do meio lubrificarrefrigerante empregado nos ensaios.....	133
APÊNDICE C - Gráficos de circularidade dos furos de 15,50mm a profundidades de 8, 24 e 41mm, sob velocidades de corte de 85, 130 e 150m/min e avanços de 0,27 e 0,32mm, nas condições de início e fim de vida.....	135
APÊNDICE D - Testes de ANOVA dos valores de circularidade dos furos de 15,50mm.....	143
APÊNDICE E - Testes de ANOVA dos valores de circularidade dos furos de 5,40mm.....	147
APÊNDICE F - Gráficos de circularidade dos furos de 5,40mm a profundidades de 1,5, 3,5 e 5mm, sob velocidades de corte de 70, 90	

e 125m/min e avanços de 0,21 e 0,28mm, nas condições de início e fim de vida.....	151
APÊNDICE G - Teste de ANOVA para as curvas de vida sob avanço de 0,27mm e 0,32mm.....	155
APÊNDICE H - Teste de ANOVA para as curvas de vida sob avanço de 0,21mm e 0,28mm.....	157
APÊNDICE I – Imagens das brocas ao final dos ensaios.....	146

1 INTRODUÇÃO

Componentes de ferro fundido possuem ampla utilização devido às suas propriedades mecânicas, custo relativamente baixo e facilidade de fabricação (NORTON, 2004). Dentro desse contexto, nota-se em âmbito mundial, um crescimento acentuado e constante da realização dos serviços de usinagem em indústrias de fundição, agregando a estes componentes um maior valor (MORAES, 2005). Esta tendência resulta no aumento da competitividade entre as empresas para que sobrevivam em um mercado dinâmico e cada vez mais acirrado.

A racionalização dos processos de fabricação se destaca como um dos fatores cruciais e que mais influenciam nos custos e qualidade dos produtos. No entanto, tornar os processos de usinagem mais rápidos, práticos e eficientes têm sido os desafios a serem superados a cada dia pelos engenheiros, pesquisadores e demais profissionais da área.

Na fabricação de blocos de ferro fundido cinzento, como por exemplo os de compressores herméticos para refrigeradores, boa parte das operações clássicas da usinagem convencional, tais como furação, fresamento, alargamento, rosqueamento, rebaixamento e chanframento, são empregadas. Dentre estas, as operações de furação representam aproximadamente 35% do tempo efetivo de corte, o que torna esta operação de grande impacto sobre os custos de fabricação deste tipo de produto (BOEIRA, 2010).

O processo de furação é um dos processos mais comumente encontrados na indústria. Juntamente com o torneamento, é uma das operações mais importantes, envolvendo aproximadamente 33% de todas as operações de usinagem de metal. É realizada normalmente nos últimos estágios de fabricação de uma peça, quando uma grande quantidade de tempo e dinheiro já foi gasta, devendo assim apresentar muita confiabilidade (KÖNIG e TONSHOFF, 1994). O domínio do processo de furação é, portanto, de suma importância, visto representar papel importante na qualidade e nos custos dos produtos, principalmente para grandes lotes de peças usinadas. Estima-se que 60% de todas as aplicações de furação na indústria metal-mecânica referem-se a furos curtos, com uma profundidade de até 2,5 vezes o diâmetro da ferramenta (CASTILLO, 2005).

Atualmente, a tendência do desenvolvimento do processo de furação é, como em outras operações de usinagem, no sentido de aumentar a produtividade e o grau de automação. Avanços tecnológicos são observados, como os novos conceitos de geometrias e revestimentos que visam proporcionar um aumento na vida da ferramenta e nas taxas

de avanço, resultando em uma melhor relação entre custo e produtividade.

O ferro fundido cinzento é um material que possui boas características para usinagem, como baixa dureza, relativa ductilidade e produção de cavacos segmentados, principalmente devido à existência de veios de grafite. Devido a essas características, a força de corte é relativamente baixa e o desgaste da ferramenta é economicamente aceitável para velocidades e avanços altos (MACHADO *et al*, 2009).

O tema principal deste trabalho está em otimizar os meios produtivos, sem comprometer a qualidade do produto. As análises dos dados e informações coletadas deverão mostrar a possibilidade de redução do consumo de bens e recursos para uma mesma produção ou produzir mais com os mesmos recursos.

O uso otimizado de máquinas e ferramentas exerce uma influência importante nos custos de fabricação das empresas, porque se o aproveitamento do equipamento não for otimizado, resultará em custos mais elevados para a produção e, nesta cadeia, novos recursos serão exigidos, com investimentos na produção de bens que poderiam ser utilizados adequadamente em novas oportunidades de negócios.

Diante deste fato, intensifica-se a relevância do tema e importância das ferramentas de corte sobre o tempo de usinagem, refletindo diretamente nos custos totais de produção. Otimizar a sua aplicação, explorando ao máximo o tempo de fabricação, não é apenas uma questão de racionalidade, mas também de competitividade.

Assim, o aprimoramento dos processos produtivos é uma questão de sobrevivência para as empresas que pretendem alcançar ou manter a vanguarda tecnológica em seu segmento, uma vez que a busca incansável por inovação pode ser a chave para o sucesso, ou o contrário, determinar o fracasso do negócio. Esta tendência de inovar provoca a procura por tecnologias existentes atreladas ao conhecimento científico disponível. No entanto, nota-se que o bom nível de pesquisas na área nem sempre chega ao ambiente industrial, visto existirem grandes dificuldades na determinação dos valores ótimos para as condições de usinagem dentro de um contexto de produção seriada. Dessa forma, normalmente a indústria limita-se à utilização de valores sugeridos e que raramente são melhorados pela realização de ensaios prévios de usinabilidade ou critérios de otimização econômica (GROOVER, 2007).

A idealização deste trabalho se faz em uma parceria com uma empresa do ramo metal-mecânico e o Laboratório de Mecânica de Precisão (LMP) da UFSC. A empresa parceira tem grande interesse no desenvolvimento da pesquisa nas operações de furações de blocos de

ferro fundido cinzento, com o intuito de aprimorar o conhecimento da sua linha produtiva.

O objetivo geral deste trabalho é estudar duas operações de furação de um bloco de ferro fundido cinzento GG 25, através da aplicação de tecnologias avançadas e disponíveis no mercado, visando à otimização de tempos e custos.

Como objetivos específicos busca-se auferir, através de ensaios, as melhores condições de usinagem para a máxima produção e o mínimo custo do processo de furação de blocos em ferro fundido cinzento. Para tanto, a equação de Taylor simplificada e as análises sobre economia da usinagem, que permitem mensurar quantitativamente os custos e tempos de produção para as respectivas operações de furação, são empregadas. Além disso, é avaliada como grandeza de saída do processo a circularidade dos furos.

A aplicação da metodologia proposta neste trabalho sugere um avanço na produtividade e redução dos custos de fabricação através da racionalização dos processos, ou seja, sem a necessidade de investimentos em novos maquinários ou ferramental. Dessa forma, a conferência da validação do estudo é realizada nos ensaios de furação, em condições idênticas ao chão de fábrica, com o emprego de brocas helicoidais em metal-duro com dois diferentes conceitos (inteiriça e ponta intercambiável).

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A revisão bibliográfica a seguir visa uma abordagem geral aos assuntos pertinentes à furação do ferro fundido cinzento. Deste modo, são descritas as particularidades do processo de furação, com foco nas geometrias de ferramentas de corte estudadas nesta pesquisa, dos ferros fundidos cinzentos, bem como dos erros de forma em furos usinados e seleções econômicas de usinagem.

2.1 O PROCESSO DE USINAGEM

Fabricar trata-se basicamente de provocar alterações na matéria-prima com o objetivo de obter-se um produto acabado. Quando envolvem mudança de forma, os processos de fabricação podem ser classificados em três categorias: fabricação com remoção de material, fabricação sem remoção de material e fabricação com adição de material. Na terceira categoria um exemplo é o processo de soldagem, enquanto que a primeira e segunda categorias são compostas pelos processos de usinagem com geometria definida, não-definida, processos não-convencionais de usinagem e o processo de conformação (KÖNIG e KLOCKE, 2002).

Devido à sua flexibilidade quanto às características do processo que ela compreende e à geometria que se pode obter na peça, a usinagem é o processo mecânico de remoção de material largamente utilizado na indústria. De acordo com Ferraresi (1970), entende-se que a usinagem é um processo que confere à peça forma, dimensões e acabamento através da remoção de material sobressalente na forma de cavacos.

A importância dos processos de fabricação que envolvem remoção de material pode ser mensurada pelo custo envolvido nestes. Uma avaliação de Trent e Wright (2000) indica o processo de usinagem como o mais usado na indústria do ramo metal-mecânico, com custos associados superiores a 15% do valor de todos os produtos manufaturados nos países industrializados.

A ampla utilização dos processos de usinagem deve-se principalmente à variedade de geometrias possíveis de serem usinadas, com alto grau de precisão dimensional e acabamento da superfície satisfatório. De fato, estas características fazem com que, na grande maioria dos casos, os processos de usinagem simplesmente não possam ser substituídos por nenhum outro processo de fabricação e em muitos

casos sejam usados com o intuito de prover uma melhora do acabamento da superfície ou tolerância dimensional do produto.

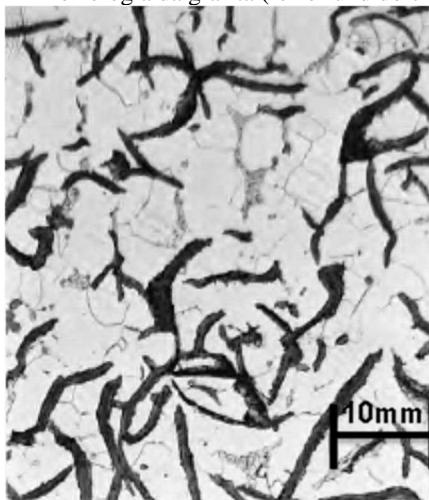
Os processos de usinagem apresentam, entretanto, algumas desvantagens, por exemplo, a baixa velocidade de produção. Devido a este fato, qualquer aprimoramento no sentido de aumentar a produção de um processo de usinagem representa um ganho significativo. Outra desvantagem dos processos de usinagem são os altos custos envolvidos, devido ao uso de maquinário e ferramental com elevado custo e à necessidade de mão de obra altamente especializada, tanto na programação quanto na operação das modernas máquinas de comando numérico. Estes altos custos relacionados aos processos de usinagem tornam-se ainda mais importantes quando associados ao fato de que o processo de usinagem é um dos processos de fabricação mais utilizado no mundo (TRENT e WRIGHT, 2000).

2.2 FERRO FUNDIDO CINZENTO

No ferro fundido cinzento os elementos de liga fundamentais são o carbono e o silício, apresentando também uma estrutura em que uma parcela relativamente grande do carbono está no estado livre (grafita) e outra parcela no estado combinado (Fe_3C). Deste modo, este material é composto por uma liga ferro, carbono e silício, possuindo excelente usinabilidade, resistência mecânica satisfatória, boa resistência ao desgaste, boa capacidade de amortecimento de vibrações e, dentre os ferros fundidos, o mais utilizado (CHIAVERINI, 2012).

Os ferros fundidos são comumente diferenciados pela forma da sua grafita. O ferro fundido cinzento possui as grafitas sob a forma lamelar, distribuídas de forma aleatória. Na Figura 1 é possível verificar a distribuição e forma da grafita deste material.

Figura 1 - Morfologia da grafita (ferro fundido cinzento).



FONTE: Callister (2005).

As extremidades afiadas e pontiagudas da grafita agem como concentradores de tensão. Devido a isso, o ferro fundido cinzento é frágil quando submetido à tração, essa fragilidade não se deve apenas à grafita, mas também a indeformabilidade da cementita (BASTOS, 2005). A grafita apresenta dureza relativamente baixa quando comparada com os constituintes da matriz. Isto produz descontinuidades, facilitando a quebra do cavaco durante a usinagem (GUEDES *et al*, 1987).

Outro aspecto envolvendo este material é que a sua microestrutura apresenta a grafita na forma lamelar interconectada, razão para a boa condutividade térmica. Por outro lado, certos parâmetros de resistência mecânica, como ductilidade e tenacidade, são afetados pela presença de descontinuidades na matriz, que conferem a este material um comportamento frágil também quando submetido ao carregamento dinâmico imposto por altas taxas de deformação (COLPAERT, 1974).

Na Figura 2 são mostradas as propriedades mecânicas e composição química do ferro fundido cinzento, segundo a norma ABNT NBR 6589 / 1986:

Figura 2 - Propriedades mecânicas dos ferros fundidos cinzentos.

NORMA CINZENTO (GRAFITA LAMELAR)					
EQUIVALÊNCIA	ABNT NBR 6589/ NBR 8391	FC-150	FC-200	FC-250	FC-300
	ASME SA-278	CL-20	CL-25	CL-35	CL-40
	ASTM A-48	20	25	30 / 35	45
	DIN EN 1561	EN-GJL-150	EN-GJL-200	EN-GJL-250	EN-GJL-300
	SAE J-431	G-1800	G-2500	G-3000	G-3500
	DIN 1691	GG-15	GG-20	GG-25	GG-30
COMPOSIÇÃO QUÍMICA (%)	C (A)	2,80 - 3,40	3,00 - 3,60	2,80 - 3,40	3,00 - 3,30
	Si	1,80 - 2,80	1,90 - 2,40	1,80 - 2,80	1,90 - 2,40
	Mn (A)	0,30 - 1,00	0,60 - 0,90	0,30 - 1,00	0,40 - 0,90
	P	0,20 Máx	0,15 Máx.	0,15 Máx.	0,15 Máx.
	S	0,10 Máx	0,15 Máx.	0,10 Máx.	0,15 Máx.
	Cr (A)	0,30 Máx	0,25 - 0,40	0,20 - 0,50	0,70 - 1,10
	Cu (A)	0,80 Máx	Opcional 0,30 - 0,60	0,30 - 0,70	0,40 - 0,60
	Ni (A)	-	-	0,30 - 0,70	0,40 - 0,60
	Mo (A)	-	-	Opcional 0,15 - 0,40	0,40 - 0,60
	PROPIEDADES	DUREZA (HB)	150 - 187	170 - 229	187 - 240
RESISTÊNCIA TRACÇÃO MÍN. (MPa)		150	200	250	300
ESCOAMENTO (MPa)		-	-	-	-
ALONGAMENTO (%)		-	-	-	-
MATRIZ PREDOMINANTE		Perlítica/Ferrítica	Perlítica/Ferrítica	Perlítica	Perlítica

FONTE: Chiaverini (2012).

O ferro fundido cinzento possui a maior utilização entre todos os ferros fundidos devido à sua resistência mecânica (até 40Kg/mm²) e ao desgaste, assim como boa usinabilidade. A aplicação deste material apresenta um largo uso em componentes mecânicos, peças estruturais de máquinas e equipamentos pesados sujeitos à vibração, blocos de motores, pistões, cilindros, discos de embreagem e peças fundidas de motores a diesel (CHIAVERINI, 2012).

A estrutura do ferro fundido cinzento, em resumo, apresenta os seguintes constituintes que estão normalmente presentes nos aços: ferrita e perlita, com maior ou menor quantidade de carbono, dependendo da composição química e das condições de resfriamento (CHIAVERINI, 2012).

2.2.1 Usinabilidade do ferro fundido cinzento

A usinabilidade de um material geralmente é avaliada através da vida da ferramenta de corte, força de usinagem, forma dos cavacos e qualidade superficial da peça (KÖNIG e KLOCKE, 2002; STEMMER, 2005). Não é uma propriedade intrínseca do material, mas resulta de uma complexa interação entre as propriedades mecânicas do material da peça, ferramentas de corte e condições de usinagem (KENNAMETAL, 2003 *apud* FERRER, 2006).

De modo geral, para o bom desempenho na usinagem de ferros fundidos, alguns aspectos devem ser observados (MACHADO *et al*, 2009):

- Uma baixa porcentagem de carbono pode levar a dificuldades de usinagem, pois haverá menor porcentagem de veios de grafite e menor indução à fratura de cavacos;
- Microestruturas com alta porcentagem de ferrita e alto teor de silício são mais resistentes mecanicamente, menos dúcteis e têm menor tendência a gerar gume postiço;
- O aumento da perlita aumenta a dureza e a resistência mecânica;
- Quanto mais refinada a estrutura lamelar, pior será a usinabilidade, exigindo menores velocidades de corte e avanços;
- Ferros fundidos cinzentos são mais fáceis de usinar com cavacos curtos e quebradiços, seguidos dos nodulares e maleáveis, com cavacos longos;
- Os principais tipos de desgastes na usinagem de ferro fundido são normalmente a abrasão, a adesão e a difusão.

A seguir, é apresentada a influência dos principais constituintes da matriz do ferro fundido sobre a vida da ferramenta e a usinabilidade (DAWSON, 2001; AFS, 2003 *apud* CASTILLO, 2005):

a) Ferrita: é um constituinte essencialmente livre de carbono. Com exceção da grafita, apresenta dureza mais baixa, se comparada com os demais constituintes, e baixa resistência a tração, mas excelente resistência ao choque e elevado alongamento. Se a ferrita for predominante na matriz metálica do ferro fundido cinzento, a usinabilidade do material é melhor no que tange à força de usinagem.

b) Perlita: é o mais comum constituinte nos ferros fundidos. Apresenta resistência e dureza médias. É composta de uma estrutura fina, alternada de ferrita e carboneto de ferro. Essa estrutura pode variar entre fina e grossa. A estrutura fina é mais dura e é usinada a menores velocidades de corte. A perlita fornece a melhor combinação entre usinabilidade e resistência ao desgaste. Se a perlita for o constituinte predominante na matriz metálica, os ferros fundidos cinzentos apresentarão melhor resistência mecânica.

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

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

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

f) Carbonetos: são constituintes extremamente duros, variando desde simples carbonetos de ferro até complexos carbonetos contendo elementos de liga. Maiores quantidades de carbonetos no ferro fundido, como constituintes livres, causam diminuição da usinabilidade. Uma concentração de 5% de carbonetos livres pode significar uma diminuição significativa na vida da ferramenta. Os carbonetos podem estar presentes nas extremidades das peças fundidas devido ao rápido resfriamento dessas regiões.

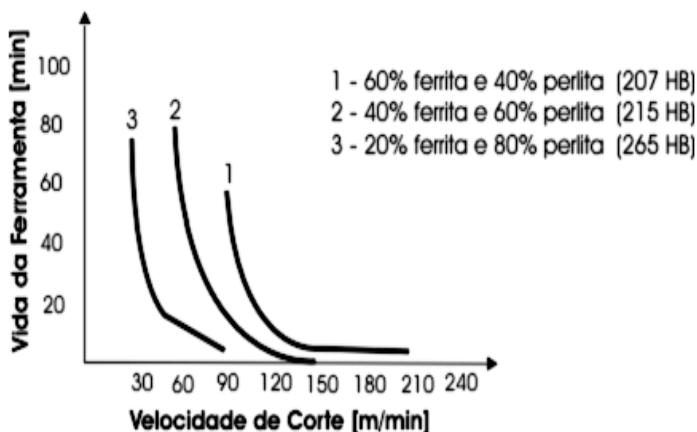
g) Esteadita: é um constituinte duro, formado pela presença de fósforo no ferro fundido. Com um conteúdo de fósforo inferior a 0,2%,

não exerce um efeito significativo na vida da ferramenta. Para concentrações da ordem de 0,4% a usinabilidade é comprometida em operações críticas, tais como rosqueamento. Maiores quantidades de fósforo reduzem significativamente a vida da ferramenta.

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

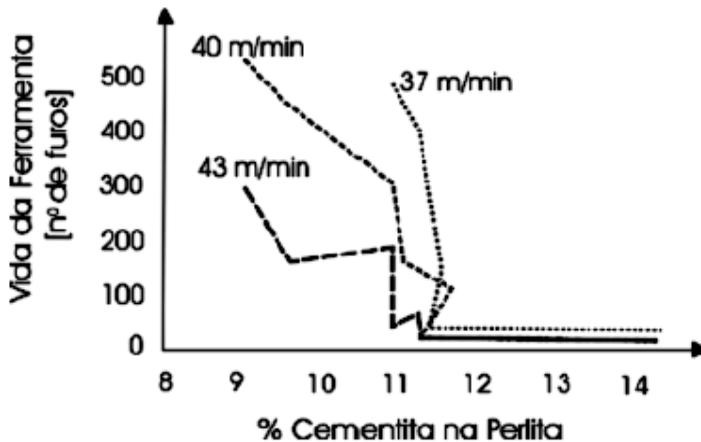
Embora a melhor usinabilidade seja obtida para uma matriz ferrítica, geralmente o ferro fundido cinzento é produzido com uma matriz perlítica para obter maior resistência e dureza. O aumento percentual de perlita na matriz resulta numa redução da usinabilidade, conforme ilustrado na Figura 3, em razão da maior quantidade de cementita presente na estrutura do material. Na Figura 4 é apresentada a influência do teor de cementita na perlita e esses juntos, na usinabilidade do ferro fundido cinzento. Observa-se que o aumento do percentual de cementita na perlita resulta numa redução do número de furos realizados (KAHLES e FIELD, 1964).

Figura 3 - Influência do percentual de ferrita/perlita na usinabilidade do aço (broca de metal-duro).



FONTE: Kahles e Field (1964).

Figura 4 - Influência do percentual de cementita da perlita na vida da ferramenta (broca de aço rápido, $f = 0,229\text{mm}$).



FONTE: Bates (1996).

Guedes, Consalter e Purey (1987) estudaram a usinabilidade dos ferros fundidos, através do processo de torneamento, utilizando um corpo de prova em forma de disco, produzindo assim uma velocidade de corte (v_c) uniformemente acelerada. Na Tabela 1 estão os resultados obtidos neste estudo realizado em diversos tipos de ferros fundidos, além dos índices (%) de usinabilidade dos respectivos materiais.

Tabela 1 - Usinabilidade para diferentes ferros fundidos.

Material	Tratamento Térmico	Dureza (HB Ø1/10 Kgf)	Usinabilidade (%)
Cinzento	Recozimento	198	100
Cinzento ligado	Alívio de tensões	202	42
Nodular Per/Fe	Bruto de fundição	218	34
Nodular Perlítico	Alívio de tensões	225	27
Maleável Preto	Têmpera + revenido	192	27
Maleável Branco	Maleabilização	92-148	31-36

FONTE: Guedes *et al* (1987).

A partir destes resultados verifica-se que o ferro fundido cinzento possui a melhor usinabilidade entre os ferros fundidos. Os autores atribuem isto à influência da morfologia da grafita na usinabilidade,

obtendo-se melhor usinabilidade com a grafita lamelar do ferro fundido cinzento em relação à grafita esferoidal do maleável e do nodular de mesma matriz metálica.

Por sua vez, Mocelin (2002) apresentou a relação de usinabilidade entre o ferro fundido cinzento e o ferro fundido vermicular, ambos os materiais utilizados na fabricação de blocos de motores a combustão, comprovando em seus estudos que a usinabilidade do ferro fundido cinzento é melhor do que a do ferro fundido vermicular.

2.3 PROCESSO DE FURAÇÃO

A furação é um processo mecânico de usinagem destinado à obtenção de um furo geralmente cilíndrico numa peça, com auxílio de uma ferramenta normalmente multicortante (KÖNIG e KLOCKE, 2002).

Para tanto, a ferramenta ou a peça giram e simultaneamente a ferramenta ou a peça se deslocam segundo uma trajetória retilínea, coincidente ou paralela ao eixo principal da máquina (FERRARESI, 1970).

A norma alemã DIN 8589 define a furação como um processo com movimento rotativo principal, ou seja, um processo de usinagem que apresenta movimento de corte circular.

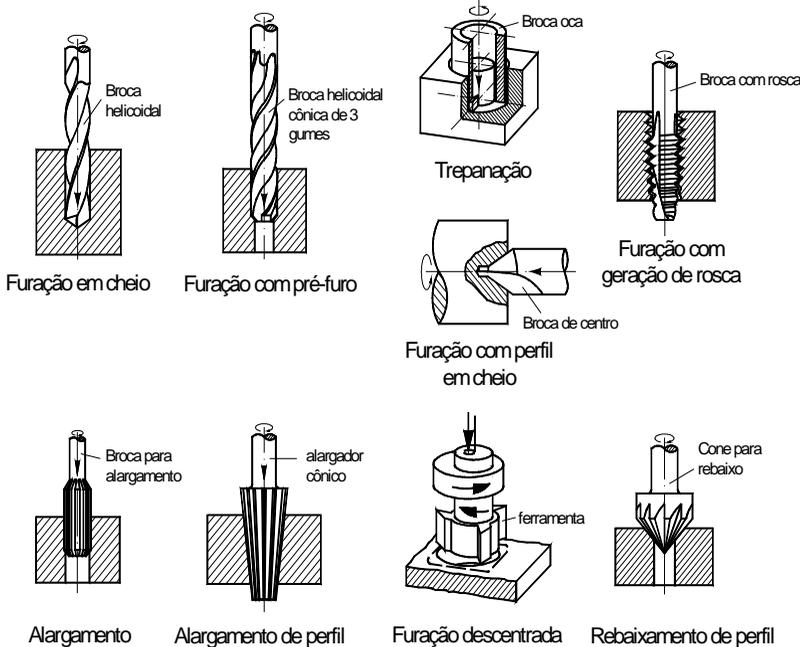
De acordo com Castillo (2005), König e Klocke (2002) e Stemmer (2005), o processo de furação possui algumas características particulares, sendo elas:

- A velocidade de corte é nula no centro da broca, chegando ao seu valor máximo na periferia da ferramenta ou diâmetro máximo da broca;
- O fluido de corte atua como refrigerante, lubrificante e meio de transporte de cavacos, entre outros aspectos;
- Quando apresenta canto vivo, a quina da broca está sujeita a desgastes excessivos;
- Apresenta dificuldades no transporte de cavacos;
- Distribuição inadequada de calor na região de corte;
- O processo de geração de cavaco é de difícil observação;
- As guias da ferramenta se atrim com a parede do furo durante o processo;

As brocas, como qualquer ferramenta de usinagem, têm seu desempenho fortemente afetado por sua geometria, podendo ocorrer situações que se faz necessária uma geometria específica para realizar uma determinada operação de furação (PAIVA, 2007).

O processo de furação pode ser subdividido em diversas operações, entre elas: furação em cheio, escareamento, furação escalonada, furação de centros, trepanação, entre outros. Na Figura 5 são ilustrados alguns exemplos destas aplicações.

Figura 5 - Alternativas do processo de furação segundo DIN8589.



FONTE: Adaptado de König e Klocke (2002).

A escolha de uma broca para a usinagem de um furo qualquer é feita de acordo com as características da operação de furação. Entre as principais especificações técnicas a serem averiguadas tem-se a dureza do material da peça, usinabilidade, furo passante/cego, comprimento do furo, as tolerâncias de forma e posição do furo ou diâmetro, acabamento da superficial, modelo da máquina, tipo de refrigeração disponível, volume de produção, profundidade do furo e detalhes especiais como: rebaixo, rosca, chanfro, raio, entre outros (HALEVI e WEILL, 1995).

Com relação às ferramentas empregadas no processo de furação, existem várias geometrias e conceitos. A seguir, é feita uma sucinta descrição sobre os modelos de brocas mais utilizadas na operação de furação (KÖNIG e KLOCKE, 2002; STEMMER, 2005):

a) Brocas chatas: são as brocas para furar mais antigas, feitas por achatamento a quente de uma parte de uma barra cilíndrica ou por encaixe de uma lâmina com dois gumes principais de corte. Atualmente, elas podem ser encontradas em tornos revólveres ou tornos automáticos, para furação de materiais frágeis. Contudo, o seu emprego é limitado, pois apresenta baixa resistência a momentos torçores e, em furos mais profundos, a remoção de cavacos é bastante deficiente. Na Figura 6 são ilustradas as brocas tipo chata para furar madeira.

Figura 6 - Brocas Chatas.



FONTE: Taegu-tec (2007).

b) Brocas helicoidais: são as brocas mais utilizadas na execução de furos, seja na furação em cheio ou para aumentar o diâmetro de furos existentes. Na Figura 7 são ilustradas as brocas tipo helicoidal. Em geral, essas brocas possuem dois gumes principais, ligados pelo gume transversal.

Figura 7 - Brocas helicoidais.



FONTE: OSG (2012).

c) Brocas helicoidais com ponta intercambiável de metal-duro: são brocas empregadas em aplicações similares às brocas helicoidais inteiriças, no entanto, em processos específicos apresentam um custo por furo menor que as brocas helicoidais inteiriças. Alguns dos fatores para isto acontecer são a maior taxa de remoção de metal ou o menor custo para aquisição da ferramenta ou reafiação dos gumes. Na Figura 8 é ilustrada a broca tipo helicoidal com ponta de metal-duro.

Figura 8 - Broca helicoidal com ponta intercambiável de metal-duro.



FONTE: Taegu-tec (2007).

d) Brocas escalonadas: possuem dois ou mais diâmetros em uma mesma broca padronizada. Geralmente são utilizadas na usinagem de furos para operações combinadas de furação, chanframento ou alargamento. O uso das brocas escalonadas está em crescimento nas indústrias, pois este conceito de broca possibilita a redução do tempo de fabricação, através da junção de operações de usinagem em um mesmo ciclo. Na Figura 9 são ilustradas as brocas tipo escalonadas.

Figura 9 - Brocas escalonadas.



FONTE: OSG (2012).

e) Brocas de centro: geralmente utiliza-se a broca de centro para a confecção de furos de centro em peças de revolução que serão usinadas entre pontas. Na verdade, trata-se de ferramenta combinada de furar e escariar. Na Figura 10 é ilustrada uma broca de centro. Outra aplicação das brocas de centro é na furação de superfícies irregulares ou furação profunda, onde a broca de centro serve como guia para a broca principal, evitando o desvio do furo.

Figura 10 - Brocas de centro.



FONTE: OSG (2012).

f) Brocas com insertos intercambiáveis: as brocas com insertos intercambiáveis representam um dos avanços mais importantes na tecnologia de furação. Na Figura 11 é ilustrada uma broca com insertos intercambiáveis. Entre as suas principais vantagens estão a possibilidade de aumento da produtividade, a redução dos custos e uma maior versatilidade.

Figura 11 - Brocas com insertos intercambiáveis.



FONTE: Taegu-tec (2007).

Existem outros tipos de brocas e geometrias, uma vez que as tecnologias de ferramentas para furação, por consequência da melhoria contínua e inovação tecnológica, evoluem ano a ano. Isto se deve ao extenso número de pesquisas nesta área, bem como ao vasto mercado de aplicação deste processo.

2.3.1. Brocas helicoidais

As principais vantagens das brocas helicoidais são (FISCHER, 2005):

- Mantêm o diâmetro nominal dentro da tolerância, mesmo com as reafiações;
- Possuem a capacidade de auto centragem;
- Apresentam facilidade de montagem;

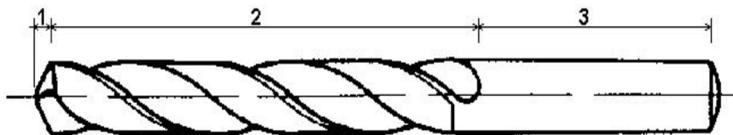
A Figura 12 ilustra uma vista da broca helicoidal com as suas partes básicas, sendo elas:

1) Ponta: região onde se localizam o gume principal e secundário de corte. Através de uma análise mais detalhada na ponta da broca é possível descobrir a complexidade geométrica desta ferramenta;

2) Corpo: parte da broca que contém os canais helicoidais;

3) Haste: região para a fixação da ferramenta. A sua geometria dependerá do acessório e tipo de fixação, por exemplo, poderá ser haste cilíndrica para montagem em mandril térmico, hidráulico ou pinça.

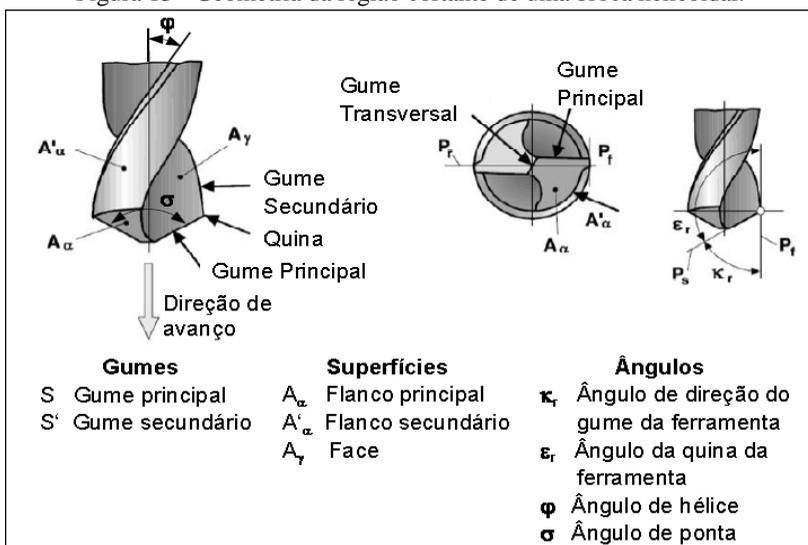
Figura 12 - Broca helicoidal com haste cilíndrica.



FONTE: Watson (1985).

Na Figura 13 são ilustradas as formas construtivas mais complexas que compõem uma broca tipo helicoidal, segundo as normas DIN 6581 e DIN ISO 5419:

Figura 13 - Geometria da região cortante de uma broca helicoidal.



FONTE: Boeira (2010).

A seguir são descritas as características de alguns dos elementos construtivos mostrados na Figura 13 (STEMMER, 2005; DINIZ *et al.*, 2008; NBR 6163 NB205, 1990; DIN 6581, 1985):

a) Canais helicoidais: são os canais por onde ocorre a remoção dos cavacos e a entrada do fluido de corte, caso não haja refrigeração interna.

b) Gume principal: é o elemento que está localizado na parte da ferramenta voltada para o sentido de corte.

c) Gume transversal: liga os dois gumes principais e está situado na ponta da broca. A ação de corte do gume transversal não é eficiente, pois possui ângulo de saída negativo e velocidade de corte baixa, por estar muito próximo ao centro da ferramenta, e provoca o esmagamento do material, empurrando-o para a região dos gumes principais, onde são removidos.

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

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

f) Núcleo: confere rigidez à broca e possui espessura de aproximadamente 0,16 vezes o diâmetro da broca.

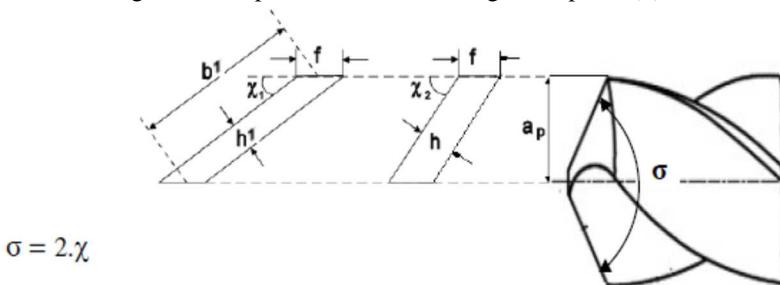
g) Quina: parte relativamente pequena da cunha de corte onde se encontram o gume principal e secundário de corte, onde se formam o ângulo de ponta (σ) da ferramenta.

Outros aspectos de suma importância são os diversos ângulos que compõem uma broca. Figuram-se com o papel de maior relevância na aplicação da broca helicoidal, os seguintes ângulos:

a) Ângulo de ponta (σ): é o ângulo situado entre os gumes principais de corte no plano de referência da ferramenta. A indicação do valor do ângulo de ponta é feita através do tipo de material a ser furado e pelas condições de trabalho. Pequenos ângulos de ponta conduzem a uma boa centragem da broca, isto é, garante uma precisão dimensional do furo. No entanto, ângulos muito pequenos conduzem a um aumento considerável do atrito da broca na parede do furo. Ângulos de ponta

maiores dificultam a centragem da ferramenta, podendo causar desvios do furo (KÖNIG e KLOCKE, 2002). Vale ressaltar que o ângulo de ponta possui relação direta com a espessura (h) e largura (b) do cavaco, conforme ilustrado na Figura 14:

Figura 14 - Espessura do cavaco e ângulo de ponta (σ).



FONTE: Machado *et al* (2009).

Nas Equações 1 e 2 são mostrados os modelos matemáticos que definem a relação entre a espessura (h) e largura (b) do cavaco com o ângulo de ponta (σ):

$$b = \frac{a_p}{\text{sen}\left(\frac{\sigma}{2}\right)} \quad (1)$$

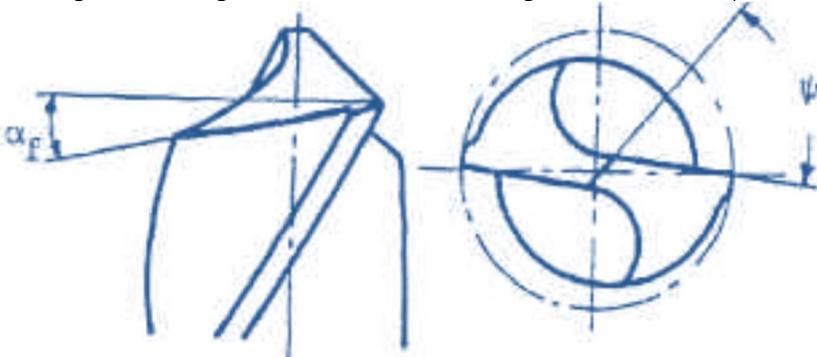
$$h = f \cdot \text{sen}\left(\frac{\sigma}{2}\right) \quad (2)$$

Assim, pode-se concluir que o ângulo de ponta está diretamente relacionado com os mecanismos de formação do cavaco. Outro aspecto é que a ponta da broca é submetida a pressões de corte intensas, na ocorrência da diminuição do ângulo de ponta, o contato da ferramenta com a peça será maior, aumentando a área disponível para dissipação do calor gerado durante a usinagem, influenciando o gradiente e mecanismos de distribuição de temperatura, podendo elevar a vida da ferramenta, bem como uma solitação mecânica por unidade de comprimento do gume cortante menor (DINIZ *et al.*, 2008; FERRARESI, 1970).

b) Ângulo de incidência (α): este ângulo é medido no plano de trabalho conforme ilustrado na Figura 15, e varia usualmente entre 12° e 15° . Valores excessivos deste ângulo causam perda da resistência da cunha da broca e tendência à vibração.

c) Ângulo do gume transversal (ψ): o ângulo do gume transversal (ψ) é definido pelo ângulo de incidência (α), no momento da geração do cone de revolução durante a afiação e é o menor ângulo formado entre os gumes principais de corte e o transversal (STEMMER, 2005).

Figura 15 - Ângulo de incidência (α) e do gume transversal (ψ).



FONTE: Diniz *et al.* (2008).

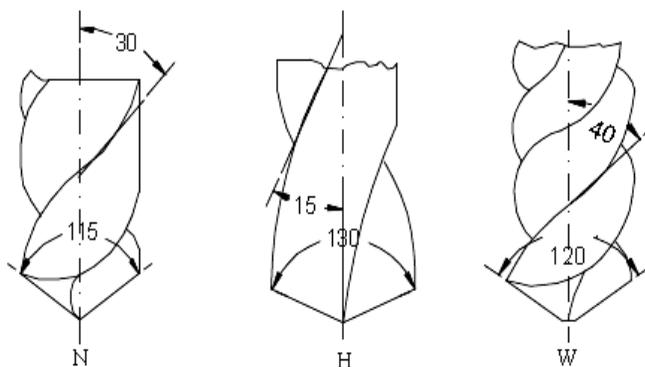
d) Ângulo de saída (γ): é o ângulo entre a superfície de saída e o plano de referência, medido no plano de trabalho da cunha cortante. Varia desde um valor igual ao ângulo de hélice (δ) na periferia até valores negativos no centro da broca. Este ângulo auxilia no escoamento do cavaco (FERRARESI, 1970; NBR 6163, 1990).

e) Ângulo de hélice (δ): o ângulo de hélice (δ) é formado pelos canais da broca. Na Figura 16 são ilustrados os tipos de ângulo de hélice padronizados. A norma DIN1836 classifica três tipos de brocas quanto ao ângulo de hélice, que são respectivamente:

- Tipo N: é para furação de aços ligados e não ligados, ferro fundido cinzento e maleável, níquel e ligas de alumínio de cavacos curtos.

- Tipo H: é para materiais duros e ferro fundido com dureza superior a 240 HB.
- Tipo W: é para materiais dúcteis, como: cobre, alumínio e suas ligas de cavacos longos.

Figura 16 - Tipos de ângulo de hélice (δ).



FONTE: DIN 1836 (1977).

2.3.2 Brocas com pontas intercambiáveis

Um dos avanços mais importantes na tecnologia de furação foi o desenvolvimento de brocas com pontas intercambiáveis. Conforme já citado, estudos mostram que aproximadamente 60% de todas as aplicações de furação na indústria mecânica se referem a furos curtos, com uma profundidade de até 2,5 vezes o diâmetro da broca, sendo que muitos desses furos podem ser usinados com brocas de pontas intercambiáveis.

As principais vantagens das brocas com ponta intercambiável são o aumento da produtividade, a redução dos custos e uma maior versatilidade. Além disto, quando estas ferramentas são utilizadas em máquinas comandadas numericamente, estas brocas trazem a vantagem de não terem suas dimensões alteradas quando as pontas são intercambiadas, não sendo necessário assim redefinir o comprimento inicial ou modificar o programa de execução, devido à eliminação da operação de reafiação.

Um exemplo de broca de ponta intercambiável é apresentado na Figura 17, e destaca-se pela versatilidade e altas taxas de avanço na

usinagem, além da possibilidade de um mesmo corpo de broca utilizar pontas de diferentes diâmetros.

Figura 17 - Exemplo de broca com ponta intercambiável.



FONTE: Iscar (2013).

2.3.3 Parâmetros de corte e variáveis do processo de furação

Os parâmetros de usinagem são elementos fundamentais para o desempenho ideal da ferramenta, obtenção de custos competitivos e excelente qualidade da peça. No processo de furação tem-se:

a) Velocidade de corte (v_c): é a velocidade instantânea do ponto de referência do gume de corte da broca, segundo a direção e o sentido de corte, conforme a direção e sentido do avanço. O valor da velocidade de corte é determinado em função do tipo de material da peça, bem como do material da broca. Baixas velocidades de corte são capazes de levar à formação do gume postiço na ferramenta, podendo ocasionar desgaste prematuro da broca por arranque de material do gume, acarretando assim o seu colapso. Já as altas velocidades de corte normalmente causam desgaste rápido da ferramenta, pois a temperatura de corte gerada pode ser excessiva, a ponto de provocar a perda da capacidade de corte do gume da broca. Na Tabela 2 são apresentadas algumas recomendações encontradas na literatura para obtenção da velocidade de corte aplicada em brocas de metal-duro e aço-rápido na furação do ferro fundido cinzento.

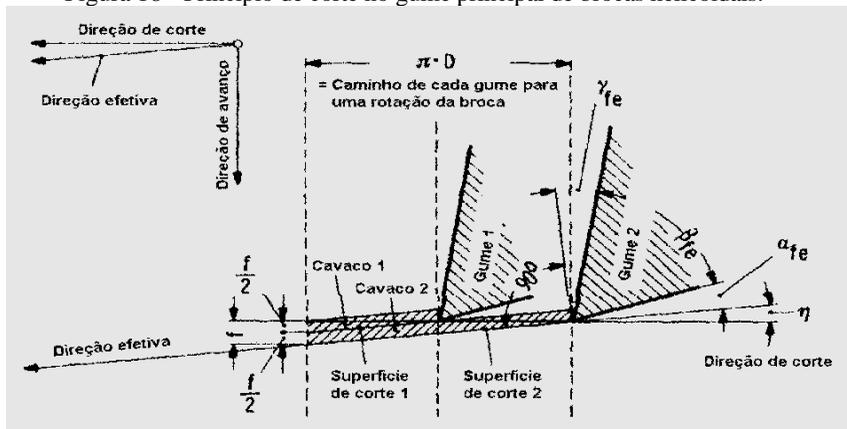
Tabela 2 - Parâmetros de usinagem recomendados para brocas em metal-duro e aço-rápido.

Material	Operação	Aço-rápido	Metal-duro
FoFo cinzento	Furação	15-37m/min	80-167m/min

FONTE: TITEX (2009).

b) Avanço (f): é a trajetória de avanço de cada volta (mm) da broca, assim como acontece na escolha da velocidade de corte são necessários levar em conta alguns critérios fundamentais para a seleção da taxa de avanço (f), pois caso contrário podem conduzir a um colapso ou a quebra da broca. Diante disto, altos avanços aliado as altas velocidades de corte podem ser contrários ao bom desempenho da broca caso não ocorra o escoamento suficiente do volume de cavaco gerado durante a operação. Em contrapartida, avanços muito baixos, contribuem para um desgaste prematuro, porém, com menor influência quando comparado com a velocidade de corte. Na Figura 18 tem-se o processo de corte nas duas partes cortantes do gume principal de uma broca. A superfície de corte, que surge no furo abaixo da ponta de uma broca, é na verdade composta de duas hélices equidistantes entre si pela metade do avanço por rotação, devido ao avanço contínuo da ferramenta. Com esta ação simultânea do movimento principal de corte (rotação) e do avanço, tem-se uma direção efetiva de corte, que é definida pelo ângulo efetivo (η).

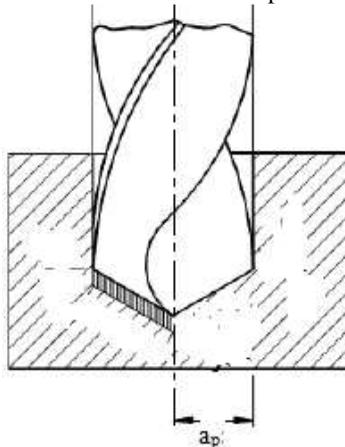
Figura 18 - Princípio de corte no gume principal de brocas helicoidais.



FONTE: König e Klocke (2002).

c) **Profundidade de corte (a_p):** é a profundidade de penetração do gume principal, medida em uma direção perpendicular ao plano de trabalho - Figura 19. Na furação em cheio, corresponde à metade do diâmetro da ferramenta (DINIZ *et al.*, 2008).

Figura 19 - Profundidade de corte no processo de furação.



FONTE: Adaptado Stemmer (2005).

Além dos parâmetros de corte citados, é importante destacar como variável do processo de furação o emprego de meios lubrificantes, os quais têm por finalidade aumentar a vida da ferramenta, a eficiência de remoção de material, melhorar o acabamento de superfície e reduzir a força e potência de corte. Suas funções básicas são refrigeração, lubrificação, proteção contra corrosão, arrastamento dos cavacos e eliminação do gume postiço. A exigência primária feita a um meio lubrificante para o processo de usinagem é que leve a uma redução nos custos de usinagem pela redução do desgaste da ferramenta e melhora da superfície do componente fabricado (KÖNIG e KLOCKE, 2002).

Por fim, é importante destacar que durante a seleção dos parâmetros de usinagem para uma operação de furação, recomenda-se uma avaliação criteriosa envolvendo, no mínimo, os seguintes aspectos:

- Geometria, material e tipo de fixação da broca;
- Profundidade, tolerância e acabamento superficial do furo;
- Material e tipo de fixação da peça;
- Análise da máquina-ferramenta;

2.3.4 Materiais para ferramentas de furação

Os materiais empregados nas ferramentas de corte precisam reunir uma gama de características específicas, que os tornam adequados para a aplicação a que se destinam. É muito importante a definição correta do material da ferramenta de corte, pois uma escolha incorreta pode acarretar eventualmente em prejuízos, que poderiam ser evitados.

Portanto, a seleção do material da ferramenta de corte é um fator importante a ser considerado ao planejar uma operação de usinagem bem-sucedida. Considerando que o conhecimento básico de cada material para ferramentas de corte e seu desempenho é de suma importância para a seleção correta de cada aplicação, na Figura 20 é ilustrado um diagrama das propriedades mecânicas dos principais materiais de ferramentas de corte.

Além disso, as considerações para seleção devem incluir o material da peça a ser usinado, o tipo de operação, exigências dimensionais da peça, os parâmetros de corte, o nível de qualidade superficial para cada operação etc. (SANDVIK COROMANT, 2012).

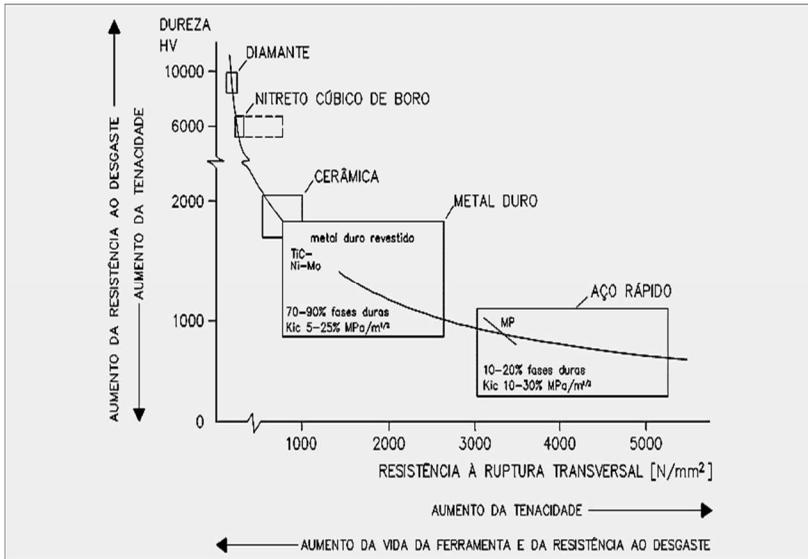
Conforme König e Klocke (2002), as principais propriedades que um material de ferramenta de corte deve apresentar são:

- Dureza;
- Tenacidade;
- Resistência ao desgaste, a compressão, a choque térmico e ao cisalhamento;
- Boas propriedades mecânicas e térmicas a altas temperaturas;
- Inércia química.

MACHADO *et al* (2009) relata que o melhor material de ferramenta de corte não é necessariamente aquele que fornece a maior vida à ferramenta ou possui o menor preço. Fatores como confiabilidade e previsibilidade do comportamento são de extrema importância, principalmente em se tratando de usinagem de materiais nobres e de alto valor agregado.

Na operação de furação as propriedades como resistência ao desgaste e a tenacidade são as principais características exigidas da ferramenta. Os motivos são devido ao mecanismo de desgaste predominante (abrasão) e os esforços (compressão, torção e flexão) submetidos à broca durante o corte (KÖNIG e KLOCKE, 2002).

Figura 20 - Diagrama de dureza-tenacidade dos materiais de ferramentas de corte.



FONTES: Adaptado de Sandvik Coromant (2012).

É importante frisar que são raramente empregados os novos materiais em operações de furação tais como o nitreto de boro cúbico, a cerâmica e o diamante, comuns a outros processos de usinagem. Neste caso destaca-se o uso do aço-rápido e do metal-duro como materiais mais aplicados no processo de furação (DINIZ *et al.*, 2008).

Entre os grupos de materiais para ferramentas de corte ressalta-se o metal-duro como um dos mais extraordinários grupos de materiais de ferramentas de corte. O advento desta classe aconteceu no final da década de 1920, na Alemanha, quando se conseguiu produzir em laboratório o carboneto de tungstênio (WC) em pó pela primeira vez. A mistura deste pó com o cobalto, também em pó, trouxe ao mercado, na década de 1930, o metal-duro (MACHADO *et al.*, 2009). O metal-duro é um dos materiais mais utilizados também na furação de ferro fundido cinzento.

No âmbito das características do metal-duro destaca-se a capacidade de permitir variar a dureza e a tenacidade da ferramenta em função da sua composição. A norma ISO 513 especifica as 6 classes de metal-duro, bem como as recomendações básicas. Na Figura 21 são mostradas essas classes de aplicações, sendo que a sub-classificação dos metais-duros dentro de cada classe depende principalmente da

composição química da ferramenta, incluindo qualidade e quantidade de carbonetos. A presença de carbonetos de titânio garante maior resistência ao desgaste. A maior quantidade de cobalto por outro lado, garante maior tenacidade. Os tamanhos de grãos dos carbonetos quanto mais finos maior a tenacidade da ferramenta aliado a uma maior dureza média. Os números menores identificam as classes mais resistentes ao desgaste enquanto os maiores as mais tenazes. A classe K, primeira a ser desenvolvida, é indicada para a usinagem de materiais como os ferros fundidos e outros materiais de cavacos curtos (DINIZ *et al.*, 2008).

Figura 21 - Classes de metal-duro, recomendações e aplicação.

Principais classes			Classes de aplicação			
Letra de identificação	Cor de identificação	Materiais a serem usados	Metais duros			
P	Azul	Aços: Todos os tipos de aços e aços fundidos, exceto aços inoxidáveis com estrutura austenítica	P01	P05	a ↑	b ↓
			P10	P15		
			P20	P25		
			P30	P35		
			P40	P45		
			P50			
M	Amarelo	Aço Inoxidável: aço inoxidável austenítico e aço duplex (austenítico/ferrítico) e aço fundido	M01	M05	a ↑	b ↓
			M10	M15		
			M20	M25		
			M30	M35		
			M40			
K	Vermelho	Ferro Fundido: Ferro fundido cinzento, ferro fundido com grafita esferoidal, ferro fundido maleável	K01	K05	a ↑	b ↓
			K10	K15		
			K20	K25		
			K30	K35		
			K40			
N	Verde	Metais não-ferrosos: Alumínio e outros metais não ferrosos, materiais não metálicos	N01	N05	a ↑	b ↓
			N10	N15		
			N20	N25		
			N30			
S	Marron	Superligas e titânio: Ligas especiais resistentes ao calor a base de ferro, níquel e cobalto, titânio e ligas de titânio	S01	S05	a ↑	b ↓
			S10	S15		
			S20	S25		
			S30			
H	Cinza	Materiais duros: Aços endurecidos, ferros fundidos endurecidos, ferros fundidos resfriados	H01	H05	a ↑	b ↓
			H10	H15		
			H20	H25		
			H30			

a – Aumento da velocidade de corte, aumento da resistência ao desgaste do material da ferramenta
b – Aumento do avanço, aumento da tenacidade do material da ferramenta

FONTE: Sandvik Coromant (2012).

2.4 CRITÉRIOS DE FIM DE VIDA

Os critérios de fim de vida são utilizados para determinar quando uma ferramenta deve ser substituída no processo de usinagem. A escolha dos critérios de fim de vida na furação depende de vários fatores, tais como os relacionados ao nível de desgaste ou avaria encontrado na broca, desvios das tolerâncias dimensionais do furo, perda de qualidade superficial da peça, aumento nos níveis de vibrações ou esforços no processo, aumento da temperatura, entre outros.

A expressão “vida da ferramenta” significa o tempo que a mesma trabalha efetivamente, até perder sua capacidade de corte, dentro de um critério previamente estabelecido. Atingindo este tempo a ferramenta deve ser reafiada ou substituída. A norma ISO 3685 classifica os principais critérios de fim de vida para ferramentas de corte em metal-duro, aço-rápido e cerâmicas, como sendo:

- Desgaste de flanco médio e máximo, $VB_B = 0,3 / VB_{Bmáx} = 0,6\text{mm}$;
- Profundidade da cratera, $KT = 0,06 + 0,3f$;
- Desgaste de Entalhe, $VN = 1,0\text{mm}$;
- Falha Catastrófica.

2.4.1 Tipos de desgastes e avarias em brocas

Os motivos principais para a destruição ou substituição das ferramentas de corte durante uma operação de usinagem são as ocorrências de avarias ou desgastes. A seguir é descrito cada um destes fenômenos (MACHADO *et al*, 2009, OLIVEIRA, 2008 e STOETERAU *et al*, 2004):

a) Ocorrência de uma avaria (trinca, lasca ou quebra): é o processo de destruição da ferramenta de corte que ocorre de maneira repentina e inesperada, causado pela quebra, lascamento ou trinca da ferramenta. A quebra e o lascamento levam à perda brusca de uma quantidade considerável de material da ferramenta de corte instantaneamente, enquanto a trinca promove a abertura de uma fenda no corpo da ferramenta de corte, sem perda de material. Mas ela pode se transformar em sulco (no caso de trincas de origem térmica), lascamento ou quebra.

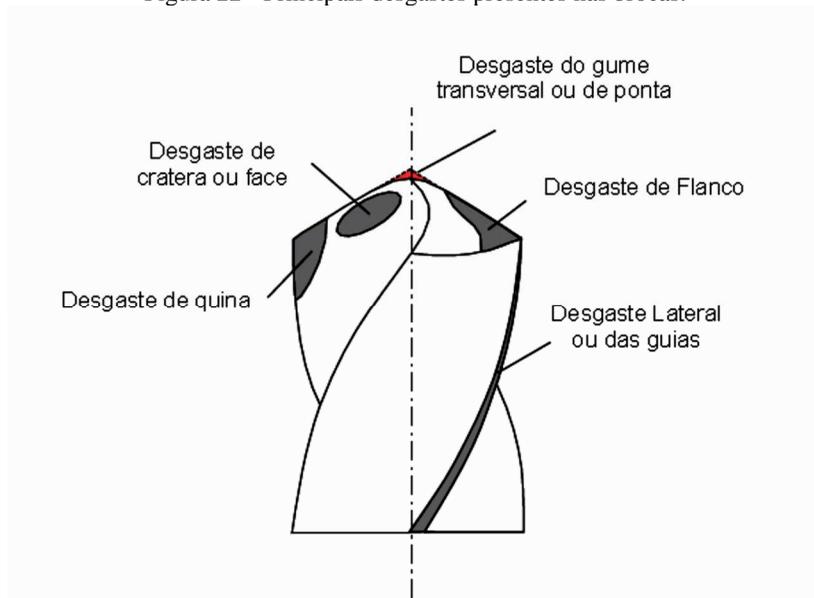
As trincas de origem térmica são, geralmente, perpendiculares ao gume e prevalecem quando usinando a altas velocidades. Já as trincas de

origem mecânica são, geralmente, paralelas ao gume e prevalecem quando usinando a baixas velocidades. De modo geral, as trincas térmicas e mecânicas podem ter origem na interrupção continuada do corte, um exemplo é o fresamento de corte interrompido.

Normalmente, a quebra da ferramenta ocorre de forma repentina e inesperada em função da baixa tenacidade da ferramenta, carregamento excessivo no gume, parada instantânea do movimento de corte, entupimento dos canais de expulsão de cavacos ou bolsões de armazenamento. Os danos adicionais com a quebra da ferramenta podem ser a quebra do porta-ferramenta e danificação da peça usinada ou da máquina-ferramenta.

b) Ocorrência de desgaste: o desgaste é a mudança da geometria da ferramenta de corte por perda de massa. No desgaste, ao contrário da avaria, esta perda acontece de maneira contínua e progressiva, e em proporções pequenas, às vezes em nível atômico, às vezes em níveis granulares. Na Figura 22 são ilustrados os principais desgastes encontrados nas brocas:

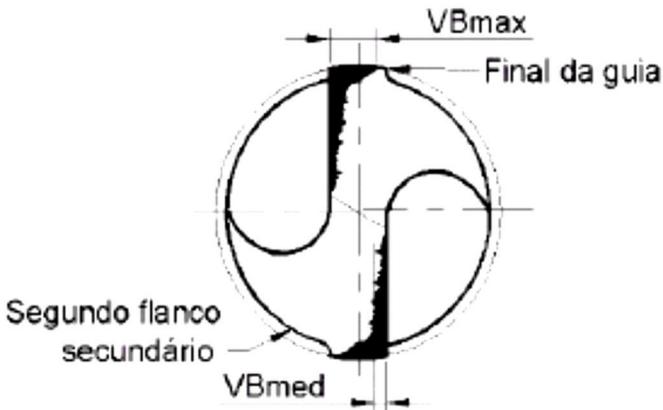
Figura 22 - Principais desgastes presentes nas brocas.



FONTE: Stoeterau *et al.* (2004).

O desgaste de flanco (VB) ocorre ao longo do gume da broca e caracteriza-se pela largura média (VB_{med}) e pela largura máxima ($VB_{máx}$) das marcas de desgaste localizadas nos flancos da broca (superfícies de incidência). É o tipo de desgaste mais comum em ferramentas de usinagem, sendo o responsável pela deterioração do acabamento da superfície da peça em função de alterações na forma do gume original. Outro aspecto é que este desgaste é acelerado principalmente pelo aumento na velocidade de corte. Na Figura 23 é ilustrada a localização destas marcas de desgaste nos flancos da broca:

Figura 23 - Localização das marcas de desgaste no flanco da broca.



FONTE: Andrade (2005).

O desgaste de cratera é o tipo de desgaste caracterizado pela formação de uma depressão na superfície de saída da ferramenta, causado pelo atrito entre o cavaco e a ferramenta em temperatura elevada. O crescimento do desgaste de cratera resulta na quebra do gume, ocasionando o enfraquecimento da cunha. Já o desgaste de quina é o desgaste caracterizado pelo arredondamento das quinas da broca, abrangendo ou não toda a largura da guia.

c) Ocorrência de deformação plástica: a deformação plástica é a mudança da geometria da ferramenta de corte pelo deslocamento de massa. Ela ocorre por cisalhamento devido às altas tensões atuantes nas superfícies das ferramentas de corte. Em casos extremos vai levar à total destruição da cunha cortante da ferramenta, podendo até perder massa.

2.4.2 Causas e mecanismos de desgastes

Devido às condições de processo, a broca fica sujeita a uma combinação de vários fatores de ordem mecânica, térmica, física e abrasiva. Estes fatores somados as condições de usinagem e do próprio material da ferramenta, conduzem a um predomínio de algum tipo de desgaste sobre a broca.

Os principais mecanismos de desgastes são (DINIZ *et al.*, 2008; KÖNIG e KLOCKE, 2002; MACHADO *et al.*, 2009; STEMMER, 2005):

a) Abrasão: a abrasão é uma das principais causas de desgaste nas ferramentas de usinagem. A abrasão é perceptível no plano de incidência na formação do desgaste de flanco, mas atua também no desgaste de cratera, na face de saída. O mecanismo de desgaste por abrasão é incentivado pela presença de partículas duras no material usinado e pela temperatura do corte, a qual reduz a dureza da ferramenta, assim como fenômenos tribológicos que ocorrem na interface dos materiais em movimento relativo.

b) Difusão: este mecanismo envolve a transferência, no estado sólido, de átomos de um material para outro, sendo fortemente dependente da temperatura, do tempo e da afinidade química entre os materiais envolvidos. A difusão tem grande influência no desgaste de cratera formado na face em função da afinidade química do cavaco com o material da ferramenta. Os fenômenos tribológicos são responsáveis pelo desgaste por difusão na região da cratera.

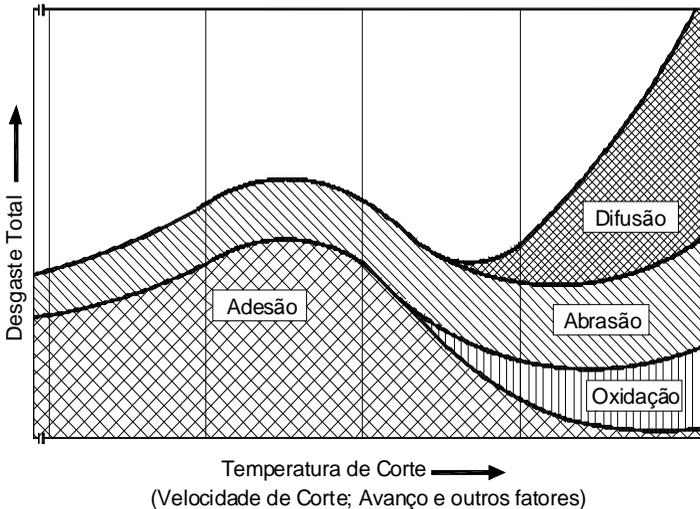
c) Oxidação: ocorre sob altas temperaturas e a presença de ar ou água (contida nos fluidos de corte) geram oxidação para a maioria dos metais. Por exemplo, o tungstênio e o cobalto formam filmes de óxidos nas superfícies da ferramenta, durante o corte, os quais são facilmente conduzidos para fora da região de corte pela abrasão.

d) Adesão: este mecanismo ocorre em função da adesão de partículas microscópicas do material usinado nas superfícies da ferramenta. Em função da afinidade química entre os materiais envolvidos e o movimento do cavaco e peça. Fragmentos microscópicos são arrancados das superfícies da ferramenta e arrastados pelo fluxo de material. Este mecanismo predomina em baixas velocidades de corte e explica a formação de gume postíço.

e) **Solicitações térmicas e mecânicas:** as solicitações térmicas e mecânicas em excesso podem levar a uma danificação do gume da ferramenta. As tensões cisalhantes na interface cavaco-ferramenta são suficientes para causar deformação plástica próximo ao gume. Em alguns casos as altas temperaturas ali desenvolvidas reduzem a resistência ao escoamento do material da ferramenta, próximo à interface. Como consequência, o material é arrancado da superfície da ferramenta, formando-se assim uma cratera.

A Figura 24 ilustra a distribuição dos principais mecanismos de desgaste das ferramentas de corte em função da temperatura de corte, a qual é influenciada pela velocidade de corte, avanço e outros fatores.

Figura 24 - Distribuição dos mecanismos de desgaste em função da temperatura de corte.



FONTE: König e Klocke (2002).

O mecanismo de desgaste por abrasão é comumente encontrado como causa dominante para o desgaste das ferramentas aplicadas em usinagem de ferros fundidos (KENNEDY, 2002).

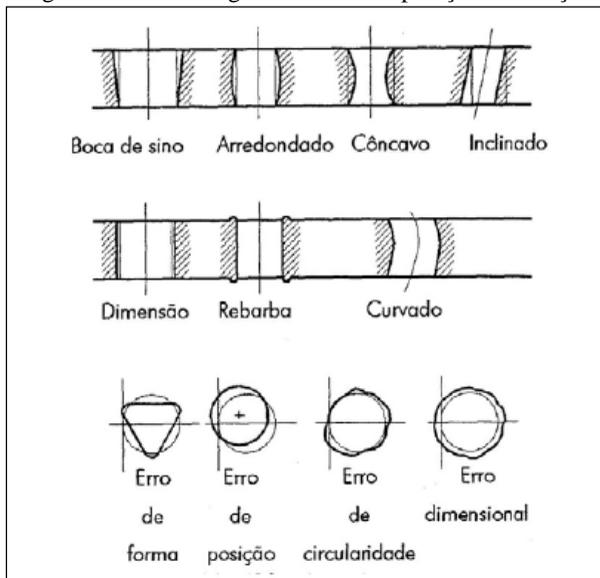
2.4.3 Desvios geométricos na operação de furação

Tanto nos processos de furação como nos de usinagem de forma geral, não é possível fabricar peças sem variação dimensional. Há uma série de fatores que influenciam o resultado final do processo de usinagem. Na Figura 25 podem ser observados os principais desvios geométricos presentes na operação de furação. Na maioria dos casos, as peças são compostas por elementos geométricos, ligados entre si por superfícies de diversos tipos, podendo ser planas, cilíndricas ou cônicas, que têm formas definidas e interligadas. Portanto, durante a usinagem de uma peça, caso esta relação de forma ou posicionamento seja desviada da especificação de projeto, poderá acarretar em sérios problemas no que tange a funcionalidade da peça.

Diante disso, conclui-se que não basta apenas se ater a um ponto de análise, pois mesmo satisfazendo alguns recursos os resultados de usinagem podem ser insatisfatórios, já que outros fatores são negligenciados.

De modo geral, os desvios geométricos em furos podem ser classificados como: erro de retitude, circularidade, cilindridade, planeza, entre outros.

Figura 25 - Desvios geométricos na operação de furação.



FONTE: Tool and Manufacturing (1983).

Para a obtenção de furos aceitáveis deve-se seguir tolerâncias, que podem ser de forma e dimensionais. As tolerâncias dimensionais estão relacionadas com a medida de diâmetro nominal e a medida real encontrada no furo, já as tolerâncias de forma estão ligadas com a geometria dos furos (CASTILLO, 2005).

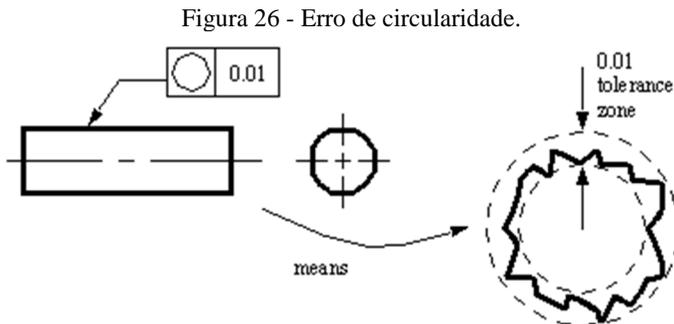
Dentre os principais fatores que influenciam na qualidade e precisão de um furo destacam-se (STOETERAU *et al.*, 2004): o posicionamento, presença de rebarbas, elevada precisão geométrica, vibração, fatores de processo (ajustes, fluido de corte, folgas etc.), forma da peça usinada, ferramenta de corte, máquina-ferramenta, fixação da peça ou ferramenta, parâmetros de usinagem, rigidez, entre outros.

2.4.4 Erro de Circularidade

Erro de circularidade é a diferença entre o menor círculo inscrito tangente a três pontos e o maior círculo circunscrito concêntrico da primeira distância entre o maior cilindro inscrito ao menor cilindro circunscrito coaxialmente (STOETERAU *et al.*, 2004).

Circularidade é a condição pelo qual qualquer círculo deve estar dentro de uma faixa definida por dois círculos concêntricos, distantes no valor da tolerância especificada – Figura 26. Formas tais como triangular, irregular ou oval são comumente observadas (CASTILLO, 2005).

A definição da norma NBR6409 cita que para a interpretação da circularidade devem ser escolhidos dois círculos concêntricos ou cilíndricos coaxiais, de maneira que a distância radial entre eles seja mínima. O valor máximo medido em um erro de circularidade está na distância localizada entre os dois círculos concêntricos.

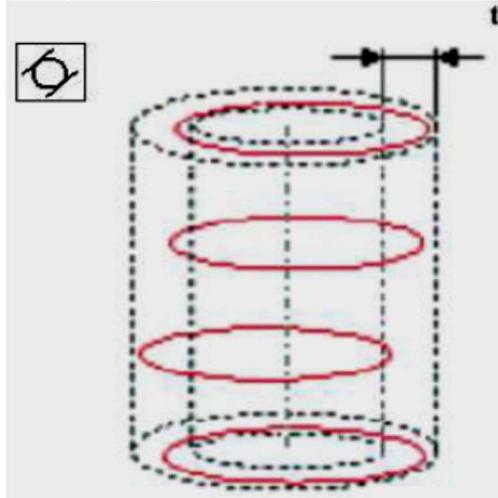


FONTE: Adaptado de Machado (2011).

2.4.5 Erro de Cilindricidade

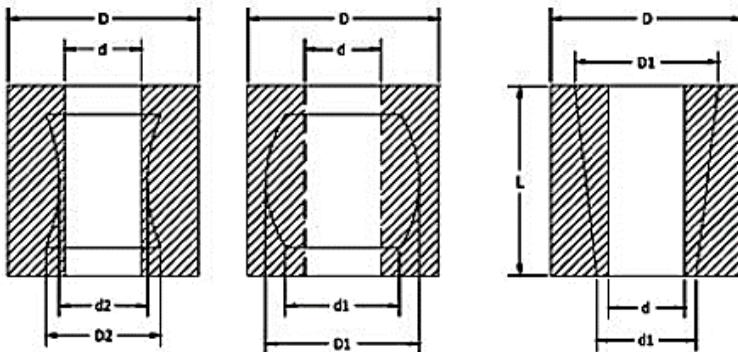
O erro de cilindridade é obtido através de dois cilindros coaxiais, afastados por uma distância “ t ” (NBR6409, 1997). As Figuras 27 e 28 exemplificam o conceito de cilindridade e as suas aparências de desvios possíveis. Estes desvios podem ser verificados tanto na secção longitudinal (conicidade, convexidade e concavidade), como na secção transversal do cilindro (ovalização).

Figura 27 - Representação de uma tolerância “ t ” de cilindridade.



FONTE: Machado (2011).

Figura 28 - Concavidade, convexidade e conicidade, respectivamente.



FONTE: Palma (2004).

2.5 HISTÓRICO E FUNDAMENTOS DOS ESTUDOS DE CUSTO DA USINAGEM

Os primeiros estudos abordando o custo do processo de usinagem foram realizados por Taylor nos EUA, que em 1906 escreveu o livro “*On the art of cutting metals*”. Neste estudo já era discutido qual a ferramenta a ser utilizada, qual velocidade de corte deveria ser empregada e qual a condição de usinagem para alcançar a condição de menor custo. Alguns anos mais tarde, em 1933, na Alemanha, Leyensetter *apud* Ferraresi (1970) publicou um artigo intitulado “A velocidade econômica de corte”, no qual afirma que a velocidade econômica de corte é aquela na qual é usinado o volume máximo de cavaco, num determinado tempo total de usinagem. Esta definição foi abandonada, visto tratar-se da velocidade de corte para a máxima produção e não para o mínimo custo. Posteriormente, definiu-se a velocidade econômica de corte como sendo aquela na qual o custo de fabricação numa indústria é mínimo (FERRARESI, 1970).

Também durante a idealização dos primeiros estudos publicados referentes às condições econômicas de usinagem, o Professor G. Schlesinger, da Universidade Técnica de Berlim *apud* Stemmer (2005) afirmava em 1907 que “*o lucro da empresa depende da qualidade do gume das ferramentas*”. Ou seja, desde o início dos primeiros estudos relacionados à usinagem dos metais, já havia o interesse no desempenho das ferramentas de corte, que explica a constante busca por novas tecnologias para materiais de ferramentas.

Segundo Ferraresi (1970), os custos de um processo de usinagem variam de acordo com os seguintes fatores: mão de obra, energia, manutenção da máquina-ferramenta e consumíveis. O tempo de usinagem influenciará em todos estes fatores, portanto deve ser encontrado um ponto ótimo no qual o tempo seja mínimo e a qualidade máxima. Conforme Stemmer (2005), o máximo rendimento econômico da usinagem é obtido quando toda a potência disponível na máquina-ferramenta é utilizada, ao mesmo tempo em que é assegurada uma vida suficientemente longa para a ferramenta de corte.

2.5.1 Condições econômicas de usinagem

As condições econômicas são atualmente um dos temas que despertam maior interesse dentro dos processos de usinagem. Isto se deve ao desenvolvimento constante na automatização de máquinas-ferramentas, aos materiais de ferramentas e peças, bem como ao

crescimento constante da competitividade entre as empresas para atingirem cada vez menores ciclos e custos de fabricação. Assim, utilizar as condições econômicas na usinagem é um fator positivo para a amortização do elevado capital requerido (TAYLOR, 1906). Segundo Aggarwal e Singh (2005), mesmo com várias pesquisas já realizadas sobre esse tema na usinagem, o progresso tem sido muito lento, devido principalmente à complexidade envolvendo os diferentes processos de usinagem.

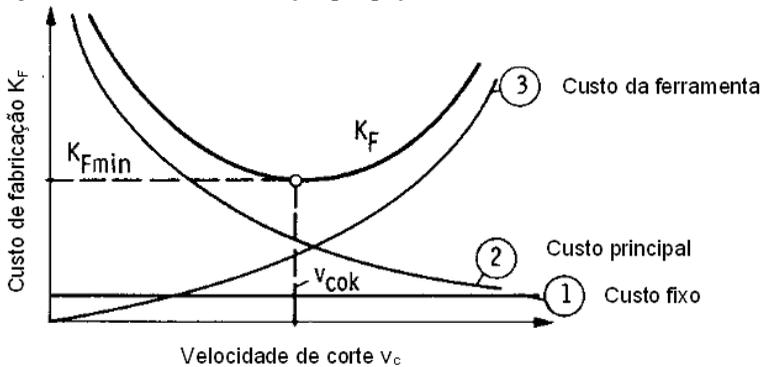
A aplicação das condições econômicas de usinagem tem como foco a diminuição dos custos de fabricação através do emprego da velocidade de corte de ótimo custo (v_{cok}) ou a máxima produção por meio da velocidade de corte de ótimo tempo de produção (v_{coz}).

Neste âmbito a velocidade de corte tem grande influência sobre o desgaste e vida da ferramenta, bem como sobre o tempo total de usinagem, uma vez que há uma velocidade de corte ideal intermediária na qual o tempo de fabricação do lote e os custos são mínimos (MACHADO *et al*, 2009).

A Figura 29 ilustra os três elementos de formação do custo, bem como o seu comportamento no custo de fabricação por peça e nos elementos de custos isolados dependentes da velocidade de corte. Além disto, observa-se que quanto maior a velocidade de corte, maior é a influência do custo de ferramental no custo de fabricação por peça. Isto ocorre devido à diminuição da vida da ferramenta tornando o número de trocas mais frequentes. Como o custo principal apresenta comportamento oposto ao custo de ferramenta, à medida que a velocidade de corte é mais baixa, o custo de fabricação por peça é mais influenciado pelo custo principal (KÖNIG e KLOCKE, 2002; MACHADO *et al*, 2009).

Entre as maiores dificuldades em estabelecer as condições econômicas de usinagem está a obtenção do custo de fabricação por hora. Este custo depende da amortização do capital e não havendo regras claras fica impossível de criar uma regra amplamente empregada.

Figura 29 - Custos de fabricação por peça e elementos de custos envolvidos.



FONTE: König e Klocke (2002).

Como mencionado por König e Klocke (2002), os custos de fabricação por peça são compostos dos seguintes elementos, Equação (3):

$$K_F = K_{ML} \cdot \left(\frac{t_r}{m} + t_n \right) + K_{ML} \cdot t_h + \frac{t_h}{T} \cdot (K_{ML} \cdot t_w + K_{WT}) \quad (3)$$

Onde:

- K_F : Custo de fabricação por peça [R\$/peça]
- K_{ML} : Custo de máquina e operador por hora [R\$/hora]
- K_{WT} : Custo da ferramenta por vida [R\$/peça]
- t_r : Tempo de preparação [min]
- t_n : Tempos secundários [min]
- t_h : Tempo principal [min]
- t_w : Tempo de troca da ferramenta [min]
- T : Vida da ferramenta [min]

Na furação o tempo principal (t_h) e o tempo de fabricação por peça (t_c) podem ser calculados pelas Equações (4) e (5):

$$t_h = \frac{l}{f \times n} \quad (4)$$

$$t_e = \frac{t_r}{m} + t_n + t_h + \left(\frac{t_h}{T}\right) \cdot t_w \quad (5)$$

Onde:

- l: Comprimento do furo [mm]
- f: Avanço por gume [mm]
- n: Rotação da ferramenta [rpm]

A vida da ferramenta de corte depende do tipo de material a ser usinado, dos parâmetros de corte utilizados e do material da ferramenta. O comportamento do desgaste das ferramentas pode ser descrito pela equação de Taylor simplificada (TAYLOR, 1906). Na Equação (6), verifica-se a curva de vida simplificada da ferramenta de corte proposta por Taylor:

$$T = C_V \cdot v_c^k \quad (6)$$

Onde:

- T: Vida da ferramenta [min]
- C_V : Vida para velocidade de corte de 1m/min [min]
- v_c : Velocidade de corte [m/min]
- k: Constante da Equação para determinação da vida

A velocidade de corte para obtenção do ótimo tempo de produção (v_{coz}) pode ser expressa pela Equação (7):

$$v_{coz} = \sqrt[k]{-(k+1) \cdot \left(\frac{t_w}{C_V}\right)} \quad (7)$$

Substituindo na Equação de Taylor (6) a Equação (7), obtém-se a vida de ótimo tempo de produção (T_{oz}):

$$T_{oz} = -(k+1) \cdot t_w \quad (8)$$

Em contrapartida, a velocidade de corte de ótimo custo (v_{cok}) é representada pela Equação (9):

$$v_{\text{cok}} = \sqrt[k]{-(k+1) \cdot \left(\frac{[t_w + \frac{K_{WT}}{K_{ML}}]}{C_v} \right)} \quad (9)$$

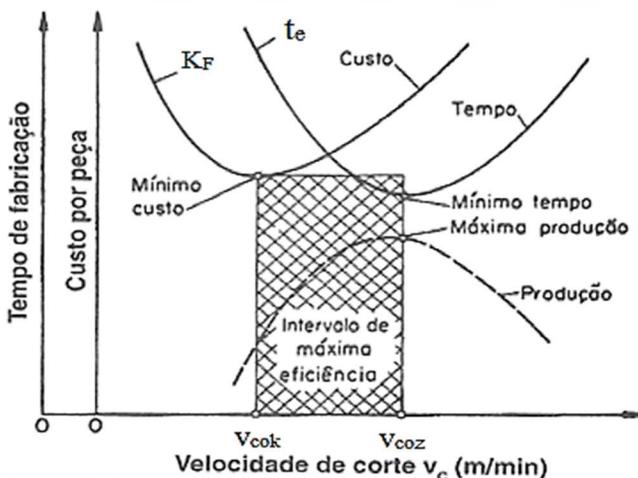
O tempo de vida de ótimo custo (T_{ok}), Equação (10), é obtido através da substituição da Equação (9) na Equação de Taylor. Na Figura 30 verifica-se o intervalo de máxima eficiência (IME), compreendido entre o mínimo custo e a máxima produção.

$$T_{ok} = -(k+1) \cdot \left(t_w + \frac{K_{WT}}{K_{ML}} \right) \quad (10)$$

Miranda, Coppini, Braga e Diniz (2001) mostraram em um estudo do processo de furação, que a implantação da metodologia aplicada para a obtenção das condições econômicas pode significar um aumento da produção horária na ordem de 77%. Isto também evidencia que com a otimização da velocidade de corte na atividade industrial consegue-se resolver problemas de oscilações de carga e gargalos na produção, aumentando assim a produtividade.

Andrade (2005) realizou um estudo na furação do ferro fundido vermicular, utilizando brocas de canais retos revestidas com TiN e TiAlN. As brocas utilizadas com velocidade de corte de 80m/min revestidas com TiAlN obtiveram um melhor desempenho quando comparadas às brocas revestidas com TiN e TiAlN a uma velocidade de corte 150m/min. Neste estudo pode-se comprovar a influência do aumento da velocidade de corte como causa predominante para a intensificação do desgaste das ferramentas.

Figura 30 - Representação do intervalo de máxima eficiência (IME).



FONTE: Adaptado de Diniz *et al* (2008).

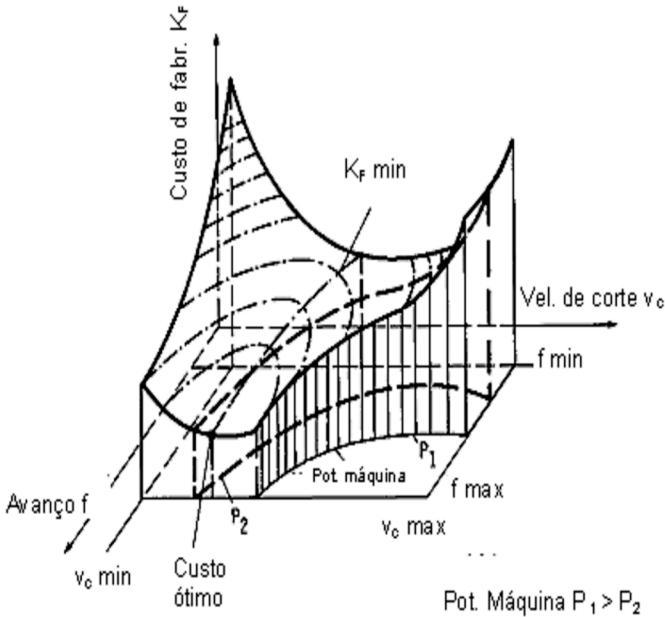
A Figura 31 ilustra o comportamento do custo de fabricação por peça e da potência da máquina-ferramenta necessária para realizar a usinagem, bem como os limites do avanço e da velocidade de corte.

Neste caso verifica-se que o limite mínimo e máximo tanto da velocidade de corte como do avanço alteram a curva de custo de fabricação por peça, assim como da potência requerida para realizar a usinagem. Uma velocidade de corte mínima requer uma potência para realizar a usinagem menor, porém, aumenta excessivamente o custo de fabricação por peça. Caso a velocidade de corte seja a máxima admissível, a potência necessária da máquina-ferramenta para que a usinagem ocorra é muito mais elevada, e do mesmo modo o custo de fabricação por peça aumenta. No que se refere ao avanço o comportamento é semelhante à velocidade de corte tanto no custo de fabricação como na potência da máquina-ferramenta, no entanto, com uma importância secundária, pois sua influência na potência e no custo de fabricação é muito menor quando comparado com a velocidade de corte (EBERSBACH, 2014).

Há aproximadamente 50 anos atrás as máquinas-ferramentas não permitiam aplicar a otimização, pois faltava potência. Nos últimos anos esta questão foi resolvida na maioria dos casos pelos fabricantes de máquinas-ferramentas. Outro aspecto é que o consumo de energia de

usinagem diminui com a velocidade de corte, porém, as perdas por atrito aumentam (STOETERAU *et al.*, 2004).

Figura 31 - Influência dos limites dos parâmetros de corte sobre a faixa de otimização.



FONTE: König e Klocke (2002).

Por fim, em uma otimização de processo o ideal é que as condições de usinagem estejam bem definidas, se possível dentro do intervalo de máxima eficiência (IME). É neste intervalo que se encontram os valores de velocidade de corte que devem ser utilizados em um processo de usinagem para se obter o mínimo custo ou máxima produção, baseado em valores prévios de avanço (f), profundidade de usinagem (a_p) e o tipo da ferramenta, garantindo-se as melhores condições econômicas de usinagem para um determinado processo.

Contudo, questões envolvendo dinâmica da máquina-ferramenta ou condições específicas do processo (rigidez, fixação etc.) podem limitar os valores da velocidade de corte adotada na ferramenta, impossibilitando assim que um processo atue dentro do intervalo de máxima eficiência desejado.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Neste capítulo são apresentados os recursos e métodos utilizados e que dão suporte à metodologia proposta neste trabalho. A abordagem principal é sobre os ensaios de furação, as análises dimensionais e a caracterização do material do corpo de prova.

3.1 MÁQUINA-FERRAMENTA

Para realização dos ensaios de furação foi utilizado o centro de usinagem horizontal, fabricado pela companhia HELLER S.A., modelo Mci16 (Figura 32), com rotação máxima de 8.000rpm, potência de acionamento no eixo-árvore de 30kW e torque máximo de 143N.m. Esta máquina é capaz de realizar usinagem em até quatro eixos.

Figura 32 - Máquina-ferramenta utilizada nos ensaios.



FONTE: Heller.

3.2 CARACTERIZAÇÃO DAS FERRAMENTAS

Nos ensaios foram utilizados 2 tipos de brocas helicoidais, apresentando diferenças na geometria, fabricante e revestimento. As brocas disponibilizadas pela empresa parceira e utilizadas nos ensaios são assim convencionadas:

a) **Geometria 1:** broca com corpo de aço e ponta intercambiável de metal-duro (Figura 33), revestimento multicamada de nitreto de titânio alumínio (TiAlN), do fabricante ISCAR, diâmetro de 15,50mm e refrigeração interna.

Figura 33 - Broca com ponta intercambiável.



FONTE: Do autor.

b) **Geometria 2:** broca helicoidal inteira de metal-duro escalonada, do fabricante G6, com refrigeração interna, diâmetros de 4,20mm e 5,40mm, revestimento nanocomposto multicamada de nitreto de titânio alumínio em matriz de nitreto de silício (nc-TiAlN)/(α -Si₃N₄) - comercialmente denominado nACo®. A Figura 34 mostra a ferramenta utilizada nos ensaios, sendo possível visualizar a cor azulada do revestimento nACo®.

Figura 34 - Broca helicoidal inteira.



FONTE: Do autor.

Antes da etapa de início dos ensaios, todas as brocas foram medidas em relação às suas dimensões básicas, com o propósito de se garantir que não haveria influência de outras variáveis nos resultados.

Os resultados das medições dos equipamentos projetor de perfil *Starrett Precision Optical*, modelo VB360 e da máquina de preset *Elbo Controlli*, modelo E238, feitas nas brocas empregadas nos ensaios estão disponíveis nas Tabelas 1 e 2 do Apêndice A.

3.3 CRITÉRIOS DE FIM VIDA DAS BROCAS

O critério de vida estabelecido nos ensaios como principal parâmetro de referência para a determinação do fim de vida das brocas foi o erro de circularidade dos furos (15,50mm e 5,40mm). Tendo em vista tal aspecto, estabeleceram-se os limites dimensionais para cada tipo de ensaio - Tabela 3:

Tabela 3 - Critérios de fim de vida para as ferramentas ensaiadas.

Diâmetro do furo [mm]	Quantidade de furos	Erro de circularidade máximo [μm]
15,50	1	15
5,40	4	20

FONTE: Especificação técnica de processo.

Os intervalos de medições foram determinados nos pré-ensaios de furação. Deste modo, o sistema de medição empregado para averiguação do erro de circularidade nos furos de diâmetro 15,50mm foi um circularímetro (Figura 35), do fabricante *Mitutoyo*, modelo 211-843D, com exatidão de 2×10^{-5} mm.

Figura 35 - Circularímetro *Mitutoyo* 211-843D utilizado para medição do erro de circularidade dos furos de diâmetro 15,50mm.



FONTE: Do autor.

Para a medição do erro de circularidade nos furos de diâmetro 5,40mm, foi utilizada uma máquina de medir por coordenadas (MMC) com comando numérico computadorizado (Figura 36), da fabricante *Carl Zeiss*, modelo *Contura G2*, com exatidão de 2×10^{-4} [mm].

Figura 36 - Máquina MMC *Carl Zeiss Contura G2* utilizada para medição do erro de circularidade dos furos de diâmetro 5,40mm.



FONTE: Do autor.

3.4 PARÂMETROS DE CORTE

Os parâmetros de corte foram definidos em conjunto com os fabricantes das brocas, bem como com base na experiência da empresa colaboradora. Outro aspecto importante foi que as escolhas destes parâmetros de corte levaram em conta as recomendações dos fabricantes quanto à máxima e mínima velocidade de corte indicada para furação de ferro fundido cinzento. Foram adotados três valores diferentes de velocidade de corte e dois diferentes avanços, para cada uma das brocas.

Destaca-se que o termo avanço (f) utilizado a partir desta seção se refere a uma das maneiras que o mesmo pode ser expresso [mm]. Neste caso, o avanço se refere ao percurso linear realizado em cada rotação da ferramenta em uma direção coincidente com o eixo do furo.

Na Tabela 4 são listados os parâmetros de corte aplicados nos ensaios.

Tabela 4 - Parâmetros de corte definidos para os ensaios.

Ensaio	Diâmetro da broca	Velocidade de corte	Avanço [mm]
	[mm]	[m/min]	
1	15,50	85	0,27
2			0,32
3		130	0,27
4			0,32
5		150	0,27
6			0,32
7	5,40	70	0,21
8			0,28
9		90	0,21
10			0,28
11		125	0,21
12			0,28

FONTE: Do autor.

As velocidades de corte (v_c) de 130m/min e 90m/min e os avanços (f) de 0,27mm e 0,21mm (para a broca de ponta intercambiável e helicoidal inteiriça, respectivamente), representam as condições atuais empregadas na linha de produção.

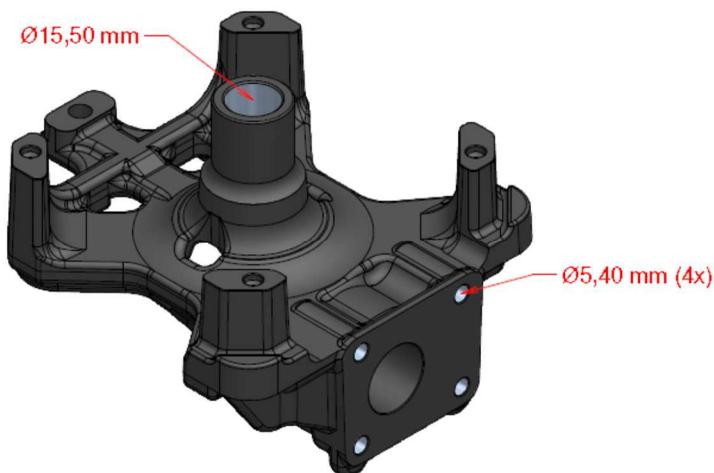
3.5 MEIO LUBRIRREFRIGERANTE UTILIZADO

Para todos os ensaios de furação utilizou-se o meio lubrificador sintético Ken SS-370, com 7% de concentração. Este produto é do fabricante *Yushiro*, e é normalmente empregado nesta máquina-ferramenta para a realização das operações de usinagem que abrangem o bloco de ferro fundido cinzento. Em todos os ensaios a pressão de aplicação do meio lubrificador foi de 40 bar e as brocas utilizadas possuem canais de refrigeração interna. No Apêndice B são descritas as características principais deste meio lubrificador, conforme especificação técnica do fabricante.

3.6 CORPOS DE PROVA

Os corpos de prova utilizados nos ensaios foram blocos de ferro fundido cinzento GG25 empregados em compressores herméticos, cuja geometria e localização dos furos do presente estudo estão ilustradas na Figura 37:

Figura 37 - Corpo de prova e localização dos furos.



FONTE: Do autor.

Antes de executar as furações, as faces da placa de válvula e do mancal dos blocos de compressores herméticos foram fresadas com passes de desbaste e acabamento, retirando-se em média 4mm de sobremetal, visando eliminar a zona que possui uma camada de maior dureza e melhorar a planeza nas regiões de entrada de cada furo, pois tais aspectos poderiam interferir nos resultados dos ensaios.

3.7 CARACTERÍSTICAS MECÂNICAS E COMPOSIÇÃO QUÍMICA

O material empregado nesta pesquisa foi o ferro fundido cinzento, de resistência à tração mínima de 250N/mm^2 . A composição química do material utilizado na pesquisa é mostrada na Tabela 5:

Tabela 5 - Composição química do ferro fundido cinzento utilizado no estudo.

Elemento	C	Si	Mn	P	S	Cr	Cu	Ni
% Encontrado	3,10	2,00	0,88	0,02	0,01	0,25	0,60	0,31

FONTE: Do autor.

A composição química encontrada no corpo de prova encontra-se na faixa recomendada por Chiaverini (2012) para o ferro fundido cinzento GG25.

3.8 ANÁLISE MICROESTRUTURAL

Foram realizadas as análises da microestrutura em uma amostra retirada de um corpo de prova. A amostra foi submetida a um polimento e, pelas imagens, analisou-se o tipo de grafita. Em seguida, foi feito um ataque químico com nital a 2% de concentração, para avaliar as porcentagens de grafita e perlita, verificando-se a conformidade com a norma.

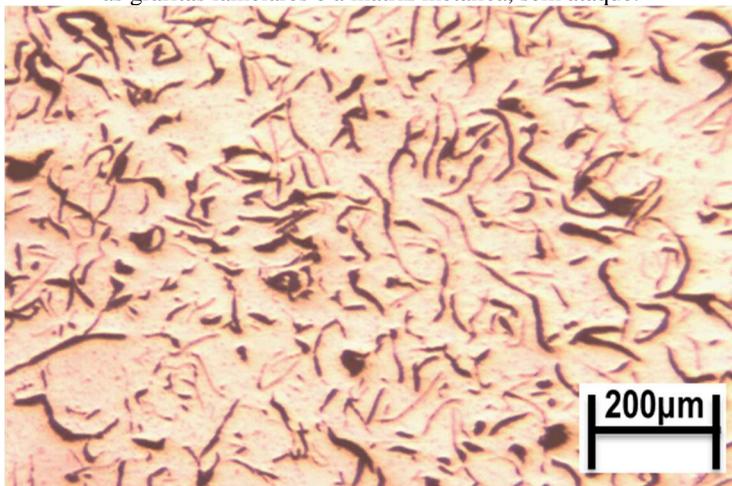
Os resultados destas análises da microestrutura são apresentados na Tabela 6, já as imagens captadas da microestrutura de uma região do núcleo do material utilizado na pesquisa podem ser vistas nas Figuras 38 e 39.

Tabela 6 - Comparativo da porcentagem de perlita, distribuição, tamanho e forma da grafita do material utilizado nos ensaios e da norma do fofo GG-25.

	Matriz	Distribuição da grafita	Tamanho da grafita	Forma da grafita
Norma GG-25	Mín.90% perlítico	A(BCDE)	(3) 4-8	I
Amostra	100% perlítico	A(BCDE)	(3) 4-8	I

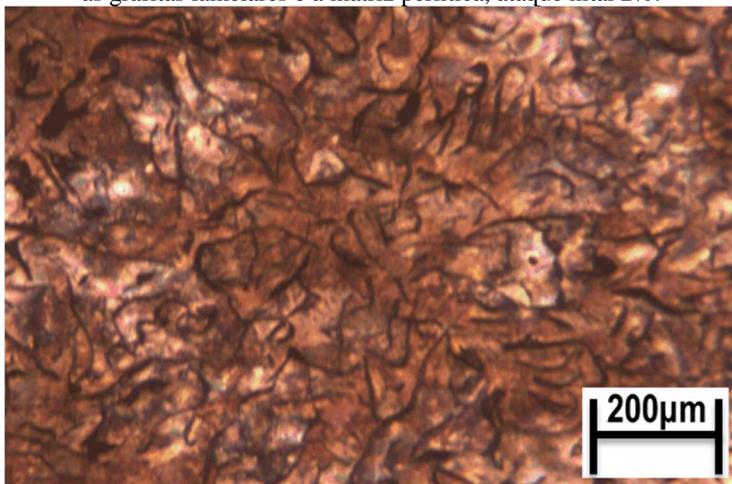
FONTE: Do autor.

Figura 38 - Micrografia de uma região do núcleo da amostra, onde se verificam as grafitas lamelares e a matriz metálica, sem ataque.



FONTE: Do autor.

Figura 39 - Micrografia de uma região do núcleo da amostra, onde se verificam as grafitas lamelares e a matriz perlítica, ataque nital 2%.

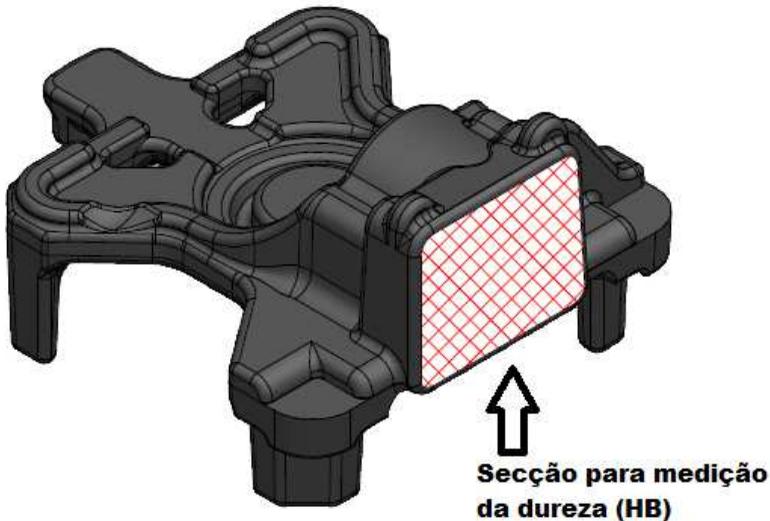


FONTE: Do autor.

3.9 DUREZA

A medição da dureza Brinell (HB) foi realizada em um durômetro modelo DT20 *Durotwin Plus*, do fabricante Mitutoyo, aplicando uma carga de 187,5 Kgf. Nestas medições de dureza foram efetuadas em 10 blocos escolhidos aleatórios utilizados nos ensaios, realizando-se 3 medições em cada corpo de prova. A seção do corpo de prova escolhida para a análise da dureza é a mesma em que se efetua os furos e está indicada na Figura 40. Os resultados obtidos estão contidos na Tabela 7:

Figura 40 - Seção do corpo de prova para obtenção da dureza Brinell (HB).



FONTE: Do autor.

Tabela 7 - Dureza (HB) média encontrada nos corpos de prova.

Quantidade de amostras	Dureza média (HB)	Desvio padrão (HB)
10	200	4

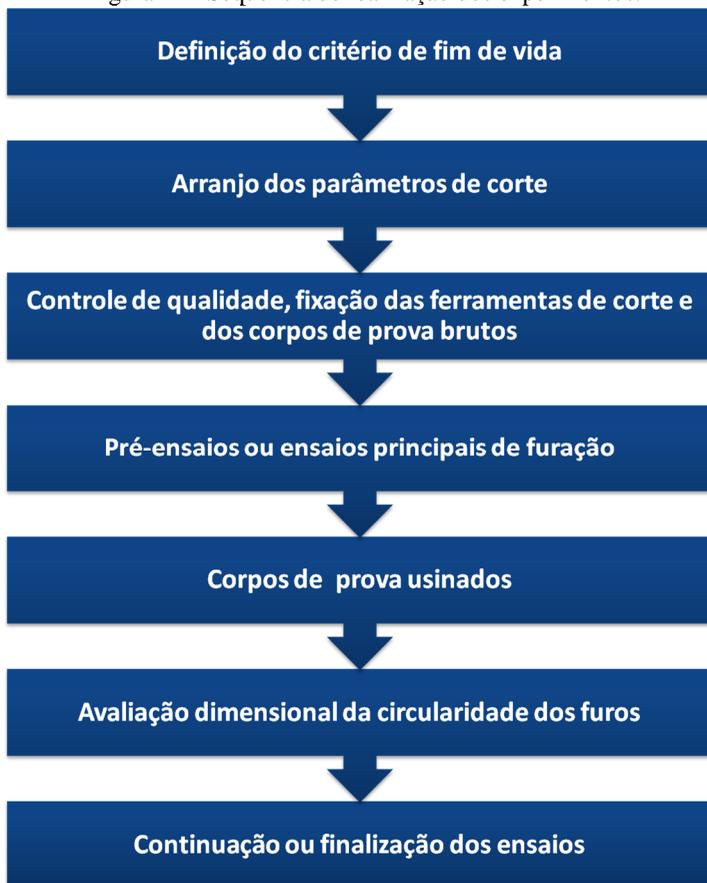
FONTE: Do autor.

A dureza média encontrada do material do corpo de prova está em conformidade com a especificação recomendada por Chiaverini (2012) para o ferro fundido cinzento GG25.

4 PLANEJAMENTO E EXECUÇÃO EXPERIMENTAL

Nesta etapa foi estabelecida uma sequência de trabalho, juntamente com o plano de inspeção dos corpos de prova. Na Figura 41, é mostrado esse fluxo de realização dos pré-ensaios e ensaios principais de furação. Nos capítulos seguintes são descritas detalhadamente estas etapas que abrangeram o planejamento e execução dos experimentos. É importante frisar que devido à questão relacionada ao tempo, bem como ocupação dos recursos envolvidos, foi somente possível realizar uma réplica de cada ensaio.

Figura 41 - Sequência de realização dos experimentos.



FONTE: Do autor.

4.1 PRÉ-ENSAIOS DE FURAÇÃO

No intuito de avaliar a influência dos parâmetros de corte sobre as grandezas de saída e comportamentos iniciais do processo (vibração, forma do cavaco etc.), foram realizados os pré-ensaios de furação com brocas semelhantes às geometrias empregadas na pesquisa.

Inicialmente, foi feito um acompanhamento na célula de produção de blocos para a melhor compreensão e coleta de informações, como por exemplo, os tempos totais de usinagem das operações de furação do conjunto de parâmetros atual, os levantamentos dos problemas frequentemente detectados nas brocas e nos furos, além da obtenção da vida atingida por cada ferramenta na condição de produção seriada.

Todavia, os pré-ensaios de furação evidenciaram que a medição do desgaste de flanco nas brocas não seria possível para determinar a vida das mesmas devido a uma limitação técnica no ambiente fabril em termos de equipamento para avaliação do desgaste de flanco máximo ($VB_{\text{máx}}$). Em virtude deste fato levaram-se em consideração aspectos técnicos dos blocos e decidiu-se adotar o erro de circularidade dos furos como critério predominante de fim de vida para o acompanhamento confiável da tendência de vida das brocas influenciadas pelas diversas condições de usinagem estudadas. Esta decisão quanto à escolha do critério de vida das ferramentas remete a uma condição corriqueira existente no ambiente fabril, onde muitas vezes o fim de vida da ferramenta é determinado por uma condição específica do processo.

Para a avaliação do erro de circularidade foi utilizada uma metodologia que consiste em realizar as coletas de dados no ambiente fabril em intervalos de medições definidos previamente. Com o objetivo de averiguar a confiabilidade do sistema de fixação dos corpos de prova, empregando um relógio apalpador com resolução de 0,001mm fixado na base do dispositivo de fixação, foi realizada uma análise quanto a retirada e reposição simultânea das peças. Nesta avaliação obteve-se uma variação de 0,002mm, nos repetitivos posicionamentos testados.

Para auxiliar na investigação das informações geradas durante os experimentos foi criada uma sistemática para registro de uma codificação sequencial de dois dígitos X.X. nas brocas e corpos de prova, a qual permitiu identificar a relação direta entre o controle de circularidade feita nos furos com as ferramentas de corte e condições de usinagem empregadas.

4.2 ENSAIOS DE FURAÇÃO

A finalidade dos ensaios principais de furação foi mostrar fundamentalmente o número máximo de furos usinados por cada geometria de broca associada a uma condição de usinagem empregada, seguindo o critério de fim de vida definido no pré-ensaio.

Os experimentos foram divididos em duas séries, sendo que a primeira série, compreendeu os ensaios de 01 até 06 abrangendo os furos com diâmetro de 15,50mm. Já no que se refere à segunda série, realizaram-se os ensaios de 07 a 12 envolvendo os furos com diâmetro de 5,40mm. Para avaliar a excentricidade total, que é a soma dos erros da máquina-ferramenta (*spindle*), suporte de fixação e da própria ferramenta de corte, foi realizada uma verificação do batimento radial do conjunto colocando-se um relógio apalpador com resolução de 0,001mm na ponta da broca girando a mesma manualmente em 360 graus. Esta verificação foi feita em todos os ensaios, sendo que o limite estabelecido como aceitável foi de 0,005mm, seguindo a recomendação dos fornecedores das brocas.

A determinação envolvendo a escolha dos valores de velocidade de corte, por sua vez, buscou obter a razão necessária que apontasse um espaçamento apropriado nas curvas de vida das brocas. Alguns parâmetros de corte já utilizados na usinagem do bloco serviram como referência inicial para a definição das demais velocidades de corte empregadas nos experimentos. A seleção de dois diferentes avanços para cada geometria de broca foi motivada, principalmente, pela possibilidade de uma avaliação mais criteriosa dos aspectos econômicos do processo, tendo em vista que o avanço possui uma menor influência sobre a vida da ferramenta, quando comparado com a velocidade de corte (KÖNIG e KLOCKE, 2002).

O planejamento e a execução dos experimentos permitiram que os processos de furação fossem estudados dentro de uma metodologia científica, porém, em condições idênticas à produção em série.

4.3 FIXAÇÕES DO CORPO DE PROVA E DAS FERRAMENTAS

Os corpos de prova foram fixados em um dispositivo de fixação hidráulico, com pontos de apoio e planos de posicionamento definidos conforme referências obtidas no projeto da peça. Esta fixação permitiu uma maior rigidez e estabilidade das peças, favorecendo a segurança e a precisão das operações de furação estudadas.

Para a fixação de ambas as brocas foram empregados suportes de fixação com cone Sk40, conforme a norma DIN69871. A broca com ponta intercambiável foi montada em um suporte tipo weldon e a broca helicoidal inteira foi montada por fixação térmica. A Figura 42 ilustra as duas formas de fixações.

Figura 42 - (a) Suporte montagem tipo weldon com cone Sk40; (b) Suporte montagem tipo térmico com cone Sk40.



FONTE: Do autor.

4.4 AVALIAÇÃO DA CIRCULARIDADE DOS FUROS

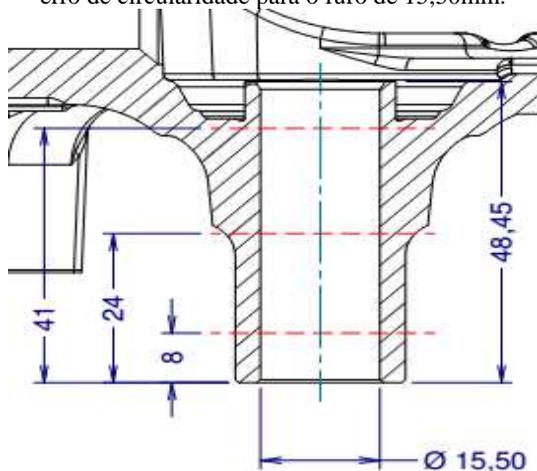
As avaliações da circularidade dos furos foram efetuadas no decorrer dos ensaios a cada 5 metros usinados para os furos de 15,50mm e a cada 9 metros usinados para os furos de diâmetro 5,40mm. Estes valores diferentes nos intervalos de medições foi necessário devido às diferenças de profundidade entre ambos os furos do estudo de caso.

As figuras 43 e 44 ilustram esquematicamente os planos de medição da circularidade, os quais foram usados nas medições dos furos de 15,50mm e 5,40mm, respectivamente.

As medições da circularidade dos furos foram realizadas em 3 regiões distribuídas ao longo da seção de cada furo, objetivando-se assim avaliar este erro de forma no início, meio e fim. Para os furos de 15,50mm as profundidades medidas foram 8, 24 e 41mm, e nos furos de 5,40mm foram 1,5, 3,5 e 5mm. Em ambos os casos obtiveram-se os

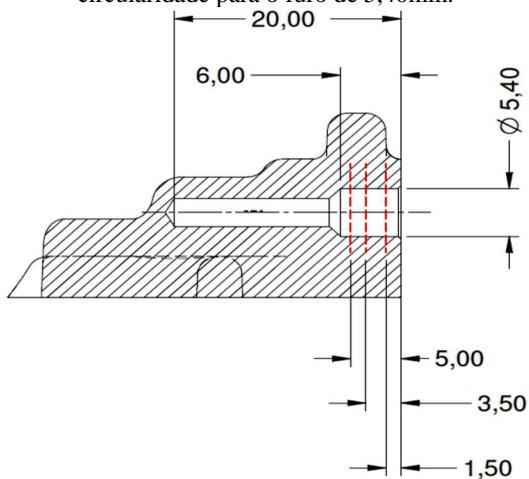
valores médios e a medição foi por varredura (*scanning*), com uma geração aproximada de até 3500 pontos de verificação.

Figura 43 - Representação esquemática das regiões de medição do erro de circularidade para o furo de 15,50mm.



FONTE: Do autor.

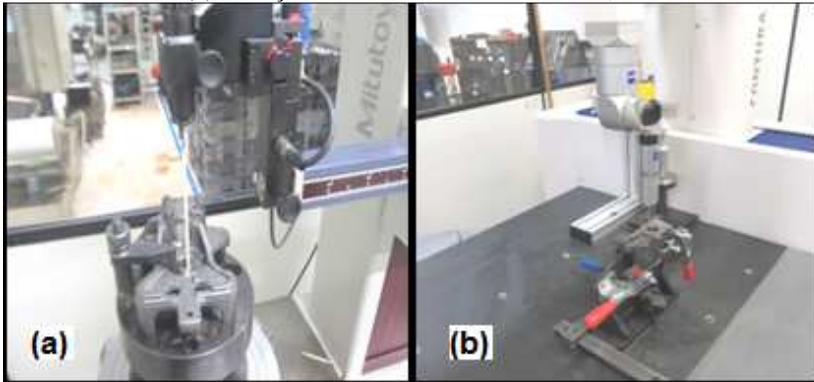
Figura 44 - Representação esquemática das regiões de medição do erro de circularidade para o furo de 5,40mm.



FONTE: Do autor.

A Figura 45 ilustra a forma de posicionamento dos corpos de prova durante as medições de circularidade. Os equipamentos mostrados nesta figura estão descritos no capítulo Materiais e Métodos. Já os tempos de medições individuais da circularidade para cada intervalo de controle foram 5 minutos para os furos de 15,50mm e 3 minutos para os furos de 5,40mm.

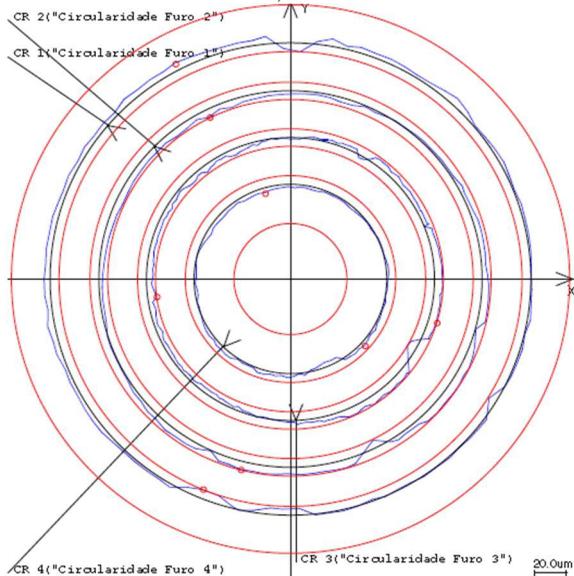
Figura 45 - (a) Medição de circularidade do furo de 15,50mm no circularímetro. (b) Medição de circularidade do furo de 5,40mm na MMC.



FONTE: Do autor.

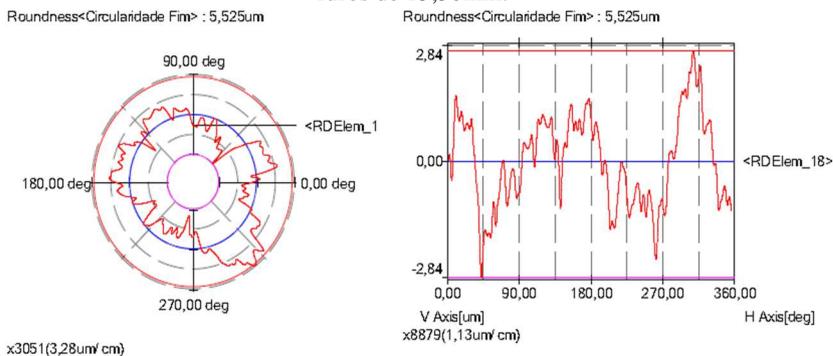
Os corpos de provas medidos no circularímetro foram fixados em um dispositivo especial que garantiu o alinhamento e paralelismo entre o furo do mancal e o eixo do equipamento. Já para os corpos de provas medidos na MMC utilizou-se o procedimento de alinhamento dos furos em relação ao sistema de coordenadas do equipamento. Os modelos de gráficos resultantes das medições de circularidade dos respectivos furos usinados estão ilustrados nas Figuras 46 e 47.

Figura 46 - Exemplo de gráfico resultante da medição de circularidade dos furos de 5,40mm.



FONTE: Do autor.

Figura 47 - Exemplo de gráfico resultante da medição de circularidade dos furos de 15,50mm.



FONTE: Do autor.

4.5 AVALIAÇÃO DA CONDIÇÃO FINAL DAS BROCAS

As imagens das condições finais das brocas foram feitas após o término dos ensaios. O objetivo desta avaliação adicional é buscar uma melhor compreensão dos processos de furação estudados, além de servir como suporte para a análise de desempenho das ferramentas conforme as diferentes condições testadas.

Para tanto, foi utilizado o microscópio eletrônico de varredura (MEV) marca JEOL, modelo JSM-6390LV, instalado no Laboratório Central de Microscopia Eletrônica (LCME) na Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC) – Figura 48.

Figura 48 - Microscópio eletrônico de varredura utilizado para avaliação das ferramentas.



FONTE: LCME, 2013.

5 APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS

Neste capítulo são apresentados os resultados dos ensaios de furação, com vistas à abordagem fundamentada das principais características estudadas neste trabalho, tais como as vidas obtidas em cada broca influenciadas pelas condições de usinagem específicas ($v_c \times f$), as análises do erro de circularidade dos furos produzidos e as análises econômicas do processo. A apresentação destes resultados dar-se-á através de gráficos e tabelas.

Para avaliação dos dados de circularidade dos furos produzidos fez-se necessária a observação sequencial da população de dados gerados, constatando-se que não houve valores com grande dispersão, mas sim, a ocorrência de uma distribuição progressiva e crescente do erro de circularidade na medida em que os tempos de vida das brocas aumentavam.

Os cálculos das curvas econômicas foram realizados utilizando valores em reais (R\$) empregados nos levantamentos de custo de chão de fábrica da empresa colaboradora deste estudo. No entanto, por questões de sigilo industrial, para a apresentação dos resultados das análises econômicas os dados foram convertidos para o formato de unidade monetária (UM). Porém, este aspecto não inibiu os resultados da análise econômica, visto que os afastamentos e perfis das curvas representam as condições reais identificadas no estudo de caso feito no chão de fábrica.

Como suporte na avaliação dos resultados obtidos foi empregada uma ferramenta estatística para análise da variância, o teste de ANOVA sobre a população de dados, em intervalos de confiança de 95%, com o propósito de identificar qual variável apresentou diferença estatisticamente significativa sobre os resultados do tempo de vida e circularidade. A análise de variância é utilizada para comparar a variação entre as médias de dois ou mais grupos em função da variação contida dentro de cada grupo. O teste de ANOVA identifica se a hipótese H_0 é verdadeira, ou seja, para verificação se todas as médias são iguais. Esta análise estatística não identifica se uma média é maior do que a outra, e sim simplesmente testa se as médias são todas iguais ou se existe alguma média diferente. Para isto considerou-se um intervalo de confiança de 95% e o valor de p menor que 0,05 (GOMES, 1987). Além disto, foi utilizada a análise de capacidade para avaliar a circularidade dos furos produzidos. Todos estes procedimentos estatísticos foram realizados através do *software* MINITAB 14.

5.1 ANÁLISE DA CIRCULARIDADE DOS FUROS

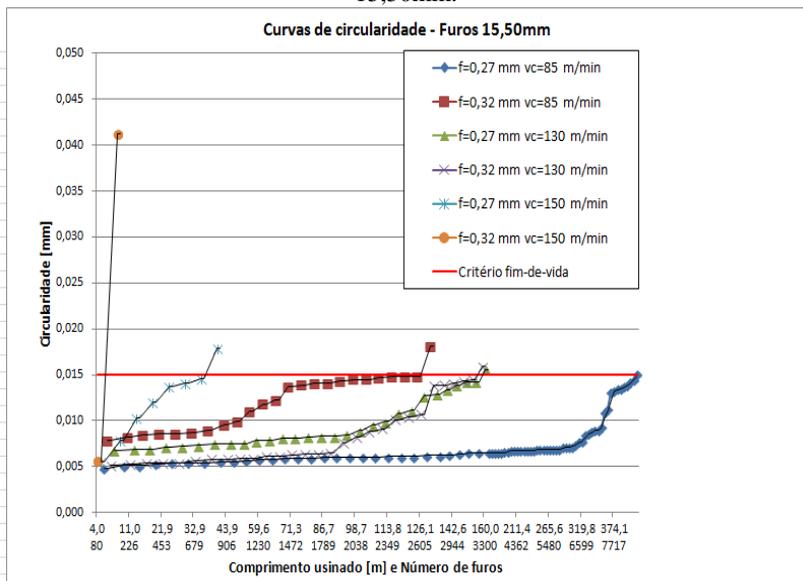
5.1.1 Circularidade dos furos de diâmetro 15,50mm

Na Figura 49 verifica-se o comportamento da circularidade dos furos de diâmetro 15,50mm para cada condição de usinagem ensaiada. A análise estatística, de acordo com os valores p ($v_{c85m/min} = 2,33 \times 10^{-46}$, $v_{c130m/min} = 2,78 \times 10^{-29}$, $v_{c150m/min} = 0,002$, $f_{0,27mm} = 8,96 \times 10^{-55}$, $f_{0,32mm} = 1,27 \times 10^{-19}$) obtidos no teste de ANOVA, indicou que para um intervalo de confiança de 95%, o aumento do número de furos apresentou diferença significativa nos valores de circularidade em todos os parâmetros de corte ($v_c \times f$). Nos Apêndices C e D são apresentados os gráficos obtidos no circularímetro Mitutoyo e os testes de ANOVA dos valores de circularidade dos furos de 15,50mm. Os dados empregados no gráfico da Figura 49 ilustram a média das medições feitas nas profundidades de 8, 24 e 41mm.

Um aspecto importante a ser abordado é o problema que o batimento total, em razão da elevada relação L/D , do conjunto ferramenta-cone-máquina pode causar no comportamento dimensional de um furo, de modo que se entende quanto mais elevada estiver a relação L/D , maior será a influência no aumento da variação dimensional do furo usinado. Por exemplo, Oliveira (2008) quando estudou o resultado da circularidade na furação de ferro fundido vermicular, avaliando duas profundidades e três velocidades de corte diferentes, afirmou que uma relação L/D superior a 5 vezes o diâmetro resulta em um maior erro de circularidade dos furos. Já Beltrão e Morelo (2013) concluíram em seus experimentos em usinagem de aço SAE1045 com barras de mandrilhar internas com corpo de aço, metal-duro e antivibratória que a estabilidade da barra de aço ficou comprometida com o balanço de 4 vezes o diâmetro. Porém, com dois milímetros a menos de balanço sua estabilidade retornou e a rugosidade ficou muito próxima dos balanços mais baixos.

Por sua vez, neste trabalho nos furos de diâmetro 15,50mm produzidos com brocas de pontas intercambiáveis montadas em barra de corpo de aço, a maior relação L/D foi de até 3 vezes o diâmetro, o que provavelmente contribuiu para o aumento da rigidez, favorecendo o comportamento visto no erro de circularidade desses furos.

Figura 49 - Curva de comportamento da circularidade para os furos de 15,50mm.



FONTE: Do autor.

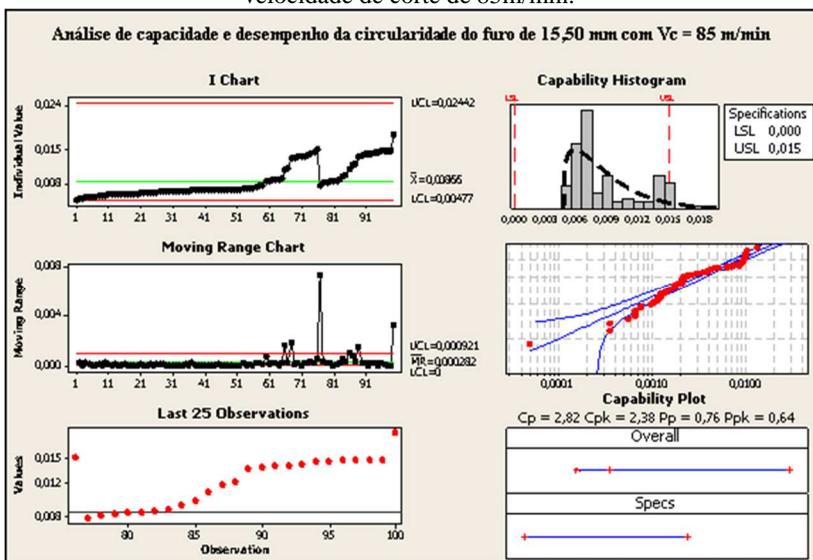
Na análise do gráfico da Figura 49 verificou-se que sob as velocidades de corte de 85m/min e 130m/min, o comportamento evolutivo da circularidade na condição de início de vida é semelhante. Após este estágio, as curvas de velocidade de corte de 130m/min apresentam praticamente o mesmo desempenho em ambos os avanços aplicados até atingirem o critério de fim de vida estabelecido. Já as curvas com velocidade de 85m/min evoluíram de forma diferente, ou seja, com o avanço de 0,27mm obteve-se um maior número de furos produzidos do que com avanço de 0,32mm. Este fato pode estar relacionado com a diminuição do avanço, a qual ocasiona a redução da velocidade de avanço e, conseqüentemente, o tempo de corte efetivo no furo é maior, possibilitando uma maior permanência da ferramenta, alcançando uma melhor correção contínua do erro de forma (GOMES *et al*, 2011). Outra possibilidade é que o avanço está diretamente associado com a força de usinagem. Desta maneira a redução do avanço provocou uma diminuição na força de usinagem resultando em uma menor sollicitação de esforços na broca, e provavelmente este aspecto pode ter favorecido o erro de circularidade (MACHADO *et al*, 2009).

Além disso, a velocidade de corte de 85m/min foi a velocidade de corte ensaiada mais baixa, de modo que as temperaturas geradas no processo foram menores, aumentando a vida da broca. Em situação oposta está a velocidade de corte de 150m/min, na qual se encontrou o menor número de furos produzidos, pois o erro de circularidade cresceu rapidamente. Este comportamento era aguardado, visto que a elevação da velocidade de corte está relacionada com o aumento das temperaturas geradas, acelerando assim o desgaste das brocas (STEMMER, 2005).

Nas figuras 50, 51 e 52 verificam-se os comportamentos das variações dimensionais da circularidade dos furos de 15,50mm em relação com cada velocidade de corte empregada nos ensaios. A circularidade média obtida para a velocidade de corte de 85m/min foi 0,0087mm, com índices de capacidade e de desempenho potencial de processo ($C_p = 2,82$, $C_{pk} = 2,38$, $P_p = 0,76$ e $P_{pk} = 0,64$) que indicam que o processo é capaz e estável. A circularidade média para a velocidade de corte de 130m/min foi 0,0090mm, com índices de capacidade e de desempenho potencial de processo ($C_p = 1,7$, $C_{pk} = 1,36$, $P_p = 0,79$ e $P_{pk} = 0,63$) que indicam que o processo é capaz e estável. A circularidade média para a velocidade de corte de 150m/min foi 0,0142mm, com índices de capacidade e de desempenho potencial de processo ($C_p = 0,25$, $C_{pk} = 0,02$, $P_p = 0,24$ e $P_{pk} = 0,02$) que indicam que o processo não é capaz de reproduzir furos com circularidade estável.

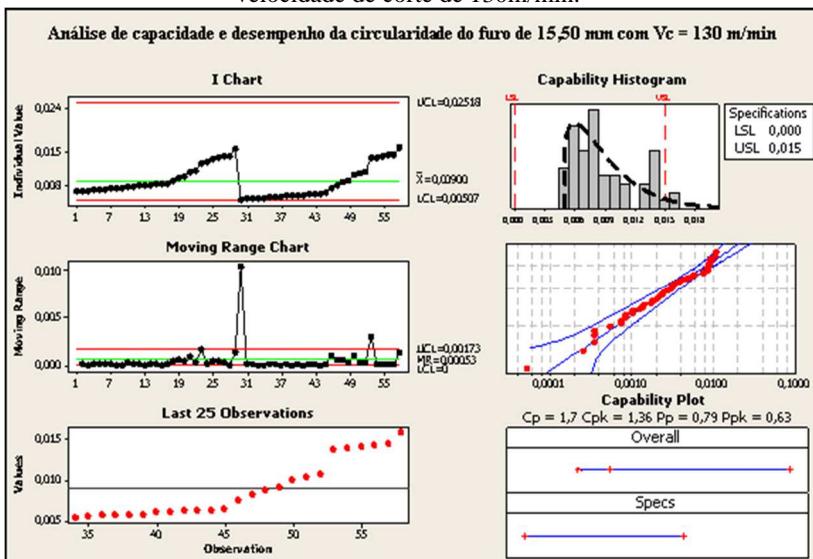
As análises consideraram os índices de capacidade C_p e C_{pk} como referências para a avaliação do comportamento do erro de circularidade, além disso é importante destacar que a circularidade é conceituada como uma grandeza unidirecional. Segundo a *American Society for Quality Control ASQC* (1986) o valor mínimo recomendado para a capacidade (C_p e C_{pk}) de um processo é 1,33.

Figura 50 - Capacibilidade da circularidade do furo de 15,50mm para a velocidade de corte de 85m/min.



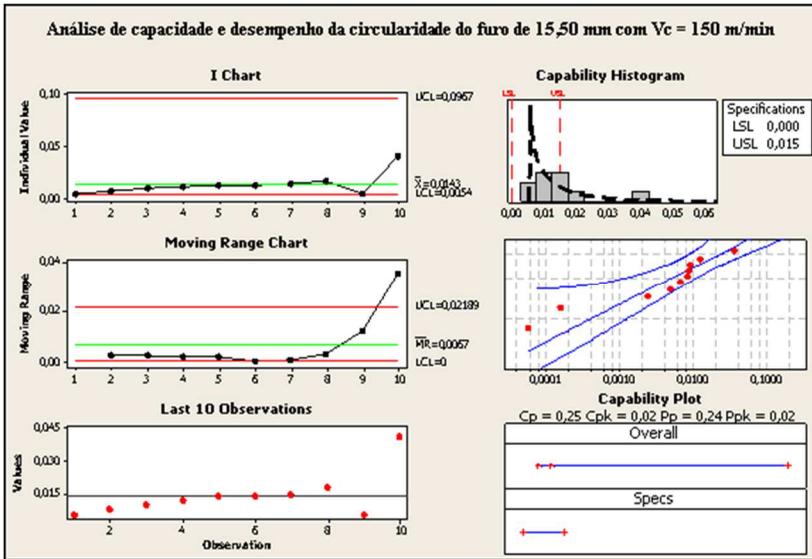
FONTE: Do autor.

Figura 51 - Capacibilidade da circularidade do furo de 15,50mm para a velocidade de corte de 130m/min.



FONTE: Do autor.

Figura 52 - Capacidade da circularidade do furo de 15,50mm para a velocidade de corte de 150m/min.



FONTA: Do autor.

Conforme Montgomery (2004), quando um processo está sob controle recomenda-se que para a avaliação do potencial provável de capacidade do processo utilizem-se os índices C_p e C_{pk} . Neste estudo não houve valores de circularidade muito dispersos que ultrapassassem o limite máximo estabelecido, demonstrando a estabilidade do processo.

Outro aspecto importante que deve ser considerado foi o fato dos ensaios de furação terem sido realizados propositalmente até que a circularidade ultrapassasse o limite máximo estabelecido, o que caracterizava o fim do ensaio. Esta condição gerou valores de circularidade indesejados, que poderiam ter sido evitados caso o processo fosse interrompido previamente.

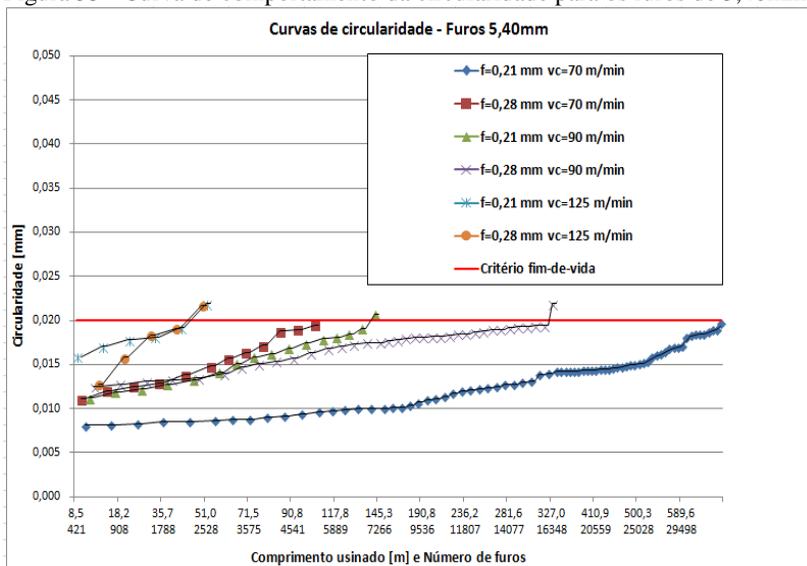
O aspecto funcional envolvendo o erro de circularidade do furo de 15,50mm está diretamente ligado às operações subsequentes, com destaque ao processo de brunimento. Nesta situação, variações dimensionais indesejadas podem ocasionar falhas no brunimento realizado posteriormente na seção deste furo passante.

5.1.2 Circularidade dos furos de diâmetro 5,40mm

Na Figura 53 observa-se o comportamento da circularidade dos furos de diâmetro 5,40mm para cada condição de usinagem avaliada. A análise estatística de acordo com os valores p ($v_{c70\text{m/min}} = 4,97 \times 10^{-57}$, $v_{c90\text{m/min}} = 6,64 \times 10^{-44}$, $v_{c125\text{m/min}} = 6,13 \times 10^{-10}$, $f_{0,21\text{mm}} = 8,21 \times 10^{-63}$, $f_{0,28\text{mm}} = 3,25 \times 10^{-44}$) obtidos através do teste de ANOVA mostrou que, para um intervalo de confiança de 95%, o aumento do número de furos apresentou diferença estatisticamente significativa nos valores de circularidade para todas as combinações de velocidade de corte e avanço. No Apêndice E estão apresentados os testes de ANOVA dos valores de circularidade dos furos de 5,40mm.

Clímaco (2011) verificou em seus estudos comparativos entre os processos de alargamento e mandrilamento em ferro fundido nodular, que a velocidade de corte e o avanço apresentaram influência significativa sobre os resultados de circularidade dos furos madrilados.

Figura 53 - Curva de comportamento da circularidade para os furos de 5,40mm.



FONTE: Do autor.

Na indústria, não se pratica comumente a medição do erro de forma em furos com diâmetros relativamente pequenos, como os produzidos neste experimento. No entanto, para este estudo de caso

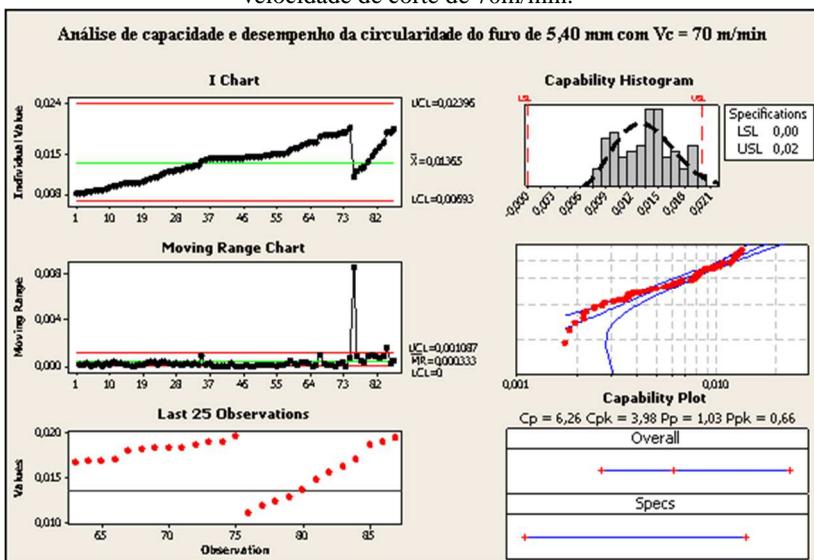
específico, por exemplo, uma variação dimensional indesejada pode conduzir a um problema de montagem no assentamento do cilindro.

Em geral, na condição de início de vida, pode-se afirmar que a maioria dos parâmetros de corte avaliados apresentaram uma tendência de maior concentração do erro de circularidade na faixa média do limite especificado para os experimentos. Este comportamento já era aguardado devido ao histórico do processo mantido pela empresa colaboradora ao longo dos anos. Da metade da vida da ferramenta em diante observou-se uma tendência no aumento da amplitude dos resultados, comportamento este que pode indicar o acentuado desgaste no gume da broca a partir daquele momento, afetando o erro de forma dos furos evolutivamente (CASTILLO, 2005).

No Apêndice F encontram-se os gráficos obtidos na MMC *Carl Zeiss*. Os dados empregados no gráfico da Figura 53 representam a média das medições feitas nas profundidades de 1,5, 3,5 e 5mm, sendo que com base nos resultados entende-se que provavelmente a excentricidade do conjunto ferramenta-cone-máquina também não exerceu influência negativa sobre esta operação de furação, visto que a relação L/D máxima foi aproximadamente de até 3,5 vezes o diâmetro.

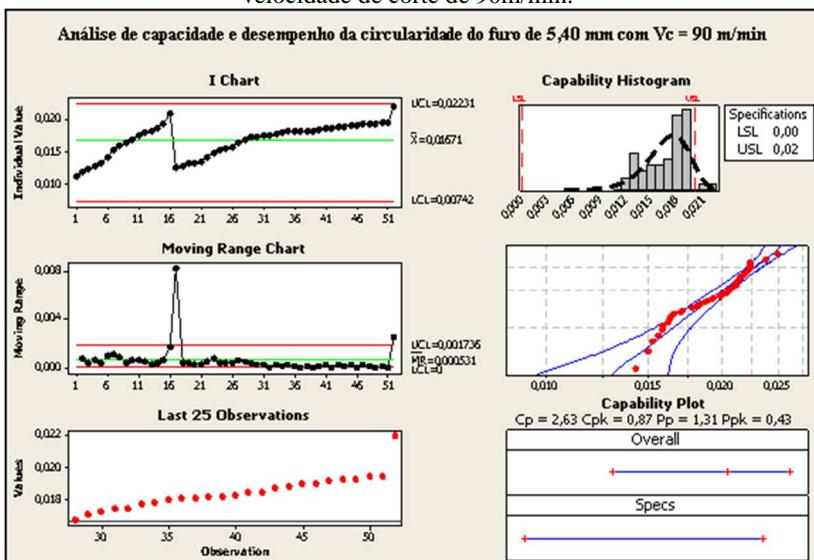
Nas figuras 54, 55 e 56 observam-se os comportamentos das variações dimensionais da circularidade dos furos de 5,40mm considerando cada velocidade de corte utilizada nos ensaios. A circularidade média obtida com velocidade de corte de 70m/min foi 0,0137mm, com índices de capacidade e de desempenho potencial de processo ($C_p = 6,26$, $C_{pk} = 3,98$, $P_p = 1,03$ e $P_{pk} = 0,66$) que indicam que o processo é capaz e estável. A circularidade média sob velocidade de corte de 90m/min foi 0,0167mm, com índices de capacidade e de desempenho potencial de processo ($C_p = 2,63$, $C_{pk} = 0,87$, $P_p = 1,31$ e $P_{pk} = 0,43$) que indicam que o processo não está capaz, sendo necessário o deslocamento do erro de circularidade para próximo dos limites inferiores. A circularidade média sob velocidade de corte de 125m/min foi 0,0180mm, com índices de capacidade e de desempenho potencial de processo ($C_p = 1,25$, $C_{pk} = 0,25$, $P_p = 1,24$ e $P_{pk} = 0,25$) que indicam que o processo não está capaz ocorrendo a necessidade de ajustar o erro de circularidade para próximo dos limites inferiores.

Figura 54 - Capabilidade do erro de circularidade do furo de 5,40mm sob velocidade de corte de 70m/min.



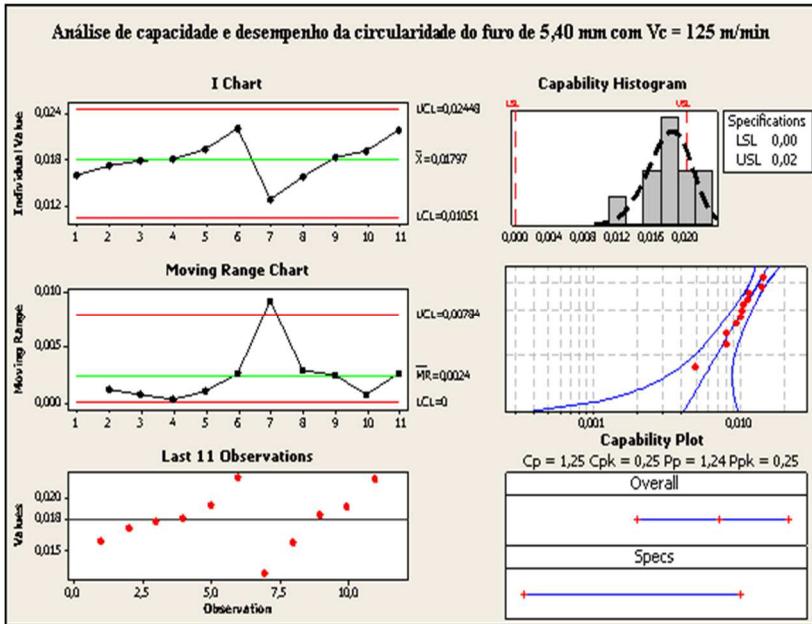
FONTA: Do autor.

Figura 55 - Capabilidade do erro de circularidade do furo de 5,40mm sob velocidade de corte de 90m/min.



FONTA: Do autor.

Figura 56 - Capacidade do erro de circularidade do furo de 5,40mm sob velocidade de corte de 125m/min.



FONTE: Do autor.

Andrade (2005) afirmou nos seus estudos sobre a influência do revestimento em brocas usadas na furação de ferro fundido vermicular, que a maioria das brocas apresentou os melhores resultados de circularidade no início da sua vida do que no seu final, mantendo a mesma velocidade de corte. Os resultados das circularidades dos furos produzidos neste trabalho corroboram tal afirmação.

5.2 RESULTADOS E ANÁLISES DA VIDA DAS FERRAMENTAS

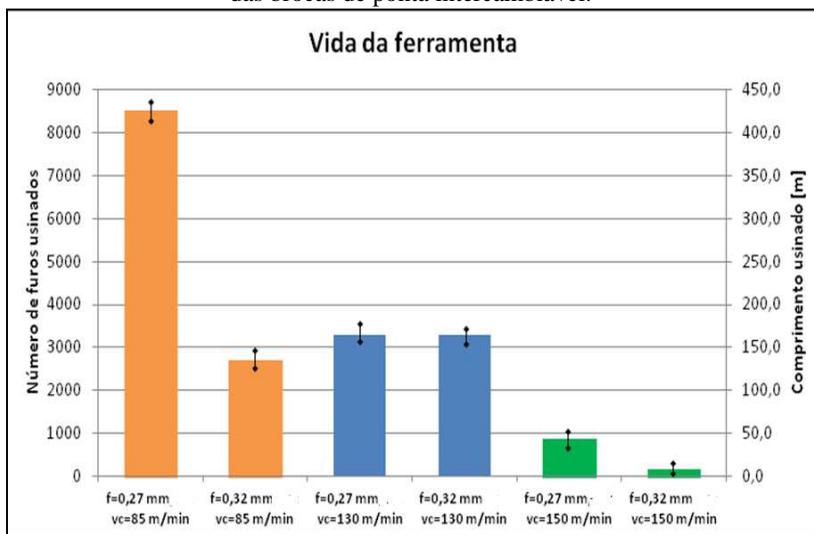
5.2.1 Vida das brocas de ponta intercambiável

No gráfico da Figura 57 estão representados os números de furos produzidos e comprimento usinado para as brocas de ponta intercambiável de diâmetro 15,50mm. Estes resultados são correspondentes à vida total das brocas até atingirem o critério de fim de vida estabelecido para este experimento.

Nos ensaios com velocidade de corte de 85m/min e avanço 0,27mm a broca completou o número de furos produzidos, com a

mudança do avanço para 0,32mm e mantendo esta mesma velocidade de corte observou-se uma expressiva redução na quantidade de furos produzidos. Este comportamento era esperado, uma vez que o aumento do avanço provoca o aumento nas componentes da força de usinagem e aumentam as solicitações mecânicas na ponta da ferramenta, fazendo com que o conjunto ferramenta, composto pelo inserto, haste de fixação e cone adaptador estejam sujeitos às deformações provenientes do aumento destes esforços que impactam na rigidez da broca (MÜHLE, 2000; CLÍMACO, 2011).

Figura 57 - Números de furos produzidos e comprimento usinado nos ensaios das brocas de ponta intercambiável.



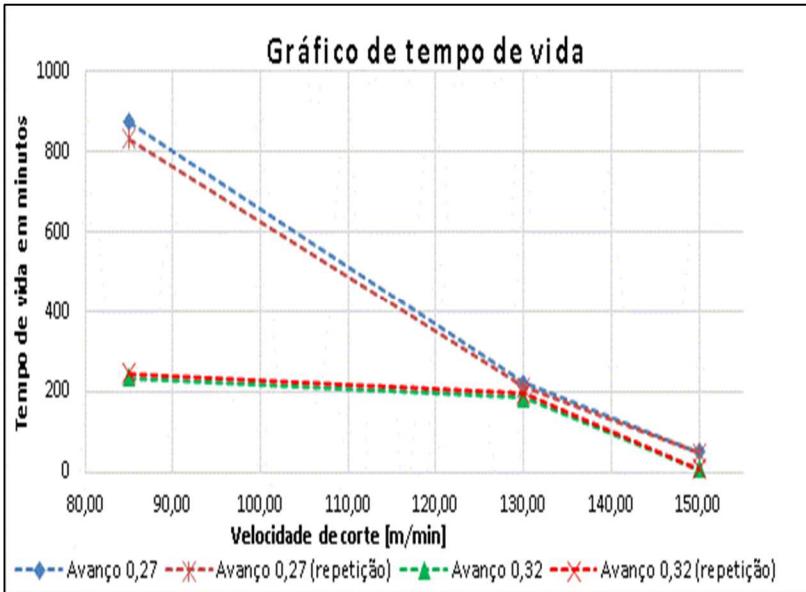
FONTE: Do autor.

Já as brocas ensaiadas na velocidade de corte de 130m/min não apresentaram diferença significativa na quantidade de furos produzidos em função da mudança do avanço, sendo que esta velocidade de corte é a recomendada pelo fabricante e a utilizada pela empresa colaboradora. A replicação dos ensaios apresentou uma boa repetibilidade, considerando-se um intervalo de confiança de 95% e diferença de até 5% entre os números de furos totais produzidos em cada experimento revalidado.

Nos ensaios com a velocidade de corte de 150m/min verificou-se o menor número de furos produzidos. As razões para tal comportamento

podem ser a elevação da temperatura de corte e o alto nível de vibração devido ao aumento da velocidade de corte, uma vez que a força centrífuga (F_c) causadora da vibração é proporcional ao quadrado do aumento da velocidade angular (ω). Este aumento da vibração provoca uma diminuição da qualidade do furo e conseqüente perda de vida, tendo em vista que o movimento descrito pela ponta da ferramenta quando submetido ao processo vibratório é transferido para a parede do furo (DIMLA, 2004). Esta hipótese da vibração é menos provável pelo fato das brocas serem balanceadas pelos fabricantes. Na Figura 58 está representado o gráfico dos tempos de vida em função de cada avanço (0,27 e 0,32mm) combinado com as três velocidades de corte distintas (85, 130, 150m/min).

Figura 58 - Gráfico do tempo de vida para avanços de 0,27 e 0,32mm e velocidades de corte 85, 130 e 150m/min.



FONTE: Do autor.

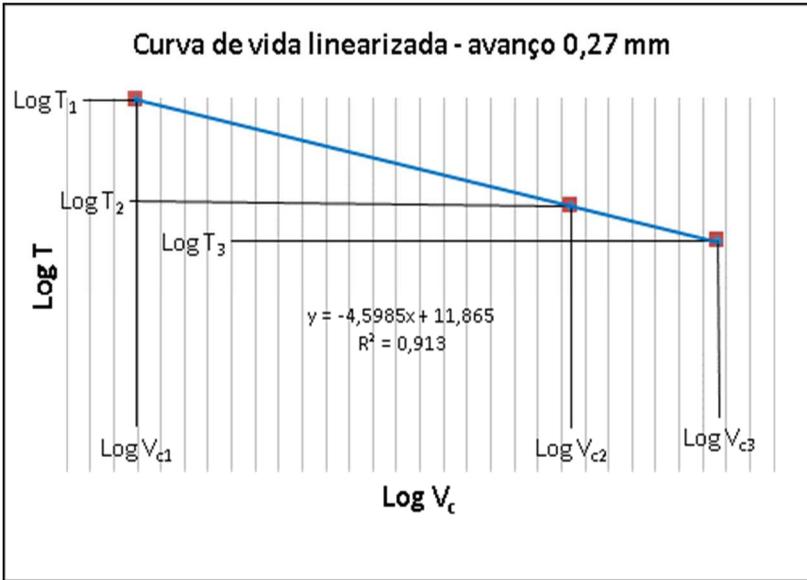
Os resultados para o avanço de 0,27mm (Figuras 57 e 58) mostram a tendência da redução da vida em função do aumento da velocidade de corte, ou seja, de acordo com a teoria apresentada por Taylor (FERRARESI, 1970). Porém, os resultados gráficos de vida da ferramenta encontrados nos ensaios com avanço de 0,32mm (Figuras 57

e 58) mostram percepções diferentes, ou seja, o aumento da velocidade de corte de 85m/min para 130m/min resultou na diminuição do tempo de vida. Em contrapartida, este mesmo aumento na velocidade de corte refletiu-se no incremento do número de furos. Este fato pode ser explicado considerando a análise do tempo de vida, visto que a velocidade de avanço [mm/min] empregada nos ensaios com velocidade de corte de 130m/min foi 35% superior à velocidade de avanço utilizada nos ensaios com velocidade de corte de 85m/min. Neste caso, como a diferença nos números de furos entre ambos os ensaios (85 e 130m/min) foi relativamente baixa (inferior a 35%), a broca sob velocidade de corte de 130m/min produziu em média 580 furos a mais do que com velocidade de corte de 85m/min, no entanto em um menor intervalo de tempo.

De acordo com os valores p ($f_{0,27\text{mm}} = 0,014$; $f_{0,32\text{mm}} = 0,007$), obtidos no teste ANOVA, é possível verificar que a velocidade de corte dentro da faixa estudada, para um intervalo de confiança de 95%, apresenta influência significativa nos resultados do tempo de vida das ferramentas para os dois valores de avanço. No Apêndice G está apresentado o respectivo teste.

Nos ensaios com avanço de 0,27mm foi realizada a regressão linear que permitiu definir as constantes de Taylor para obtenção da Equação de vida da ferramenta. O gráfico da Figura 59 ilustra esta curva de vida linearizada, bem como a Equação da reta, na qual o coeficiente angular encontrado foi de $k = -4,60$ e o coeficiente de determinação foi $R^2 = 0,913$, o que apesar de poucos pontos torna aceitável a regressão linear aplicada.

Figura 59 - Curva de vida linearizada com de 0,27mm e velocidades de corte 85, 130 e 150m/min.



FONTE: Do autor.

Para a curva de vida do ensaio sob avanço de 0,32mm não foi aplicada a regressão linear devido aos resultados desta curva não serem aceitáveis para a adaptação de tal procedimento, visto que o coeficiente de determinação encontrado foi $R^2 = 0,54$.

Na Tabela 8 são apresentados os dados usados (Figura 59) para determinar as constantes de Taylor dos ensaios sob avanço de 0,27mm, assim como os respectivos resultados.

Tabela 8 - Dados das constantes da Equação de Taylor.

Avanço [mm]	v_{c1} [m/min]	T_1 [min]	v_{c2} [m/min]	T_2 [min]	v_{c3} [m/min]	T_3 [min]	k	C_v
0,27	85	983	130	139	150	72	-4,60	7,33 E+11

FONTE: Do autor.

Segundo König e Klocke (2002), a constante k para ferramentas de metal-duro situa-se entre -2,5 a -8. Com isso, verifica-se que os ensaios realizados apresentaram o valor de k conforme relatado pelos

autores. Outro aspecto é que foi utilizada a equação de Taylor simplificada devido as condições específicas propostas para os ensaios.

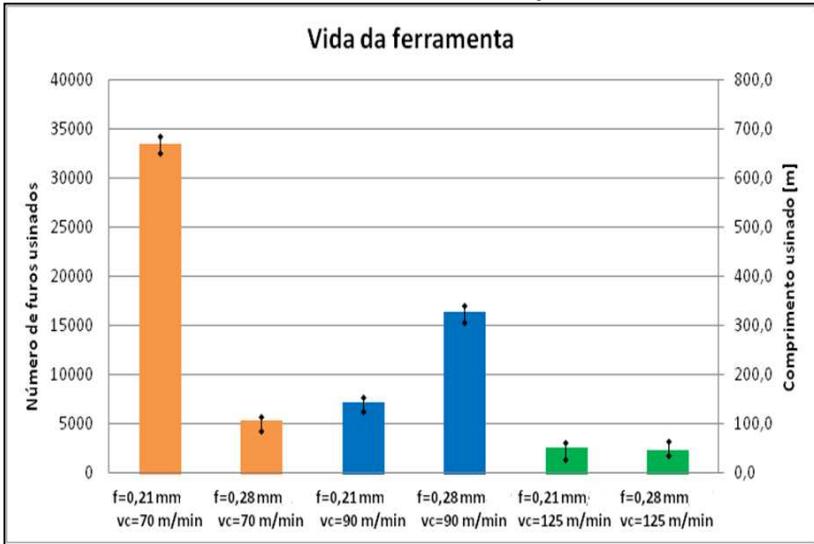
5.2.2 Vida das brocas helicoidais inteiriças

No gráfico da Figura 60 estão apresentados os ensaios de vida das brocas helicoidais inteiriças. Os resultados foram representados em número de furos e comprimento usinado influenciado pelos parâmetros de corte de cada experimento.

Na análise deste gráfico pode-se observar que o maior número de furos produzidos foi com a velocidade de corte de 70m/min combinada com o avanço de 0,21mm. Esta mesma velocidade de corte combinada com o avanço de 0,28mm resultou em um número de furos mais baixo, comparativamente. No entanto, a menor quantidade de furos produzidos ocorreu para a velocidade de corte de 125m/min. Este aspecto evidencia a influência da velocidade de corte sobre a vida da ferramenta, onde o aumento da velocidade de corte resulta no acréscimo da energia gerada (calor) e acarretando assim um menor tempo de vida da ferramenta (KÖNIG e KLOCKE, 2002).

As quantidades de furos produzidos e os respectivos comprimentos usinados são correspondentes à vida total da broca até atingirem o critério de fim de vida estabelecido para o experimento.

Figura 60 - Números de furos produzidos e comprimento usinado nos ensaios das brocas helicoidais inteiriças.

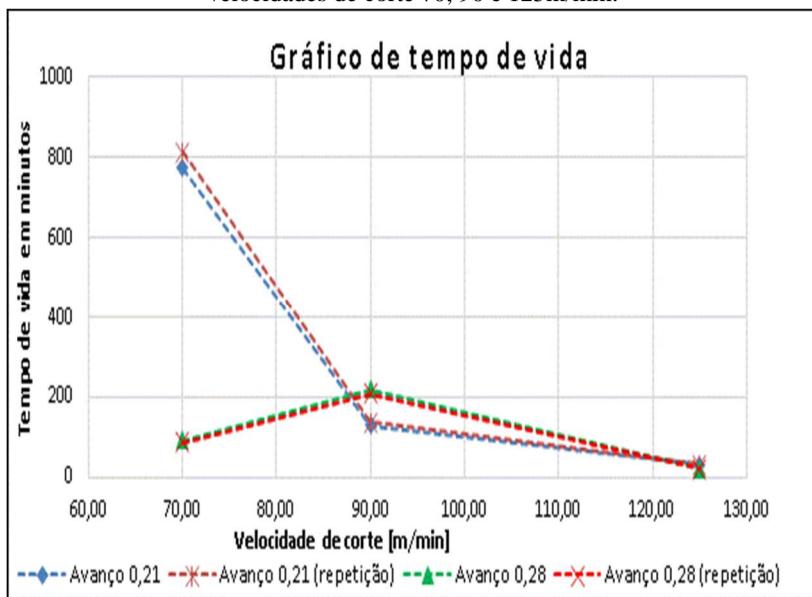


FONTE: Do autor.

O estudo estatístico dos ensaios mostrou que os resultados apresentam uma boa repetibilidade, considerando um intervalo de confiança de 95% e diferença de até 4% entre os números de furos totais produzidos em cada experimento revalidado.

Por sua vez, o gráfico da Figura 61 representa os resultados dos tempos de vida de cada ensaio influenciados pelos dois avanços (0,21 e 0,28mm) e as três velocidades de corte distintas (70, 90, 125m/min). O tempo de vida com avanço de 0,21mm apresentou uma curva decrescente na medida que a velocidade de corte aumentou. Por outro lado, com o avanço de 0,28mm, o maior tempo de vida foi verificado na velocidade de corte intermediária (90m/min).

Figura 61 - Curva de tempo de vida para avanços de 0,21 e 0,28mm e velocidades de corte 70, 90 e 125m/min.



FONTE: Do autor.

Este comportamento encontrado na velocidade de corte de 90m/min combinada com o avanço de 0,28mm pode estar relacionado à presença de vários fatores, entre os quais, ao fato de que com o aumento do avanço o corte se torna mais dinâmico, auxiliando no cisalhamento do cavaco (DINIZ *et al.*,2008). Outro aspecto é que o aumento da velocidade de corte eleva a temperatura gerada no corte contribuindo para a redução da resistência do material da peça, fazendo também com que a força de corte diminua (FERRARESI, 1970; KÖNIG e KLOCKE, 2002). Porém, este aumento na velocidade de corte atinge um limite no qual a temperatura afeta também a ferramenta de corte, neste caso contribuindo para a elevação do desgaste e incapacidade de corte (MACHADO *et al.*, 2009; BELTRÃO e MORELO, 2013). Por este motivo presumível a máxima velocidade de corte ensaiada (125m/min) não alcançou a maior vida.

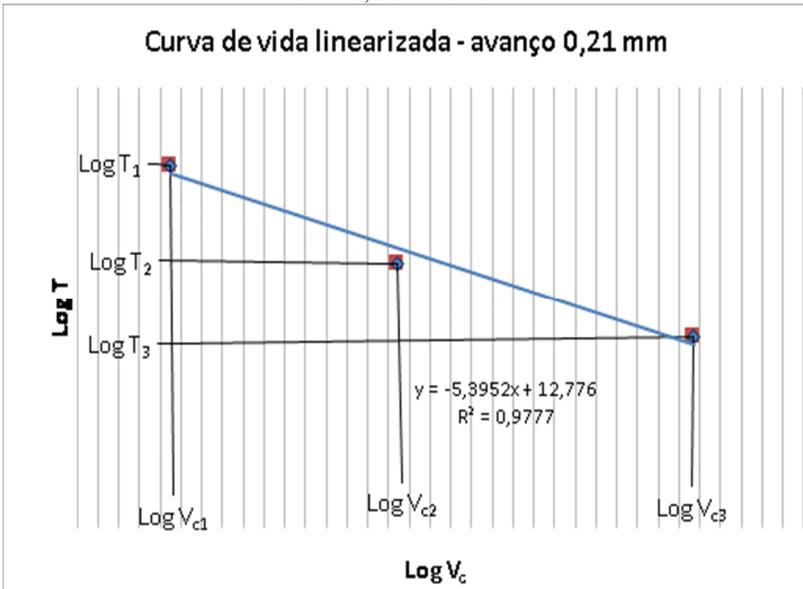
Gomes, Souza e Zanatta (2011) mostraram em seu estudo sobre a influência dos parâmetros de corte aplicados em diferentes geometrias de brocas helicoidais na usinagem de alumínio, que o aumento do avanço combinado com algumas velocidades de corte intermediárias

provocou em algumas geometrias de brocas um maior tempo de vida adotando-se o erro de circularidade dos furos como critério de fim de vida. Os autores relacionaram este comportamento à rigidez da broca e à menor deformação gerada pelo gume de corte transversal.

De acordo com os valores p ($f_{0,21\text{mm}} = 0,04$; $f_{0,28\text{mm}} = 0,014$), obtidos no teste ANOVA, verifica-se que a variação da velocidade de corte, para um intervalo de confiança de 95%, apresenta influência significativa nos tempos de vida das ferramentas para os dois valores de avanço. No Apêndice H está apresentado o respectivo teste.

Nos ensaios sob avanço de 0,21mm foi realizada a regressão linear que permitiu definir as constantes de Taylor para obtenção da equação de vida da ferramenta. O gráfico da Figura 62 ilustra esta curva de vida linearizada e a equação da reta, a qual apresentou como coeficiente angular o valor de $k = -5,40$ e coeficiente de determinação $R^2 = 0,98$, tornando assim aceitável a regressão linear aplicada.

Figura 62 - Curva de vida linearizada sob avanço de 0,21mm e velocidades de corte 70, 90 e 125m/min.



FONTE: Do autor.

Para a curva de vida do ensaio sob avanço de 0,28mm não foi aplicado o mesmo critério da regressão linear, pois o coeficiente de determinação encontrado foi $R^2 = 0,45$.

Na Tabela 9 estão contidos os dados usados (Figura 62) para determinar as constantes de Taylor dos ensaios sob avanço de 0,21mm, assim como os respectivos resultados.

Tabela 9 - Dados das constantes da Equação de Taylor.

Avanço [mm]	v_{c1} [m/min]	T_1 [min]	v_{c2} [m/min]	T_2 [min]	v_{c3} [m/min]	T_3 [min]	k	C_v
0,21	70	663	90	171	125	29	-5,40	5,970 E+12

FONTE: Do autor.

Castillo (2005) em seus estudos sobre a furação do ferro fundido cinzento utilizando brocas de metal-duro, encontrou um valor médio de -5,79 para a constante k de Taylor, valor este muito próximo ao encontrado neste estudo.

5.3 ANÁLISE ECONÔMICA

Com o intuito de verificar os aspectos econômicos e mostrar as melhores condições de usinagem do ponto de vista do custo e tempo de fabricação, foi realizada uma análise simplificada de custo da usinagem para cada geometria de ferramenta empregada neste estudo. Para os ensaios nos quais não foi possível traçar a curva proposta por Taylor, não puderam ser calculadas as velocidades de corte para ótimo tempo de produção (v_{coz}) e ótimo custo (v_{cok}). Nestes casos a análise econômica foi realizada com base nos resultados dos custos de fabricação por peça (K_F) e tempo de fabricação por peça (t_e).

Desta maneira, as análises foram divididas em itens, para cada geometria de ferramenta analisada.

5.3.1 Condições econômicas para as brocas com ponta intercambiável

Foram utilizados os valores de lote, custos e tempos apresentados na Tabela 10 para obter a vida da ferramenta para o ótimo tempo e custo de fabricação (T_{coz} , T_{cok}), bem como as velocidades de corte de ótimo tempo e custo (v_{coz} , v_{cok}), o tempo de fabricação por peça (t_e) e os custos de fabricação por peça (K_F).

Tabela 10 - Informações de lote, tempos e custos para as brocas com ponta intercambiável.

Informação	Valores
Tamanho do lote “m”	9450 peças
Custo da máquina e operador por hora (K_{ML}) [UM\$/h]	93
Custo de ferramenta - broca de 15,50mm [UM\$/unidade]	145,74
Custo para 2 afiações da ponta de metal-duro [UM\$]	112
Tempo de preparação da máquina (t_r)	180 min/lote
Tempo de troca da ferramenta (t_w)	8 min/ferramenta
Tempos secundários (t_n)	0,02 min/pç

FONTE: Do autor.

Ressalva-se que a vida da ponta intercambiável afiada considera-se a mesma que uma ponta de metal-duro nova. Além disso, o tamanho de lote é referente a uma quantidade de produção mínima sugerida e o tempo de troca da ferramenta (t_w) corresponde ao somatório de tempo médio necessário para remover a ferramenta da máquina, substituir, realizar o presset e colocá-la novamente no magazine da máquina.

Deste modo, na Tabela 11 estão contidas as vidas teóricas da ferramenta para o ótimo tempo e custo de fabricação (T_{coz} , T_{cok}) e as velocidades de corte teóricas de ótimo tempo e custo (v_{coz} , v_{cok}) para as condições ensaiadas com avanço de 0,27mm, utilizando a constante da Equação de Taylor anteriormente obtida e as equações descritas no capítulo 2.5.1.

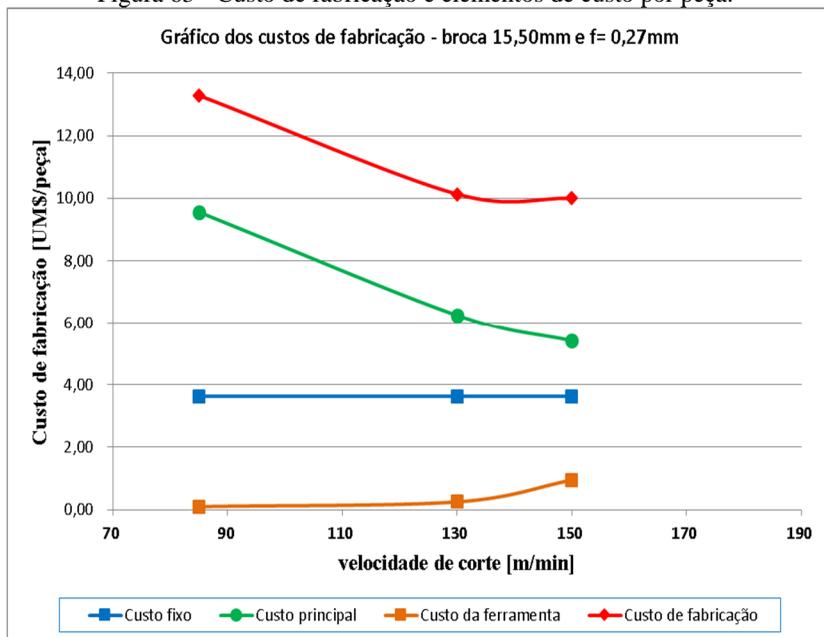
Tabela 11 - Resultados das condições econômicas para o avanço de 0,27mm.

	Avanço 0,27mm
T_{coz} [min]	29
v_{coz} [m/min]	183
T_{cok} [min]	32
v_{cok} [m/min]	179

FONTE: Do autor.

Na Figura 63 é apresentado o gráfico do custo de fabricação por peça para o avanço de 0,27mm e velocidades de corte de 85, 130 e 150m/min.

Figura 63 - Custo de fabricação e elementos de custo por peça.



FONTE: Do autor.

Visando uma comparação dos resultados gerais, na Tabela 12 é mostrada a análise econômica envolvendo os custos e tempos de fabricação por peça de todos os parâmetros de corte empregados nos ensaios das brocas de 15,50mm. Para isto foram considerados os tempos reais de vida das ferramentas obtidos nos respectivos experimentos. Os resultados apresentados demonstram que as condições de usinagem utilizadas no ensaio 4.0 ($v_c = 130\text{m/min}$; $f = 0,32\text{mm}$) são mais favoráveis em relação às demais, pois o seu custo e tempo de fabricação por peça são os menores valores entre os seis ensaios comparados.

Tabela 12 - Resultados dos custos e tempos de fabricação por peça para todos os ensaios das brocas de pontas intercambiáveis.

	Ensaio 1.0	Ensaio 2.0	Ensaio 3.0	Ensaio 4.0	Ensaio 5.0	Ensaio 6.0
Custo de fabricação por peça (K_f) [UM\$/pç]	13,29	12,01	10,13	9,16	10,00	13,39
Tempo de fabricação por peça (t_c) [min]	0,143	0,129	0,109	0,098	0,106	0,138

FONTA: Do autor.

Avaliando somente o tempo de fabricação por peça (t_c), verifica-se que os ensaios 3, 4 e 5 se destacaram dos demais, pois notadamente possuem os menores tempos, ou seja, a melhor produtividade. Este comportamento favorável nestes ensaios também foi observado em relação ao custo de fabricação por peça.

De fato, os piores desempenhos econômicos foram constatados nos parâmetros de corte empregados nos ensaios 1.0 ($v_c = 85\text{m/min}$; $f = 0,27\text{mm}$) e 6.0 ($v_c = 150\text{m/min}$; $f = 0,32\text{mm}$), já que o custo e o tempo de fabricação por peça foram os maiores. No caso do ensaio 1.0, o tempo principal (t_h) foi o mais elevado entre os demais ensaios, logo contribuindo para o aumento do tempo de fabricação por peça (t_c). Já quanto ao ensaio 6.0, apesar do tempo principal (t_h) deste ensaio ser o menor de todos, a perda acentuada na vida da ferramenta (figura 57) sob estes parâmetros de corte impactou no aumento expressivo do tempo de troca da ferramenta (t_w), resultando em um maior período de máquina parada. Esta circunstância remete ao aspecto que a maior parcela do custo de fabricação por peça está na eficiência na qual a máquina-ferramenta é aproveitada no chão de fábrica. Por consequência, existe uma velocidade de corte na qual os tempos e custos de fabricação são ideais para o melhor desempenho econômico do processo (DINIZ *et al.*, 2008; MACHADO *et al.*, 2009).

Portanto, diante dos resultados discutidos pode-se concluir que dentre os parâmetros ensaiados os adotados no ensaio 4 acarretaram os melhores resultados econômicos. Estes parâmetros de corte permitem uma produção a baixo custo e a ótimos tempos de manufatura, em relação às outras condições analisadas.

Kalss *et al.* (2006) mostraram que otimizando a ferramenta de corte, por intermédio do aumento de 20% nos parâmetros de corte, pode

representar uma redução de até 15% dos custos totais de manufatura. Tal afirmação suporta os resultados alcançados neste trabalho.

5.3.2 Condições econômicas das brocas helicoidais inteiriças

Os valores de lote, custos e tempos mostrados na Tabela 13 representam os dados usados para calcular a vida da ferramenta para o ótimo tempo e custo de fabricação (T_{coz} , T_{cok}), assim como as velocidades de corte de ótimo tempo e custo (v_{coz} , v_{cok}), tempo de fabricação por peça (t_e) e os custos de fabricação por peça (K_F).

Tabela 13 - Informações de tempos e custos das brocas helicoidais inteiriças.

Informação	Valores
Tamanho do lote “m”	9450 peças
Custo da máquina e operador por hora (K_{ML}) [UM\$/h]	93
Custo de ferramenta - broca de 5,40mm [UM\$/unidade]	159
Custo para 3 afiações - broca de 5,40mm [UM\$]	165
Tempo de preparação da máquina (t_r)	180 min/lote
Tempo de troca da ferramenta (t_w)	8 min/pç
Tempos secundários (t_n)	0,02 min/pç

FONTE: Do autor.

Logo, na Tabela 14 estão ilustradas as vidas teóricas da ferramenta para o ótimo tempo e custo de fabricação (T_{coz} , T_{cok}) e as velocidades de corte teóricas de ótimo tempo e custo (v_{coz} , v_{cok}), para as condições ensaiadas sob avanço de 0,21mm, empregando a constante de Taylor e as equações mostradas no capítulo 2.5.1.

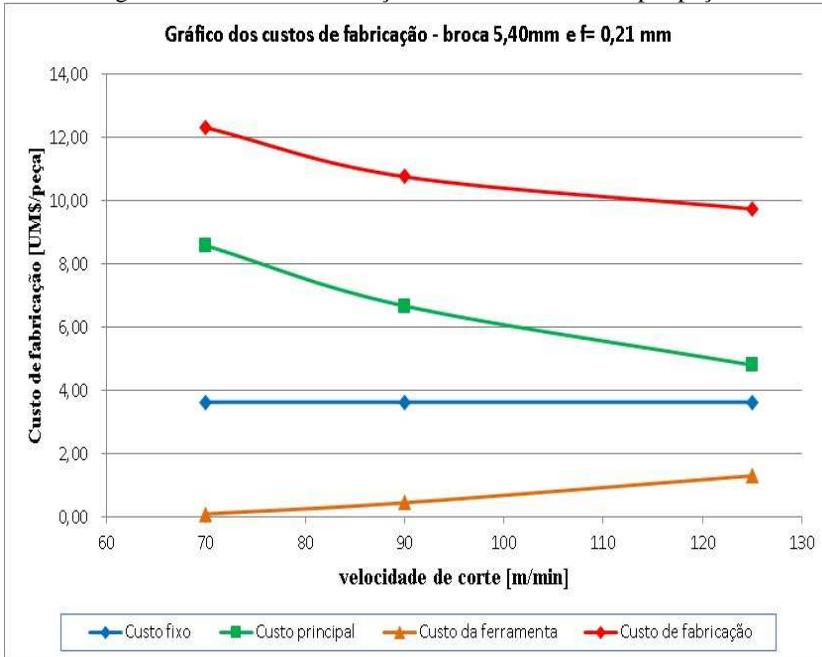
Tabela 14 - Resultados das condições econômicas para o avanço de 0,21mm.

	Avanço 0,21mm
T_{coz} [min]	35
v_{coz} [m/min]	121
T_{cok} [min]	39
v_{cok} [m/min]	118

FONTE: Do autor.

Na Figura 64 é apresentado o gráfico do custo de fabricação por peça para o avanço de 0,21mm e velocidades de corte de 70, 90 e 125m/min.

Figura 64 - Custo de fabricação e elementos de custo por peça.



FONTE: Do autor.

Na Tabela 15 é mostrada a análise econômica abrangendo os custos e tempos de fabricação por peça de todas as condições de usinagem empregadas nos ensaios das brocas de 5,40mm. Tendo em vista tais aspectos, os resultados apresentados mostram que a condição de usinagem empregada no ensaio 12 ($v_c = 125\text{m/min}$; $f = 0,28\text{mm}$) é a mais vantajosa em relação às demais, pois o seu custo de fabricação (K_F) e tempo de fabricação por peça (t_e) são os menores valores entre os seis ensaios realizados.

Tabela 15 - Resultados dos custos e tempos de fabricação por peça de todos os ensaios das brocas helicoidais inteiriças.

	Ensaio 7.0	Ensaio 8.0	Ensaio 9.0	Ensaio 10	Ensaio 11	Ensaio 12
Custo de fabricação por peça (K_f) [UM\$/pç]	12,32	10,70	10,76	8,84	9,75	8,66
Tempo de fabricação por peça (t_c) [min]	0,132	0,114	0,115	0,095	0,103	0,092

FONTE: Do autor.

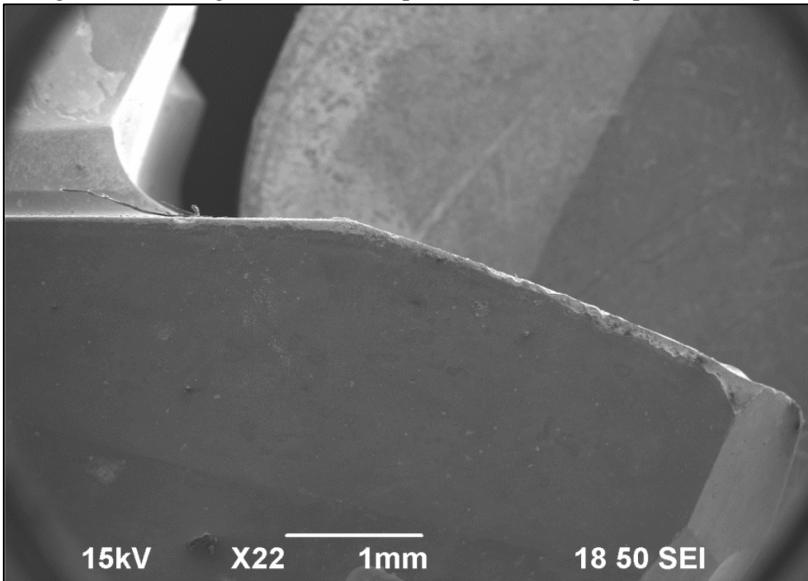
No que se refere aos avanços empregados nos ensaios, verifica-se um destaque para o avanço de 0,28mm (ensaios 8, 10 e 12), analisando a perspectiva dos menores valores para o custo de fabricação e também tempo de operação em relação às demais. Este panorama de aumento do avanço, considerando as mesmas velocidades de cortes, resultou na diminuição dos custos e tempos de fabricação por peça em todos os ensaios comparados. Tal comportamento pode ser justificado por alguns aspectos, entre os quais está o fato do avanço possuir menor influência na perda de vida da ferramenta do que a velocidade de corte e o aumento do avanço mantendo a mesma velocidade de corte provoca o acréscimo na velocidade de avanço (mm/min) que consequentemente reduzirá o tempo principal de fabricação. Desta maneira, seguindo a tendência de elevar o avanço mantendo a mesma velocidade de corte, a expectativa é que ocorra uma redução no custo e tempo de fabricação, conforme mostraram os resultados deste respectivo estudo.

O desempenho menos favorável pode ser atribuído ao ensaio 7.0 ($v_c = 70\text{m/min}$; $f = 0,21\text{mm}$), devido aos maiores valores no custo e tempo de fabricação, simultaneamente. Embora esta condição de usinagem tenha possibilitado a maior vida da ferramenta, comparativamente, o seu tempo principal de usinagem (t_h) foi igualmente o mais elevado, acarretando um acréscimo do tempo e custo de fabricação por peça.

5.4 ANÁLISE DAS BROCAS

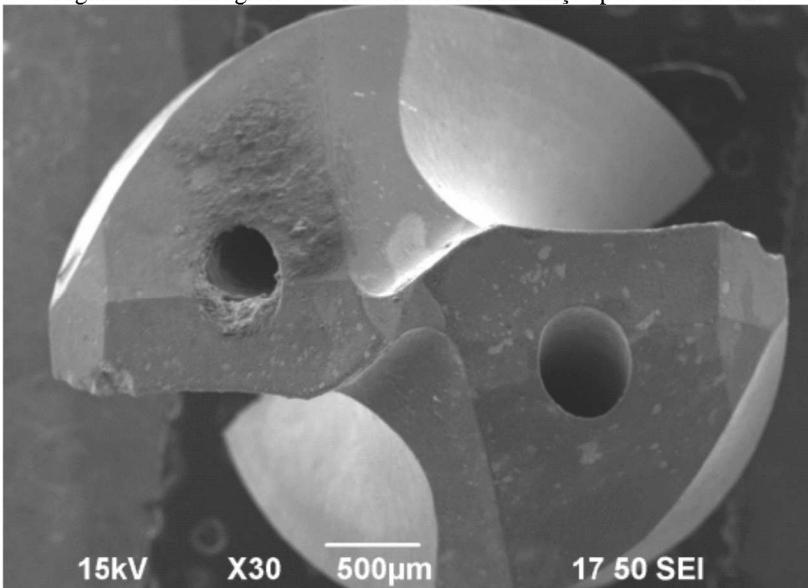
Na Figura 65 tem-se a imagem da broca de ponta intercambiável na condição de fim de vida, após o ensaio 5, assim como na Figura 66 é ilustrada a imagem da broca helicoidal inteiriça na condição de fim de vida, após o ensaio 12.

Figura 65 - Micrografia da broca de ponta intercambiável após o ensaio 5.



FONTE: Do autor.

Figura 66 - Micrografia da broca helicoidal inteira após o ensaio 12.



FONTE: Do autor.

Essas análises serviram para avaliar qualitativamente o estado das brocas após os ensaios. Algumas das imagens obtidas ao final dos ensaios através do microscópio eletrônico de varredura estão apresentadas no Apêndice I. A finalidade ao empregar o microscópio eletrônico de varredura, foi analisar somente a condição final das brocas, ou seja, não foi realizada a medição do desgaste de flanco visto não ser o critério de fim de vida definido neste estudo, assim sugere-se a medição do desgaste de flanco como trabalho futuro.

Nas brocas analisadas, é possível visualizar lascamentos na quina, desgaste no gume transversal e alguns indícios de abrasão e adesão. Os lascamentos podem se originar devido às condições severas de usinagem, principalmente, na entrada e saída do furo. Verificou-se que estas características citadas são mais evidentes nos ensaios com velocidades de corte maiores.

6 CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

6.1 CONCLUSÕES

O método adequado para a otimização das operações de usinagem em escala industrial apresenta-se ainda como um desafio para a maioria das empresas, contudo em muitas circunstâncias é possível explorar melhor os processos de fabricação sem introduzir investimentos não planejados que podem prejudicar a competitividade do negócio. Neste contexto, a finalidade deste estudo foi abordar a otimização de dois processos de furação específicos, aplicados em um ambiente industrial, procurando contribuir para o maior conhecimento da influência dos parâmetros de corte sobre as variáveis de saída, tais como o erro de forma (circularidade), os tempos e custos de produção. Desta maneira, as conclusões obtidas para cada variável abordada neste estudo estão elencadas a seguir.

Na avaliação do erro de circularidade, as análises estatísticas feitas pelo teste de ANOVA mostraram que a circularidade é amplamente influenciada pelos parâmetros de corte estudados. As averiguações da capacidade contribuíram para uma avaliação mais ampla das distribuições dos valores de circularidade obtidos em cada ensaio, à medida que os ensaios sob velocidades de cortes de 70, 85 e 130m/min acarretaram os melhores índices de C_p e C_{pk} . Já, os menores resultados de circularidade foram obtidos na furação com brocas de ponta intercambiável em estado inicial de vida, para todos os parâmetros de corte empregados. Uma das hipóteses para tal resultado é a geometria calibradora da broca com ponta intercambiável. Por outro lado, as duas geometrias de broca estudadas apresentaram semelhança de comportamento devido ao aspecto que em ambos os ensaios houve uma evolução crescente do erro de circularidade na medida em que os tempos de vida das brocas aumentavam. Neste caso não foram verificados valores de circularidade dispersos que ultrapassassem o limite máximo definido para cada ensaio de furação. No fim de vida da ferramenta ocorreram os maiores valores de circularidade, evidenciando uma tendência de aumento do erro de forma (circularidade) devido à condição de corte prejudicada da broca, possivelmente pelo maior desgaste. Portanto, observou-se de maneira geral uma correlação entre o erro de forma (circularidade) e os parâmetros de corte testados.

A respeito das conclusões sobre a vida das ferramentas pode-se comprovar que o emprego desta variável é um dos critérios mais

relevantes, tanto no ambiente fabril quanto no contexto deste trabalho, para as análises de desempenho e econômicas dos processos de usinagem. Desta maneira, em geral verificou-se que a variação da velocidade de corte se mostrou um aspecto significativo sobre a vida das brocas, pois as menores velocidades de corte ensaiadas possibilitaram uma alta vida das brocas. Em contrapartida, nas maiores velocidades de corte ensaiadas se observaram as vidas mais baixas. Já comparando as duas geometrias estudadas notou-se que a vida total nas brocas inteiriças com diâmetro de 5,40mm foi maior do que nas brocas de ponta intercambiável de diâmetro 15,50mm, sendo que este comportamento foi observado tanto na quantidade de furos produzidos como também no comprimento usinado.

Outro aspecto é que não se verificaram diferenças de uniformidade nas geometrias das brocas, no material do corpo de prova ou qualquer outra variação que influenciasse no resultado de vida das brocas. Referente aos gráficos de vida de cada avanço combinado com as três velocidades de corte distintas, verificou-se que nas duas geometrias de brocas o aumento do avanço afetou a vida da ferramenta, especialmente para as velocidades de cortes intermediárias de 90 e 130m/min. Nestas situações, com o aumento do avanço atingiu-se os maiores números de furos usinados utilizando as velocidades de corte intermediárias (90 e 130m/min) em relação às velocidades de corte mais baixas, 70m/min e 85m/min, respectivamente.

No que concerne os resultados das análises econômicas, os menores custos de fabricação foram encontrados para os maiores avanços, dentre os propostos, e as velocidades de corte de 125 e 130m/min. Vale destacar que os parâmetros de corte influenciam diretamente os custos de fabricação, uma vez que combinando os resultados de vida e econômicos, constatou-se que os casos que utilizaram baixas velocidades de corte apresentaram vidas longas, porém com custos variáveis elevados, em função dos valores gastos com máquina e operador. Já para os ensaios onde foram aplicadas altas velocidades de corte, o tempo principal (t_h) apresentou redução, mas como a vida da ferramenta resultou muito baixa, o tempo de máquina parada para substituição da ferramenta cresceu significativamente.

Os métodos adotados para calcular os valores ótimos para mínimo custo e máxima produção mostraram-se adequados para fundamentar o estudo de otimização. Entretanto, para a avaliação principal dos dados extraídos dos experimentos, tornou-se necessária uma análise de seleção econômica com base em resultados como o custo e o tempo de fabricação por peça.

Por fim, a realização deste estudo evidenciou que é possível obter-se um ganho na ordem de 20% na produtividade atual do processo de furação da operação feita com a broca de metal-duro inteiriça de 5,40mm, aumentando o avanço de 0,21mm para 0,28mm e a velocidade de corte de 90m/min para 125m/min. Este aumento proposto na produtividade representa um ganho no custo de fabricação desta operação na ordem também de 20%.

Quanto aos ensaios das brocas de ponta intercambiável de 15,50mm verificou-se que com o aumento do avanço de 0,27mm para 0,32mm é possível obter um ganho de 10% na produtividade da operação atual, representando uma redução real no custo de fabricação na ordem de 10%.

6.2 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Considerando-se a continuidade deste trabalho, sugerem-se algumas ações para trabalhos futuros:

- a) Analisar o desgaste das brocas através do acompanhamento do desgaste de flanco (VB) durante a realização dos ensaios.
- b) Aplicação de velocidades de corte intermediárias às já executadas, melhorando a assertividade das curvas de vida. Bem como, simular tempos menores para trocas das ferramentas de corte, comparando os resultados econômicos com o estudo atual.
- c) Executar estudos com outros critérios de fim de vida, com o propósito de verificar o comportamento de vida das ferramentas.
- d) Sugere-se uma maior avaliação dos furos usinados, adotando a análise dimensional do erro de cilindridade, por exemplo.
- e) Refazer o mesmo estudo econômico, porém, comparando o meio lubrificante utilizado neste trabalho com o MQL.
- f) Replicar este estudo em outras operações de usinagem contidas no bloco de compressor hermético, a fim de certificar os possíveis ganhos.
- g) Testar outras geometrias de brocas para verificar os comportamentos geométricos e econômicos.

REFERÊNCIAS

AGGARWAL, A.; SINGH, H. **Optimization of Machining Techniques - A Retrospective and Literature Review**. Academy Proceedings in Engineering Sciences, 7 ed., v.30, p. 699 - 711, 2005.

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.

AMERICAN SOCIETY FOR QUALITY CONTROL - ASQC. **Statistical process control manual**. Milwaukee, USA: ASQC, 1986.

ANDRADE, C. L. F. D. **Análise da furação de ferro fundido vermicular com brocas de metal-duro de canais retos revestidas com TiN e TiAlN**. 2005. 154 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, 2005.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 6163 NB205: **Geometria de cunha de corte**. Rio de Janeiro: 1990.

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

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 6589: **Peças em ferro fundido cinzento classificadas conforme a resistência a tração**. Rio de Janeiro: 1986.

BAPTISTA, E. A.; COPPINI, N.L.; SANTOS, J. R.; VIEIRA, M. **Uma fórmula para diminuir custos no torneamento de eixos tubulares**. Revista Máquinas e Metais - Aranda Editora, Outubro, 2011.

BASTOS, C. B. **Modelagem e simulação do processo de torno-brochamento de virabrequins**. 2005. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2005.

BATES, C. E. **Study Examines Influences on Machinability of Iron Castings**. Modern Castings, p. 36-39, 1996.

BELTRÃO, P. A. C.; MORELO, F. M. **Ferramentas antivibratórias: soluções para o acabamento superficial de qualidade na operação de torneamento interno**. Revista O Mundo da Usinagem - Publicação da Sandvik Coromant do Brasil, Dezembro, 2013.

BOEIRA, A. M. G. **Modelagem e simulação das forças na furação com brocas helicoidais a partir de dados obtidos no torneamento de segmentos cilíndricos**. 2010. 190 f. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) - Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, 2010.

CALLISTER, W. D. J. **Fundamentals of Materials Science and Engineering: An Integrated Approach**. 2 ed. New York: John Wiley&Sons, Inc., 2005.

CASTILLO, W. J. G. **Furação profunda de ferro fundido GG25 com brocas de metal-duro com canais retos**. 2005. 134 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, 2005.

CHIAVERINI, V. **Aços e Ferros Fundidos**. 7 ed. ampl. e rev. São Paulo: ABM, 2012.

CLÍMACO, M. **Análise comparativa entre alargamento com ferramenta de gume único regulável e mandrilamento em ferro fundido nodular GGG40**. 2011. 136 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Departamento de Engenharia Mecânica. Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, 2011.

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

COSTA, E. S. **Apostila Processos de Usinagem**. Centro Federal de Educação Tecnológica - CEFET, Minas Gerais, 83 pg, 2006.

DAWSON, S. et al. **The Effect of Metallurgical Variables on the Machinability of Compacted Graphite Iron**. Society of Automotive Engineers, p. 41-59, 2001.

DIMLA, D. E. **The Impact of Cutting Conditions on Cutting Forces and Vibration Signals in Turning with Plane Face Geometry Inserts.** Journal of Materials Processing Technology, 156p. 2004.

DIN 1836: **Anwendungsgebiete der Werkzeugentypen N, und W.** Berlin, Alemanha 1977.

DIN 6581: **Begriffe der Zerspantechnik: Bezugssysteme und Winkel am Schneidteil des Werkzeuges.** Berlin, Alemanha: BeuthVerlag GmbH, 42p, 1985.

DIN ISO 5419: **Spiralbohrer: Benennungen, Definitionen und Formen (ISO 5419:1982).** Berlin, Alemanha: BeuthVerlag GmbH, 17p, 1998.

DIN 69871: **Steilkegelschäfte für automatischen Werkzeugwechsel - Teil 1: Form A, Form AD, Form B und Ausführung mit Datenträger.** Berlin, Alemanha 1995.

DIN 8589-2: **Fertigungsverfahren Spanen Teil 2: Bohren - Einordnung, Unterteilung, Begriffe.** Berlin, Alemanha: BeuthVerlagGmbH, 12p, 2003.

DINIZ, A. E.; MARCONDES, F. C.; COPPINI, N. L. **Tecnologia da Usinagem dos Materiais.** 3 ed. São Paulo: Artliber, 2008.

EBERSBACH, F. G. **Estudo do Fresamento de Carcaças de Ferro Fundido Cinzento GG25 visando à Otimização de Custos de Tempos de Fabricação.** 2014. 158 p. Dissertação de mestrado. Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2014.

FERRARESI, D. **Fundamentos da Usinagem dos Materiais.** São Paulo: Blücher, 1970.

FERRER, J. A. G. **Uma Contribuição ao Fresamento Frontal de Superfícies Irregulares de Ferro Fundido Cinzento.** 2006. 228 p. Tese de doutorado Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2006.

FISCHER, U. et al. **TabellenbuchMetall.** Lehrmittel: Editora Europa, Auflage 43. 422 p, 2005.

GOMES, P. F. **Curso de Estatística Experimental**. 12ª edição. Piracicaba: ESALQ, 1987.

GOMES, J.O.; SOUZA, J.F.; ZANATTA, A.M. **Avaliação de diferentes geometrias de brocas de aço rápido na furação de alumínio e latão**. Revista Máquinas e Metais - Aranda Editora, Março, 2011.

GROOVER, M. P. **Automation, production systems and computer-integrad manufacturing**. Prentice-Hall, Upper Sadle River, p. 840, 2007.

GUEDES, L. C.; CONSALTER, L. A.; PUREY, J. A.. **Usinabilidade de ferros fundidos**. São Paulo: Fundação e Matérias Primas, n. 84, p. 39-45, 1987.

HALEVI, G. WEILL, R. D.; **Principles of process planning - A logical approach**. 1. ed. Chapman & Hall, 1995.INTERNATIONAL STANDARD ISO 3685. Tool Life Testing with Single-Point Turning Tools, 1993.

HELLER. **Catálogo de Máquinas-Ferramentas Modelo MCI**. Brasil.

KALSS, W.; REITER, A.; DERFLINGER, V.; GEY, C.; ENDRINO, J. L. **Modern Coatings in high performance cutting applications**. International Journal of Refractory Metals and Hard Materials. v. 24, pp. 399 - 404, Liechtenstein, 2006.

KAHLES J. F.; FIELD M. **Relation of Microstructure to Machinability of Gray Iron, Ductile Iron and Malleable Iron**. AFS Transaction, p. 587-595, 1964.

KLAUBERG, A. L. **Aplicação de mínimas quantidade de fluido de corte nos processos de furação e rosqueamento interno de eixos para motores elétricos**. 2009. 118 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, 2009.

KENNAMETAL, **Inovations Master Catalogue, Cutting Tools**. Kennametal Distributor, p.780, 2013.

KENNEDY, B. **What's on Tap? A look at recent advances in tap technology.** Cutting Tool Engineering Magazine, article. USA, 2002.

KÖNIG, W.; KLOCKE, F. **Tecnologia da Usinagem com Ferramenta de Corte de Geometria Definida** - Parte I. Traduzido por Prof. Dr. Ing. Walter Lindolfo Weingaertner e Prof. Dr. Eng. Rolf Bertrand Schroeter, do livro "Fertigungsverfahren - Drehen, Bohren, Fräsen". Universidade Federal de Santa Catarina - Florianópolis, 2002.

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

MACHADO, C. A. M. **Estudo comparativo de diferentes geometrias de corte em broca de metal-duro com canal reto em ferro fundido cinzento.** 2011. 128 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas. Campinas, 2011.

MIRANDA, G. W. A.; COPPINI, N. L.; BRAGA, D. U.; DINIZ, A. E. **Contribuição ao Processo de Furação com Brocas de Metal-duro Revestidas.** COBEF - Congresso Brasileiro de Engenharia de Fabricação, 2001, Curitiba. v. 121, p. 1-1, 2001.

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

MONTGOMERY, D. C. **Introdução ao controle estatístico da qualidade.** 4. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2004.

MÜHLE, H. B. **Mandrilamento com cabeçotes de excentricidade regulável e sistema de balanceamento.** 2000. 115 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2000.

NORTON, R. L. **Projeto de Máquinas.** 2. ed. São Paulo: Bookman, 2004.

NOVASKI, O. **Custos de usinagem**. 1. ed. Campinas: Editora da UNICAMP, 1991.

PAIVA, J. M. F. **Análise do processo de furação do ferro fundido vermicular com brocas de metal-duro com canais retos revestidas com TiN+TiAlN, AlCrN e AlCr-Based**. 2007. 125 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Departamento de Engenharia Mecânica, Pontifícia Universidade Católica do Paraná, Curitiba.

PALMA, E. S. **Metrologia, Apostila**. PUC Minas, Belo Horizonte, MG, 2004.

SANDVIK COROMANT. **Modern Metal Cutting: A Practical Handbook**, Suécia, 2012.

STOETERAU, R. L., SCHROETER, R. B.; WEINGAERTNER, W. L.; **Apostila Processo de Usinagem. Fabricação por remoção de material**. Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, 2004.

STEMMER, G. E. **Ferramentas de Corte II**. 4 ed. Florianópolis: UFSC, 2005.

OLIVEIRA, V. V. **Influência da Geometria de Brocas na Furação do Ferro Fundido Vermicular**. 2008. 153 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Programa de Pós - Graduação em Engenharia Mecânica e Materiais, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 2008.

ORGANIZAÇÃO INTERNACIONAL PARA PADRONIZAÇÃO: ISO 513: **Classification and application of hard cutting materials for metal removal with defined cutting edges -- Designation of the main groups and groups of application**. Genebra, Suíça, p. 3, 2012.

ORGANIZAÇÃO INTERNACIONAL PARA PADRONIZAÇÃO: ISO 3685: **Tool-life testing with single-point turning tools**. Genebra, Suíça, pp. 1-48, 1993.

OSG, **Master Catalogue, Cutting Tools**. OSG Distributor. 750 p., 2012.

TAYLOR, F. W. **On the Art of Cutting Metals**. American Society of Mechanical Engineers, New York, 1906.

TITEX, **Master Catalogue, Drilling & Threading**. WALTER Distributor, 53 p. 2009.

TOOL AND MANUFACTURING ENGINEERS. **Machining Handbook**, EUA, 1983.

TÖNSHOFF, H. K.; KÖNIG, W. **Machining of holes, development in drilling technology**. Annals of the CIRP, v.43, 1994.

TAEGU TEC, **Master Catalogue, Metal Working Cutting Tools**. TAEGU TEC Distributor, 800 p, 2007.

TRENT, E. M., WRIGHT, P. K. **Metal Cutting**. 4 ed. Woburn: Butterworth-Heinemann, 2000.

WATSON, A. R. **Geometry of Drill Elements**. International Journal of Machine Tool Design and Research, Vol. 25, No. 3, 1985.

YUSHIRO. **Especificações técnicas do fluido semi-sintético Ken SS-370 - relatório interno**. Caçapava: Yushiro, 2013.

MORAES, A. Fundições aumentam valor agregado com usinagem. **Revista eletrônica de Manutenção e Suprimentos**, 2005. Disponível em: <<http://www.manutencaoesuprimentos.com.br/conteudo.php?codigo=758>> Acesso em 10 setembro 2012.

ISCAR. **ISCAR Metal Cutting Standards**, 2013. Disponível em: <http://www.iscar.com/SWF/Carousel/carru_646x484.swf>. Acesso em: 16 out. 2013.

LABORATÓRIO CENTRAL DE MICROSCOPIA ELETRÔNICA. Equipamentos e recursos. Disponível em: <<http://lcme.ufsc.br/equipamentos-recursos/>>. Acesso em: 20 out.2013.

APÊNDICE A - Resultado das medições das brocas empregadas nos ensaios de furação.

Tabela 1 - Medições das brocas de diâmetro 15,50mm - Fornecedor A.

Item	Especificação	Resultados					
		1	2	3	4	5	6
1	Ângulo de Ponta [graus]	140°00'	139°30'	139°30'	140°00'	139°30'	140°00'
2	Altura da ponta intercambiável [mm]	8,73	8,74	8,74	8,73	8,74	8,73
3	Excentricidade do gume transversal [mm]	0,003	0,002	0,002	0,001	0,002	0,002

Tabela 2 - Medições das brocas de diâmetro 5,40mm - Fornecedor B.

Item	Especificação	Resultados					
		1	2	3	4	5	6
1	Ângulo de ponta [graus]	130°00'	130°30'	130°30'	130°00'	130°30'	130°30'
2	Ângulo de hélice [graus]	30°00'	30°30'	30°30'	30°30'	30°00'	30°30'
3	Excentricidade do gume transversal [mm]	0,001	0,001	0,001	0,002	0,001	0,001
4	Comprimento gume principal [mm]	5,65	5,64	5,65	5,65	5,64	5,64
5	Ângulo de incidência [graus]	14°00'	13°30'	14°00'	14°00'	13°30'	14°00'
6	Largura das Guias	0,53 0,51	0,55 0,54	0,54 0,51	0,51 0,55	0,52 0,54	0,51 0,54

APÊNDICE B - Especificações técnicas do meio lubrificador empregado nos ensaios.

Tabela 1 - Especificações técnicas do fluido sintético Ken SS-370.

Aparência (NY-1)	Castanho esverdeado
Densidade, 20/4 °C (NY-2)	1,010 a 1,050
Índice de acidez, mg KOH/g - (NY-4)	27 a 33
Índice de amina, mg HCl/g - (NY-6)	100 a 120
pH a 2% - (NY-29)	8,7 a 9,7
pH a 5% - (NY-29)	8,8 a 9,9
Teste de corrosão a 2%, 24 horas (NY-20)	Isento
Índice refratométrico	2,38
Teste de degradação, 21 dias	Satisfaz
Teste de espuma a 5%	Satisfaz
Concentração recomendada para o uso (%)	5 a 15

APÊNDICE C - Gráficos de circularidade dos furos de 15,50mm a profundidades de 8, 24 e 41mm, sob velocidades de corte de 85, 130 e 150m/min e avanços de 0,27 e 0,32mm, nas condições de início e fim de vida.

Figura 1: Circularidades à profundidade de 8mm sob velocidade de corte de 85m/min e avanço 0,27mm, (a) na condição de início de vida e (b) na condição de fim de vida.

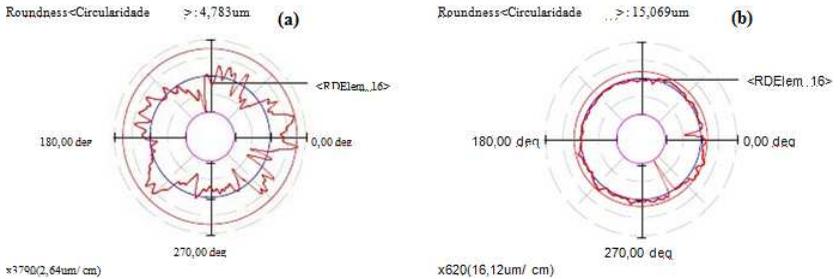


Figura 2: Circularidades à profundidade de 24mm sob velocidade de corte de 85m/min e avanço 0,27mm, (a) na condição de início de vida e (b) na condição de fim de vida.

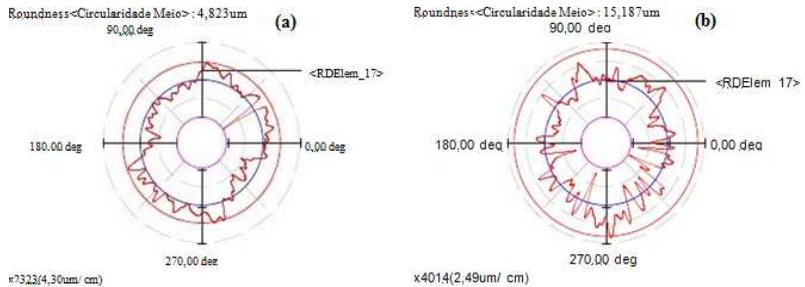


Figura 3: Circularidades à profundidade de 41mm sob velocidade de corte de 85m/min e avanço 0,27mm, (a) na condição de início de vida e (b) na condição de fim de vida.

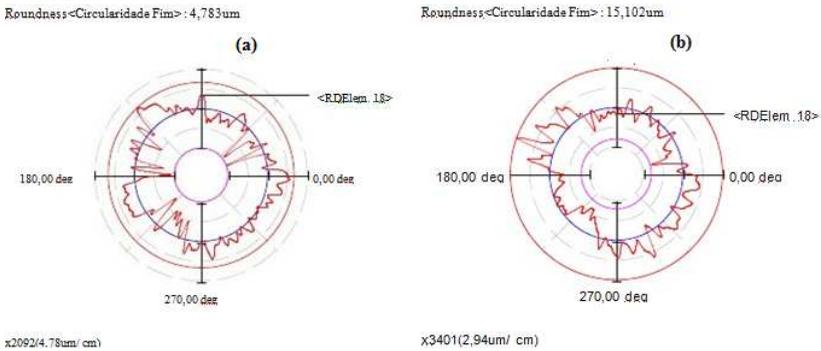


Figura 4: Circularidades à profundidade de 8mm sob velocidade de corte de 85m/min e avanço 0,32mm, (a) na condição de início de vida e (b) na condição de fim de vida.

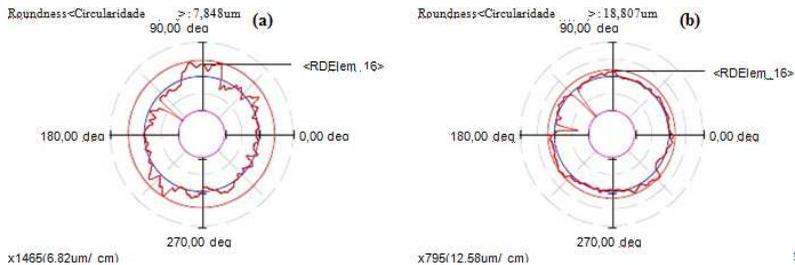


Figura 5: Circularidades à profundidade de 24mm sob velocidade de corte de 85m/min e avanço 0,32mm, (a) na condição de início de vida e (b) na condição de fim de vida.

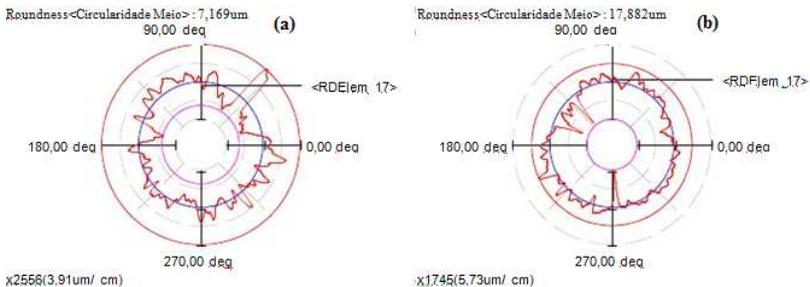


Figura 6: Circularidades à profundidade de 41mm sob velocidade de corte de 85m/min e avanço 0,32mm, (a) na condição de início de vida e (b) na condição de fim de vida.

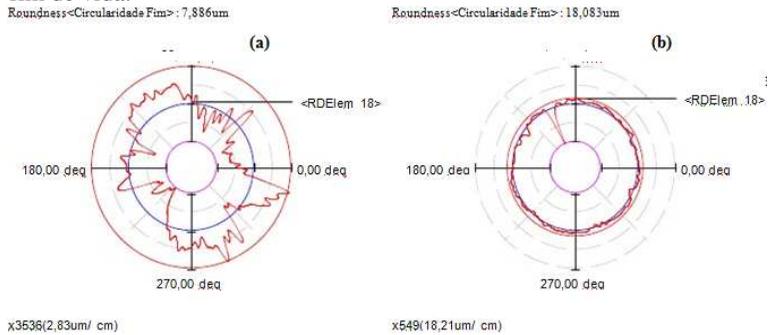


Figura 7: Circularidades à profundidade de 8mm sob velocidade de corte de 130m/min e avanço 0,27mm, (a) na condição de início de vida e (b) na condição de fim de vida.

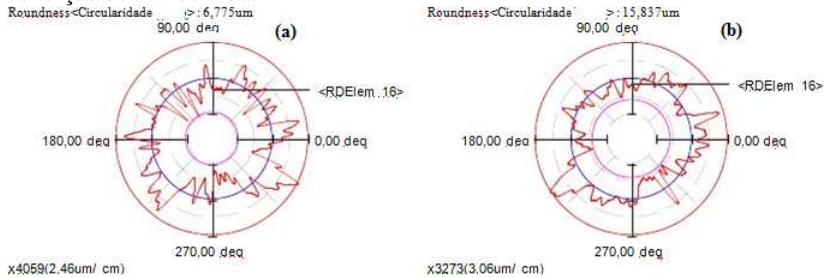


Figura 8: Circularidades à profundidade de 24mm sob velocidade de corte de 130m/min e avanço 0,27mm, (a) na condição de início de vida e (b) na condição de fim de vida.

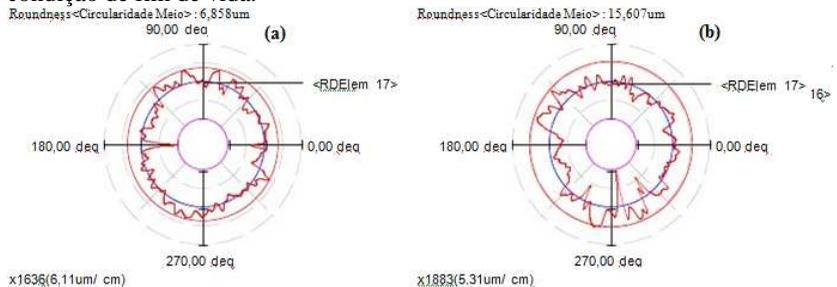


Figura 9: Circularidades à profundidade de 41mm sob velocidade de corte de 130m/min e avanço 0,27mm, (a) na condição de início de vida e (b) na condição de fim de vida.

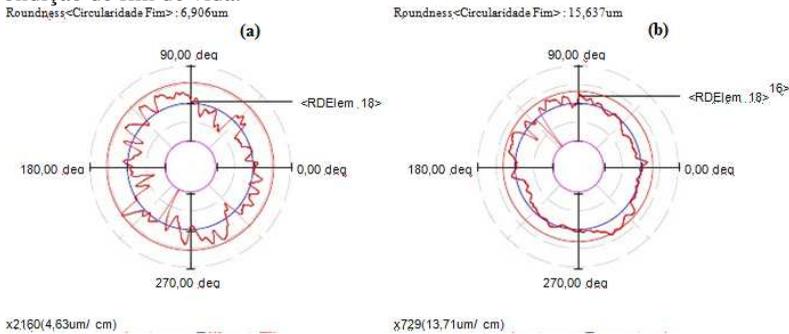


Figura 10: Circularidades à profundidade de 8mm sob velocidade de corte de 130m/min e avanço 0,32mm, (a) na condição de início de vida e (b) na condição de fim de vida.

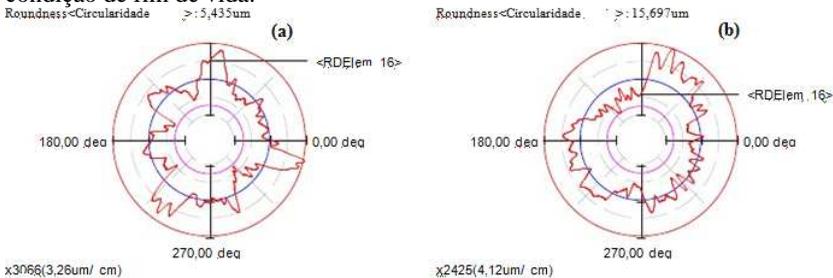


Figura 11: Circularidades à profundidade de 24 mm sob velocidade de corte de 130m/min e avanço 0,32mm, (a) na condição de início de vida e (b) na condição de fim de vida.

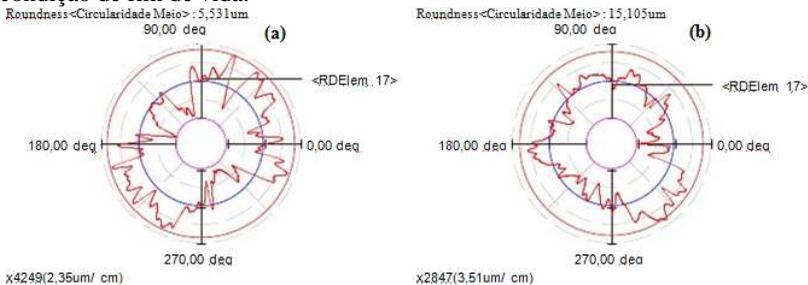


Figura 12: Circularidades à profundidade de 41mm sob velocidade de corte de 130m/min e avanço 0,32mm, (a) na condição de início de vida e (b) na condição de fim de vida.

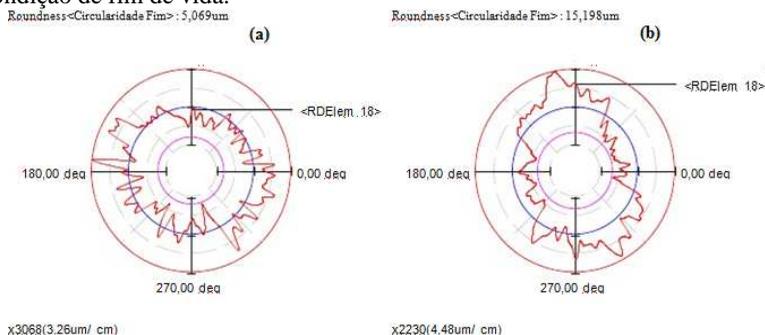


Figura 13: Circularidades à profundidade de 8mm sob velocidade de corte de 150m/min e avanço 0,27mm, (a) na condição de início de vida e (b) na condição de fim de vida.

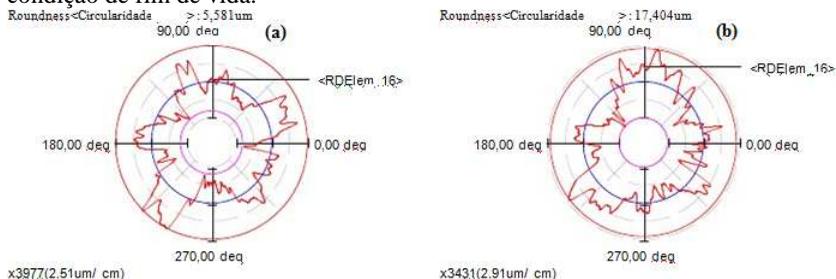


Figura 14: Circularidades à profundidade de 24mm sob velocidade de corte de 150m/min e avanço 0,27mm, (a) na condição de início de vida e (b) na condição de fim de vida.

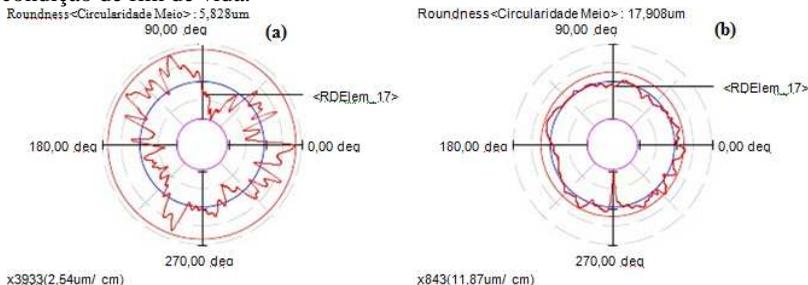


Figura 15: Circularidades à profundidade de 41mm sob velocidade de corte de 150m/min e avanço 0,27mm, (a) na condição de início de vida e (b) na condição de fim de vida.

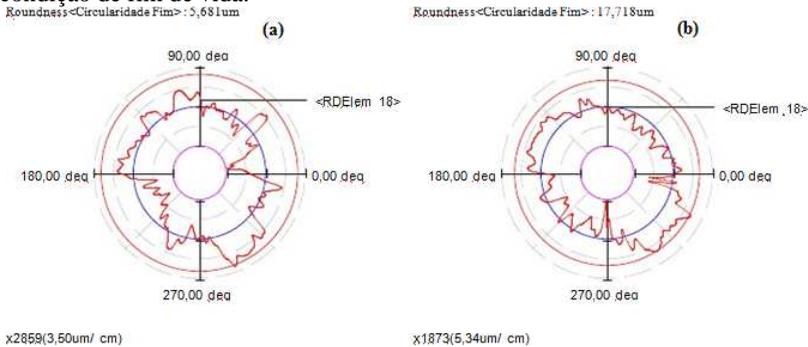


Figura 16: Circularidades à profundidade de 8mm sob velocidade de corte de 150m/min e avanço 0,32mm, (a) na condição de início de vida e (b) na condição de fim de vida.

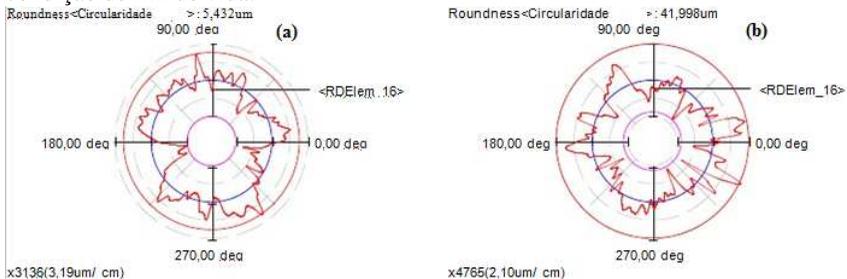


Figura 17: Circularidades à profundidade de 24 mm sob velocidade de corte de 150m/min e avanço 0,32mm, (a) na condição de início de vida e (b) na condição de fim de vida.

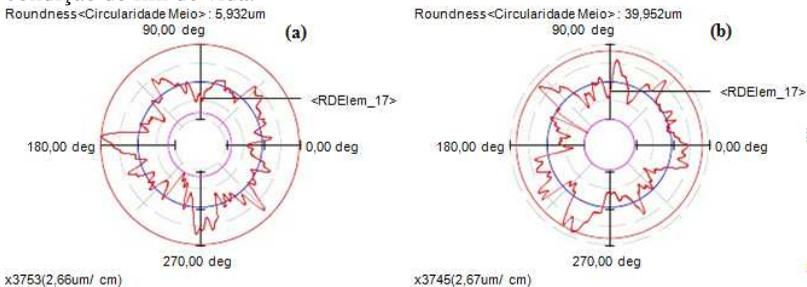
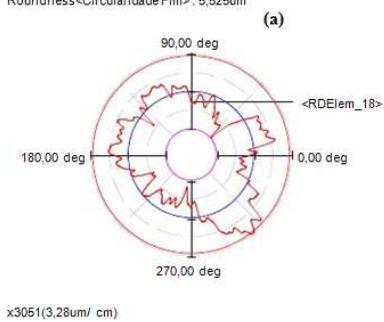
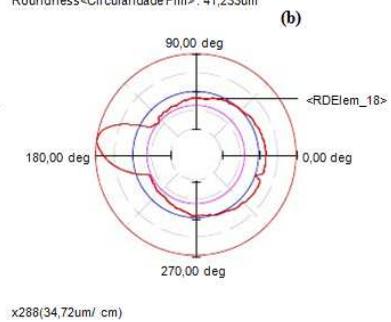


Figura 18: Circularidades à profundidade de 41mm sob velocidade de corte de 150m/min e avanço 0,32mm, (a) na condição de início de vida e (b) na condição de fim de vida.

Roundness<Circularidade Fim> : 5,525um



Roundness<Circularidade Fim> : 41,233um



APÊNDICE D - Testes de ANOVA dos valores de circularidade dos furos de 15,50mm.

Figura 1: Teste de ANOVA dos valores de circularidade sob velocidade de corte de 85m/min.

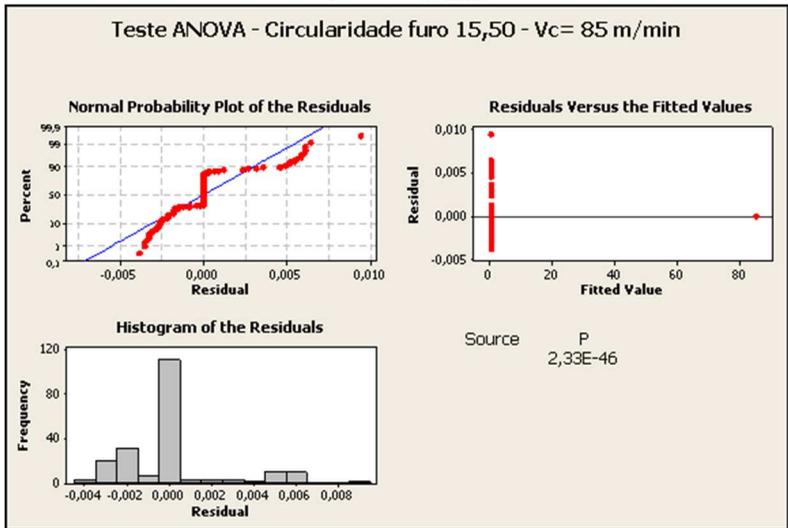


Figura 2: Teste de ANOVA dos valores de circularidade sob velocidade de corte de 130m/min.

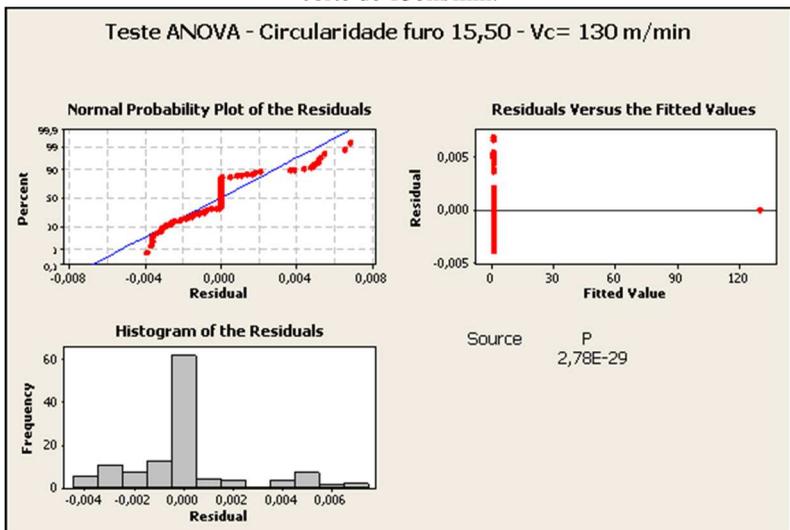


Figura 3: Teste de ANOVA dos valores de circularidade sob velocidade de corte de 150m/min.

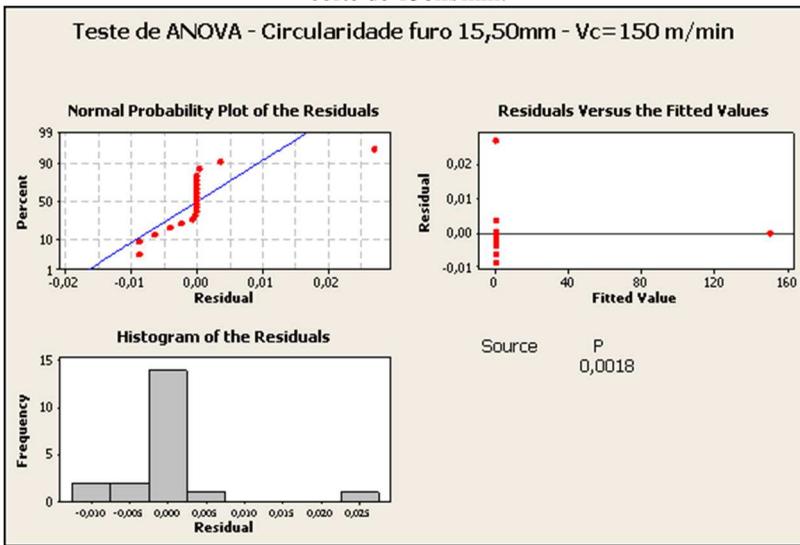


Figura 4: Teste de ANOVA dos valores de circularidade sob avanço 0,27mm.

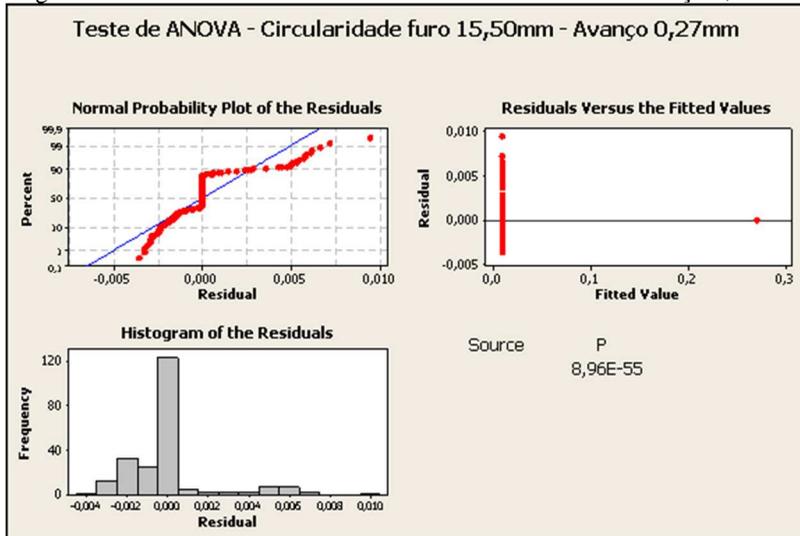
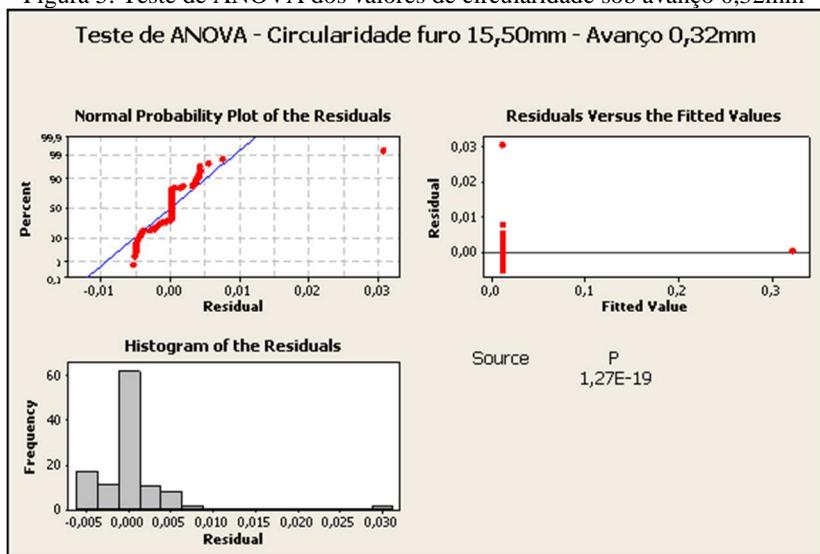


Figura 5: Teste de ANOVA dos valores de circularidade sob avanço 0,32mm



APÊNDICE E - Testes de ANOVA dos valores de circularidade dos furos de 5,40mm.

Figura 1: Teste de ANOVA dos valores de circularidade sob velocidade de corte de 70m/min.

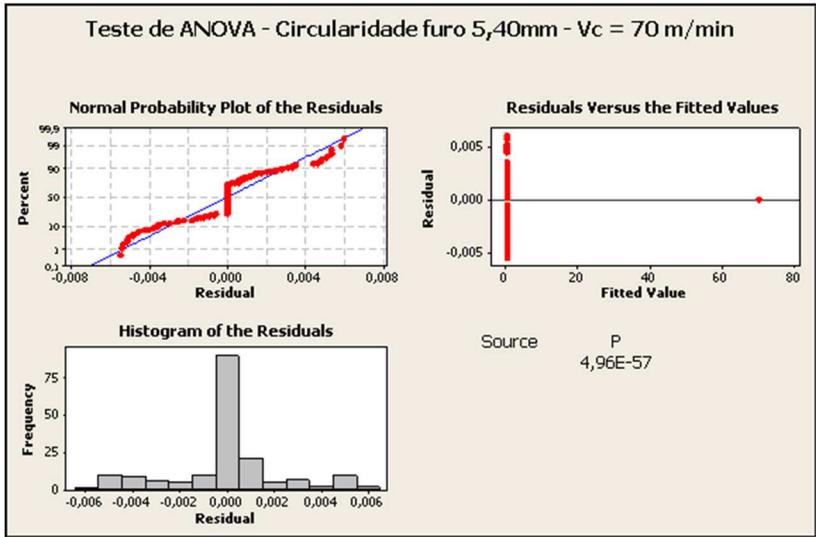


Figura 2: Teste de ANOVA dos valores de circularidade sob velocidade de corte de 90m/min.

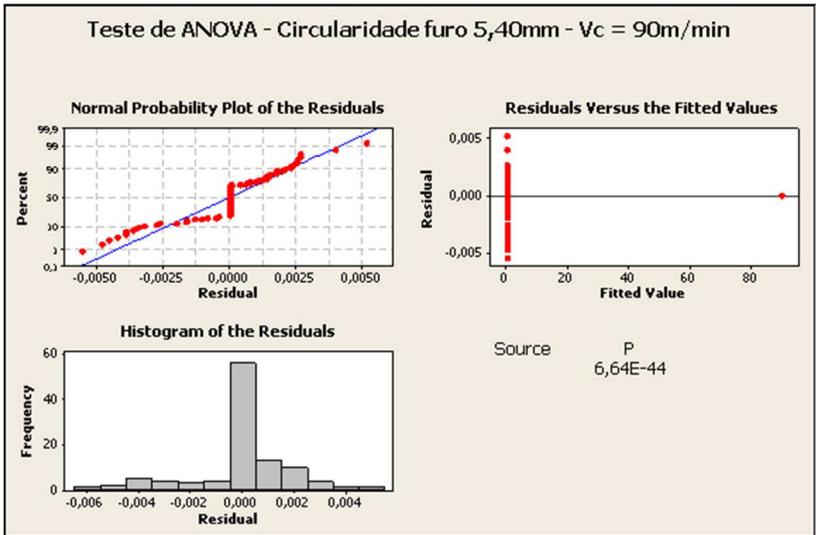


Figura 3: Teste de ANOVA dos valores de circularidade sob velocidade de corte de 125m/min.

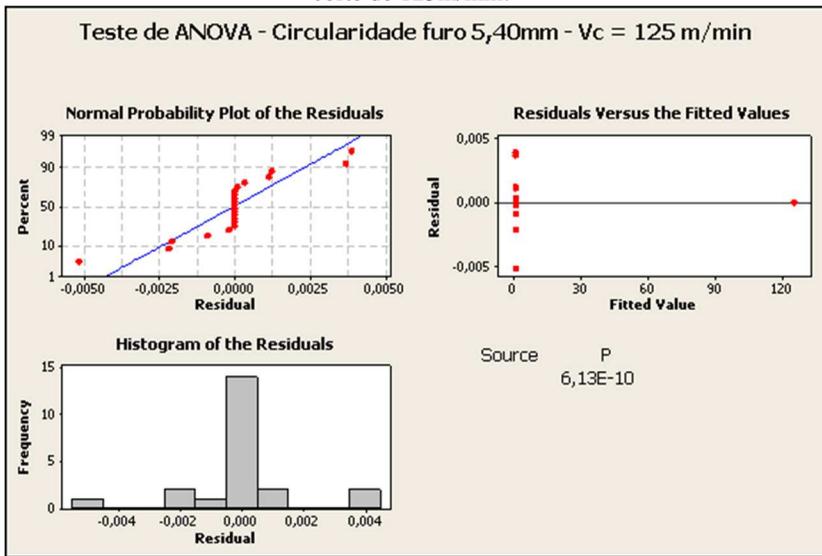


Figura 4: Teste de ANOVA dos valores de circularidade sob avanço 0,21mm.

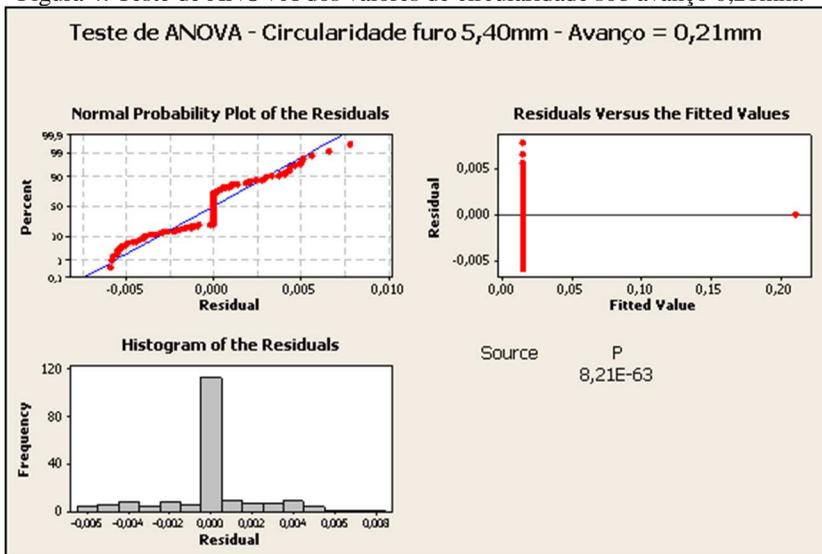
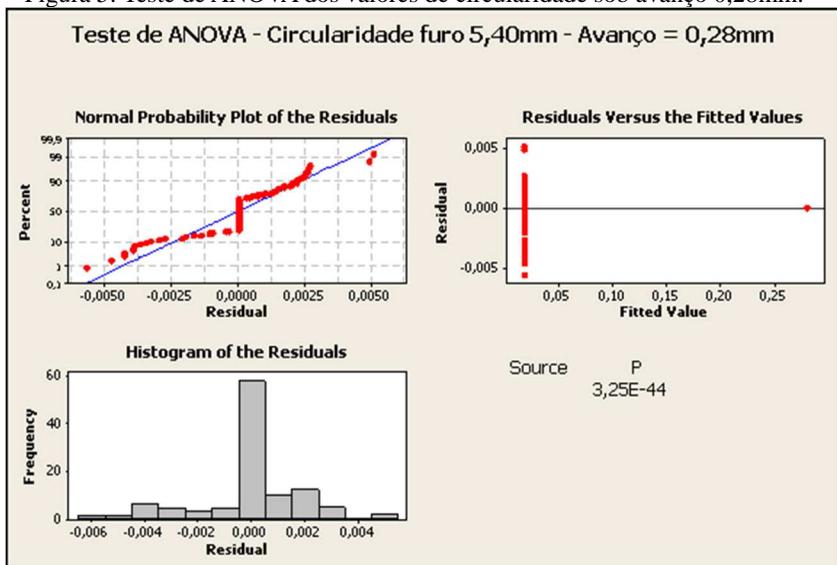


Figura 5: Teste de ANOVA dos valores de circularidade sob avanço 0,28mm.



APÊNDICE F - Gráficos de circularidade dos furos de 5,40mm a profundidades de 1,5, 3,5 e 5mm, sob velocidades de corte de 70, 90 e 125m/min e avanços de 0,21 e 0,28mm, nas condições de início e fim de vida.

Figura 1: Gráficos de circularidade das profundidades de 1,5, 3,5 e 5mm sob velocidade de corte de 70m/min e avanço 0,21mm, (a) na condição de início de vida e (b) na condição de fim de vida.

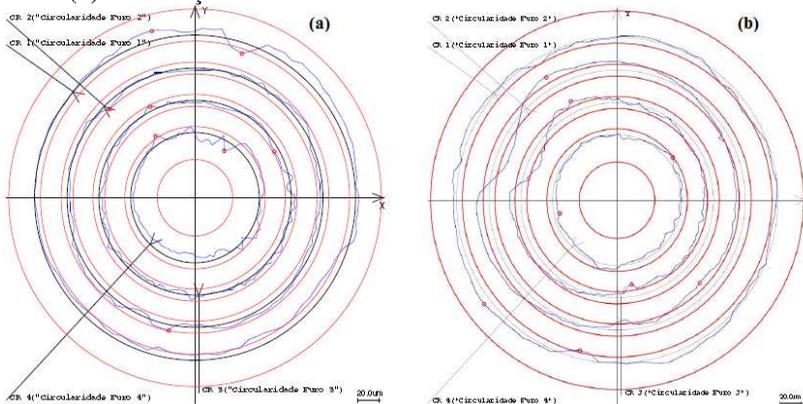


Figura 2: Gráficos de circularidade das profundidades de 1,5, 3,5 e 5mm sob velocidade de corte de 70m/min e avanço 0,28mm, (a) na condição de início de vida e (b) na condição de fim de vida.

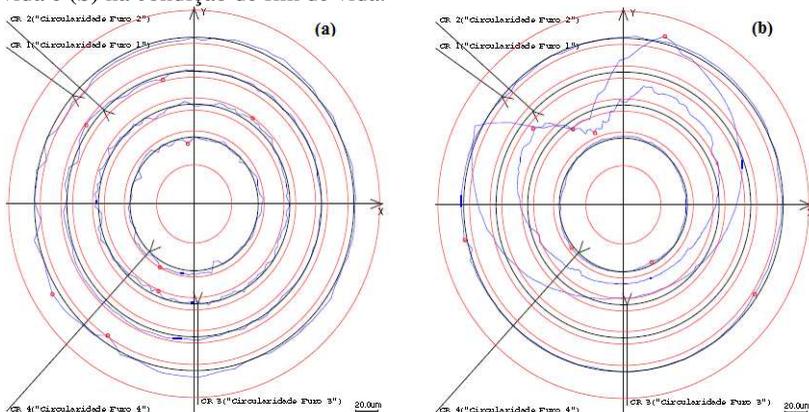


Figura 3: Gráficos de circularidade das profundidades de 1,5, 3,5 e 5mm sob velocidade de corte de 90m/min e avanço 0,21mm, (a) na condição de início de vida e (b) na condição de fim de vida.

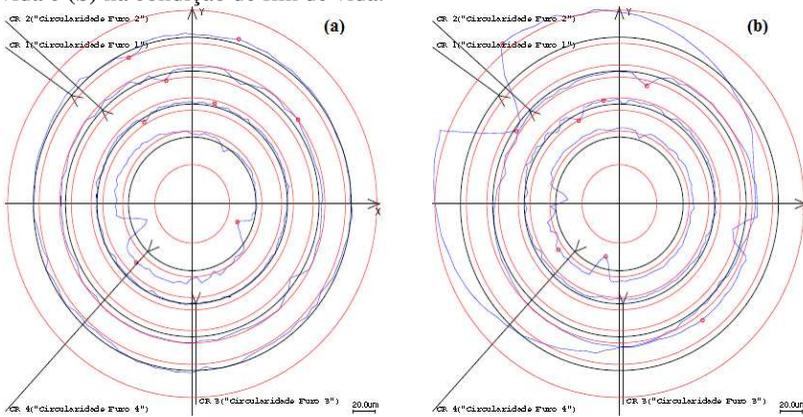


Figura 4: Gráficos de circularidade das profundidades de 1,5, 3,5 e 5mm sob velocidade de corte de 90m/min e avanço 0,28mm, (a) na condição de início de vida e (b) na condição de fim de vida.

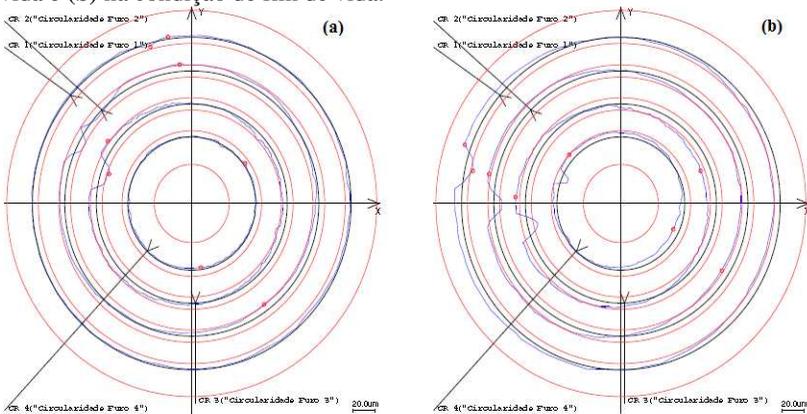


Figura 5: Gráficos de circularidade das profundidades de 1,5, 3,5 e 5mm sob velocidade de corte de 125m/min e avanço 0,21mm, (a) na condição de início de vida e (b) na condição de fim de vida.

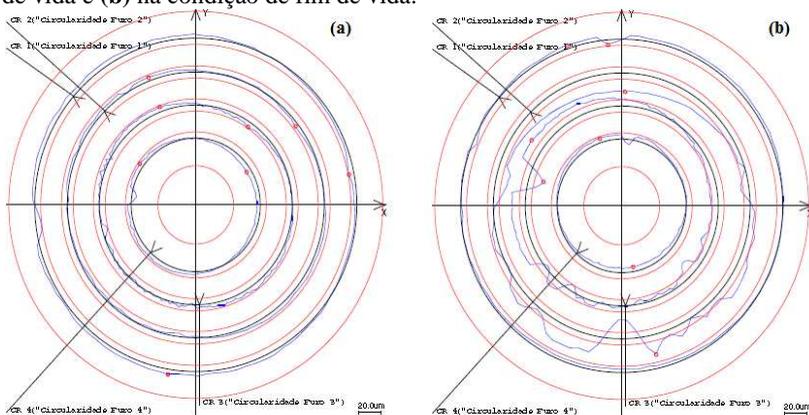
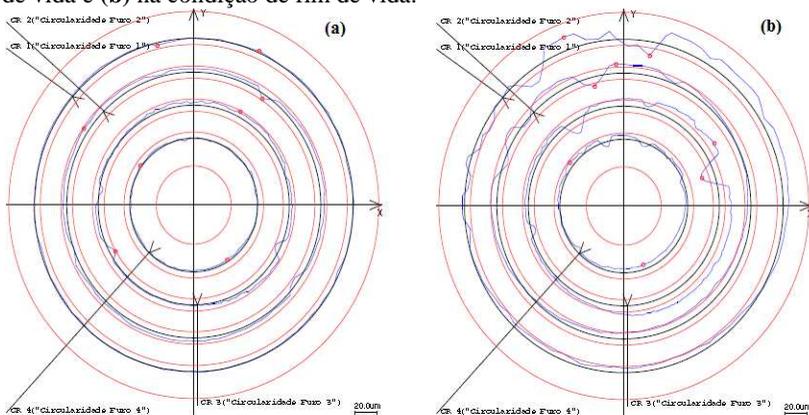


Figura 6: Gráficos de circularidade das profundidades de 1,5, 3,5 e 5mm sob velocidade de corte de 125m/min e avanço 0,28 mm, (a) na condição de início de vida e (b) na condição de fim de vida.



APÊNDICE G - Teste de ANOVA para as curvas de vida sob avanço de 0,27mm e 0,32mm.

Figura 1: Teste de ANOVA para avanço de 0,27mm e $v_c = 85, 130$ e 150 m/min.

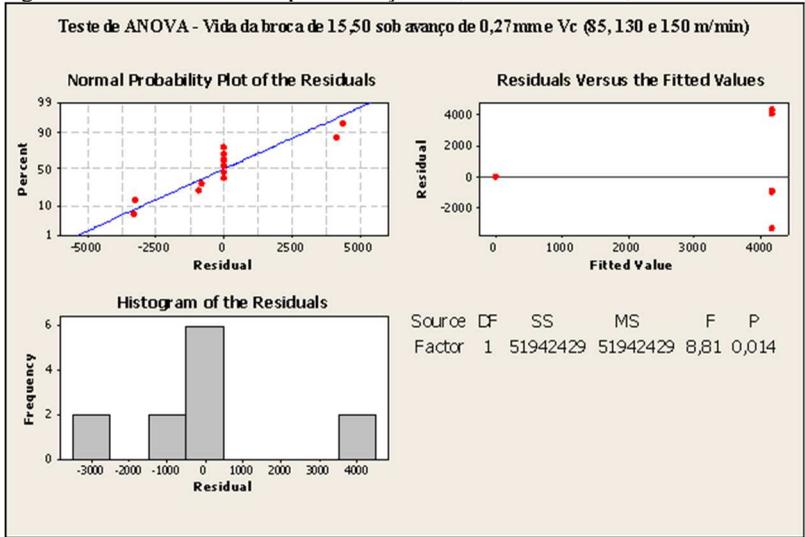
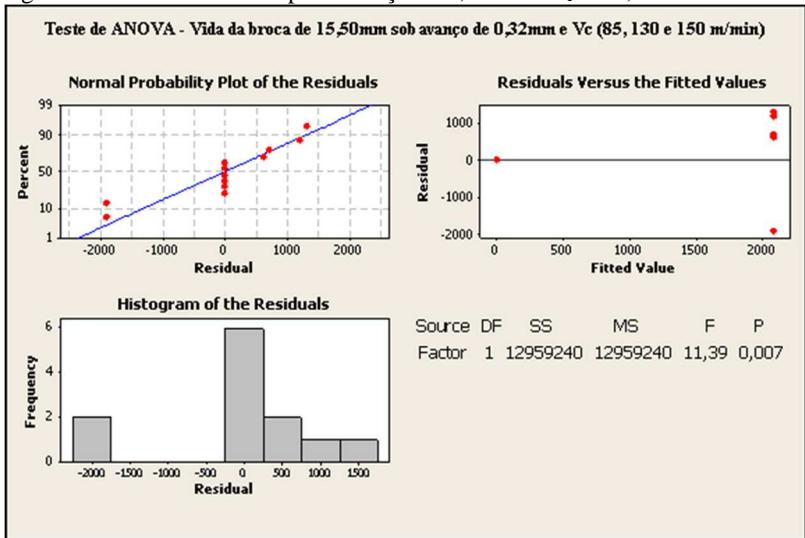


Figura 2: Teste de ANOVA para avanço de 0,32mm e $v_c = 85, 130$ e 150 m/min.



APÊNDICE H - Teste de ANOVA para as curvas de vida sob avanço de 0,21mm e 0,28mm.

Figura 1: Teste de ANOVA para avanço de 0,21mm e $v_c = 70, 90$ e 125m/min.

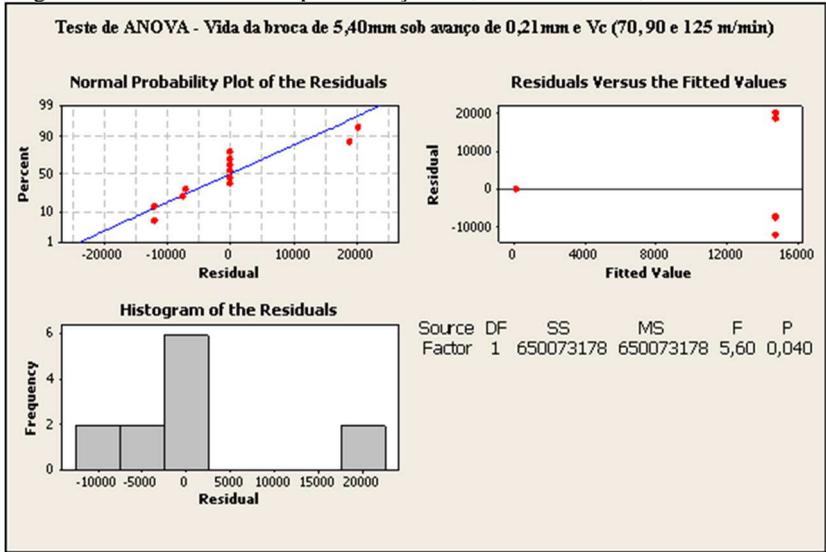
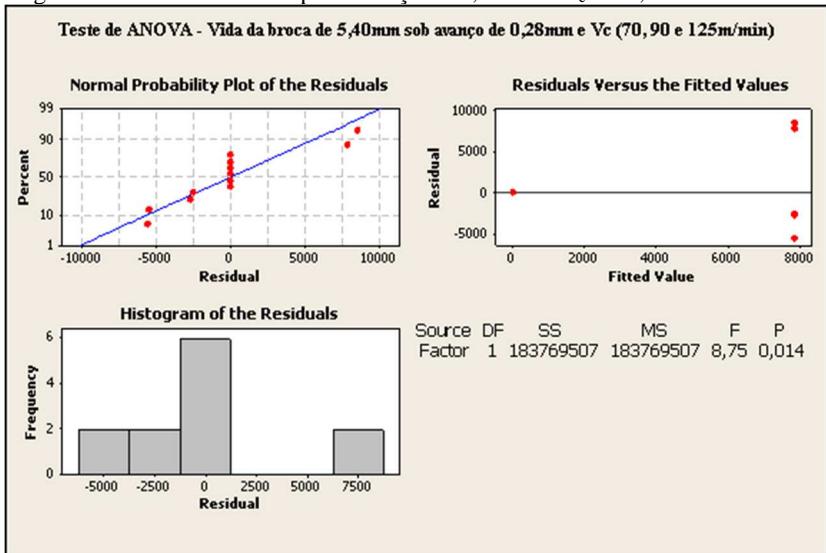


Figura 2: Teste de ANOVA para avanço de 0,28mm e $v_c = 70, 90$ e 125m/min.



APÊNDICE I – Imagens das brocas ao final dos ensaios.

Figura 1: Micrografia da broca de ponta intercambiável após o ensaio 1.

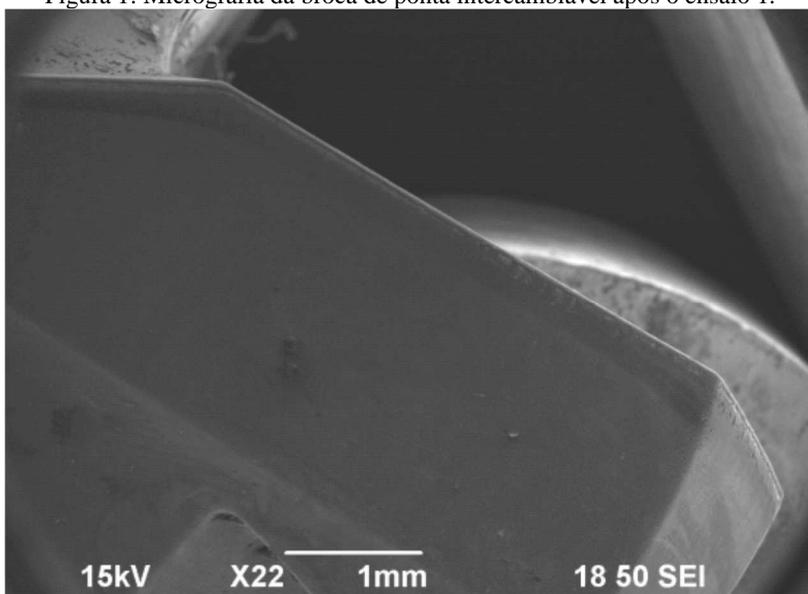


Figura 2: Micrografia da broca de ponta intercambiável após o ensaio 3.

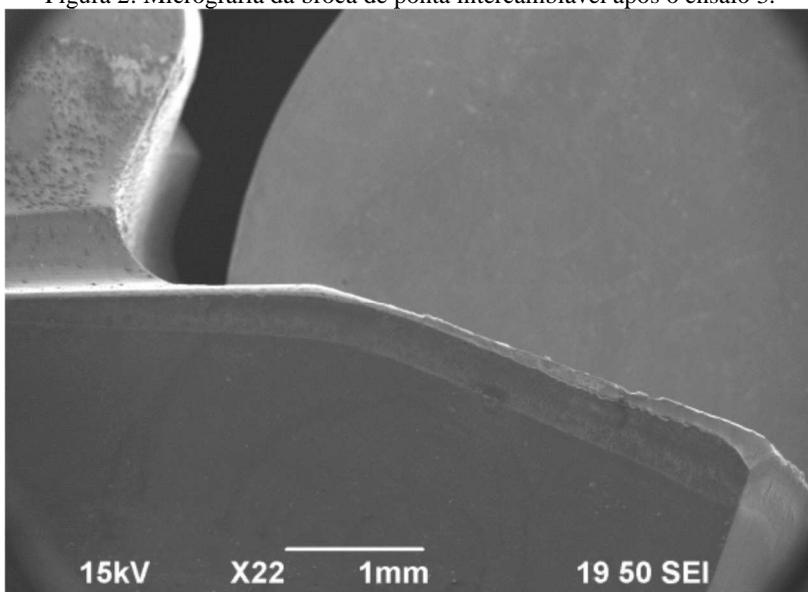


Figura 3: Micrografia da broca de ponta intercambiável após o ensaio 5.

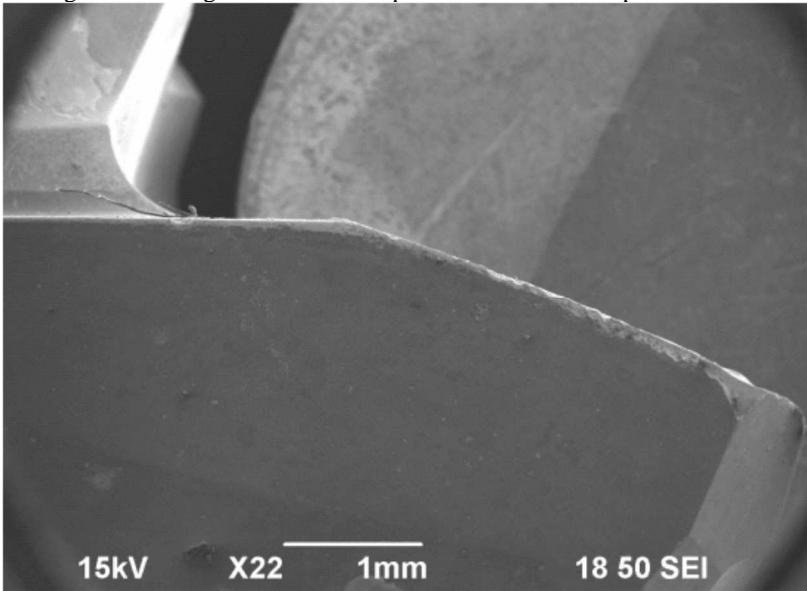


Figura 4: Micrografia da broca helicoidal inteira após o ensaio 7.

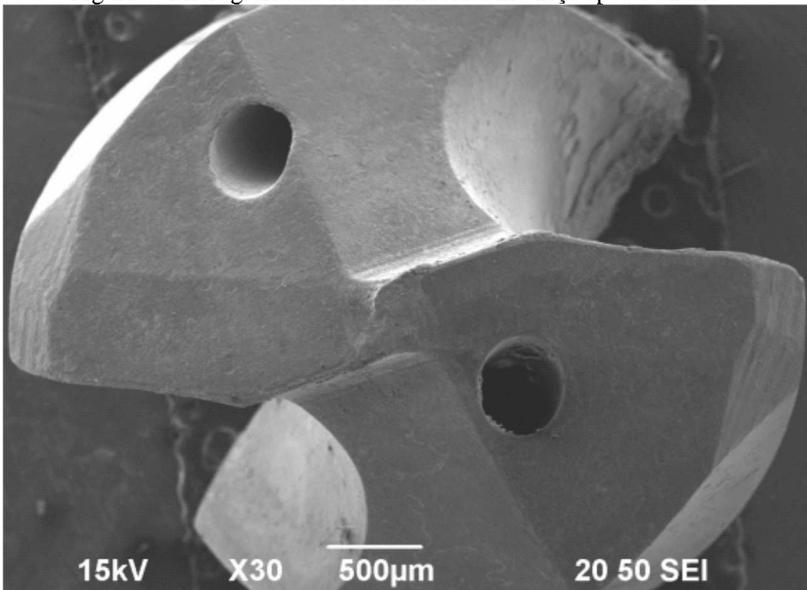


Figura 5: Micrografia da broca helicoidal inteira após o ensaio 9.

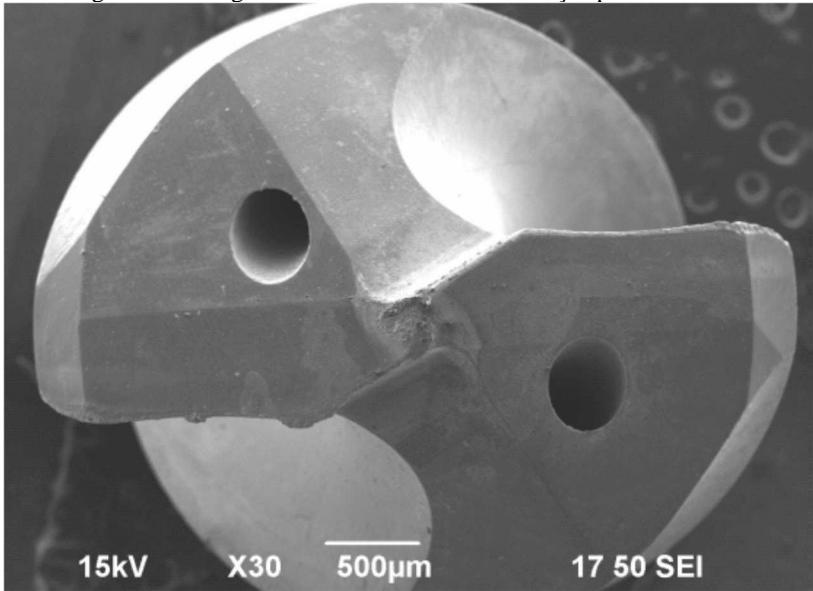


Figura 6: Micrografia da broca helicoidal inteira após o ensaio 12.

