

SEBASTIÃO GONÇALVES LIMA JUNIOR

AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO DE FERRAMENTAS
DE METAL DURO NO ALARGAMENTO DE GUIAS DE
VÁLVULAS AUTOMOTIVAS



UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA
FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA
2009

SEBASTIÃO GONÇALVES LIMA JUNIOR

AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO DE FERRAMENTAS
DE METAL DURO NO ALARGAMENTO DE GUIAS DE
VÁLVULAS AUTOMOTIVAS

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

Área de Concentração: Materiais e Processos
de Fabricação.

Orientador: Prof. Dr. Helder Barbieri Lacerda

UBERLÂNDIA - MG
2009

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)

L732a Lima Junior, Sebastião Gonçalves.
Avaliação do desempenho de ferramentas de metal duro no
alargamento de guias de válvulas automotivas / Sebastião
Gonçalves Lima Junior. - 2009.
100 f. : il.

Orientador: Helder Barbieri Lacerda.

Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Uberlândia,
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica.
Inclui bibliografia.

1. Usinagem - Teses. I. Lacerda, Helder Barbieri, 1965 - II. Uni-
versidade Federal de Uberlândia. Programa de Pós-Graduação em
Engenharia Mecânica. III. Título.

CDU: 621.9

SEBASTIÃO GONÇALVES LIMA JUNIOR

AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO DE FERRAMENTAS DE METAL
DURO NO ALARGAMENTO DE GUIAS DE VÁLVULAS AUTOMOTIVAS

Dissertação APROVADA pelo
Programa de Pós-graduação em Engenharia
Mecânica da Universidade Federal de
Uberlândia.

Área de Concentração: Materiais e Processos
de Fabricação.

Banca Examinadora:

Prof. Dr. Helder Barbieri Lacerda – UFU - Orientador

Prof. Dr. Alexandre Araújo Bezerra - IFSP

Prof. Dr. Rosemar Batista da Silva - UFU

Profª. Dra. Rosenda Valdés Arencibia - UFU

Uberlândia, 09 de abril de 2009

DEDICATÓRIA

Aos meus pais:

Sebastião e Cleny.

À minha amada esposa Leila e

à minha querida irmã Daniela.

AGRADECIMENTOS

A Deus por todas as graças concedidas em minha vida.

Aos meus pais pelo apoio e incentivo neste novo empreendimento.

À minha esposa que sempre esteve a meu lado apoiando nos momentos de maior estresse.

Ao professor Helder Barbieri Lacerda pela orientação deste trabalho.

Ao professor Álisson Machado pelo auxílio na aquisição do sensor para o circularímetro.

Aos meus amigos Paulo Mota, Aldemí Coelho e Ildeu Lúcio por todas as oportunidades oferecidas, bem como o incentivo de ingressar no mestrado.

Ao Ildeu Lúcio Siqueira que se mostrou um grande companheiro e me auxiliou durante os ensaios e em vários outros eventos e que em breve estará comemorando seu doutorado.

Ao Edson Alves Figueira Junior, aluno de iniciação científica, que mostrou grande competência no desenvolvimento de suas atividades.

Aos membros do Laboratório de Ensino e Pesquisa em Usinagem (LEPU-UFU).

À CAPES pelo apoio financeiro através da concessão da bolsa de estudo.

Ao Instituto Fábrica do Milênio – IFM, pelo apoio financeiro.

Aos colegas do programa de Pós-graduação, em especial ao Vitor Tomaz pela amizade e colaboração.

A FIAT POWERTRAIN e à MAPAL pelas informações e materiais cedidos.

A todos que de alguma forma colaboraram para a concretização deste trabalho.

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

RESUMO

O alargamento é um processo de usinagem rápido e de custos favoráveis quando se desejam furos de alta qualidade. Este trabalho tem como objetivo avaliar a qualidade dos furos realizados em guias de válvulas automotivas, fabricadas em aço sinterizado. Este estudo baseou-se em parâmetros de rugosidade superficial, circularidade e cilindridade resultantes do uso de alargadores de metal duro sem revestimento. Também foram monitoradas as forças de corte e vibrações do sistema durante a usinagem. Os experimentos foram elaborados utilizando um planejamento estatístico segundo a técnica de Taguchi, onde foi variada a geometria do alargador, a velocidade de corte, o avanço e o método de fixação da ferramenta junto ao eixo-árvore da máquina. Os resultados mostraram que o método de fixação é bastante influente no processo. Os menores desvios de circularidade e cilindridade foram obtidos com o uso de um alargador com 4 arestas de corte, com piloto, fixado com mandril hidromecânico e avanço de 0,050 mm/aresta. A faixa de velocidade de corte utilizada não apresentou influência significativa.

Palavras Chave: *alargamento, desvio geométrico, aço sinterizado, guia de válvula automotiva.*

LIMA JR, S. G., **Performance evaluation of carbide tools on automotive valve guides reaming**, 2009, 100p. M.Sc. Dissertation, Federal University of Uberlândia, MG, Brazil.

ABSTRACT

Reaming is a machining process with relatively low cost and suitable when high quality holes are required. The purpose of this work is to evaluate the quality of the holes made in automotive valve guides, fabricated with sintered steel. This study was based on parameters of surface roughness, roundness and cylindricity deviations, obtained with uncoated carbide reamers. Cutting forces and vibrations in the system also were monitored. In order to determine the experimental tests, the Taguchi design was employed and the reamer geometry, cutting speed, feed rate and tool fixation method were varied. The results showed great influence of the tool holding method. The smaller roundness and cylindricity deviations were obtained using a four edge reamer, with pilot, fixed by hydro-mechanical mandrel and feed rate of 0,050 mm/edge. The used cutting speed range did not show significant influence.

Key words: *reaming, geometric deviation, sintered steel, automotive valve guide*

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 - Dentes do alargador com divisão não uniforme (STEMMER, 1995)	07
Figura 2.2 - Grandezas envolvidas no alargamento (SANTOS, 2004)	08
Figura 2.3 - Principais ângulos e dimensões de um alargador de canais retos (Adaptado de <i>METALS HANDBOOK</i> , 1989)	09
Figura 2.4 - Terminologia dos alargadores (SKF, 1987 apud BEZERRA, 1998).....	10
Figura 2.5 - Ângulos dos alargadores (SKF, 1987, apud BEZERRA, 1998)	11
Figura 2.6 - Tipos de canais (STEMMER, 1995)	11
Figura 2.7 - Alargadores de máquina e manual (STEMMER, 1995).....	12
Figura 2.8 - Alargadores cônicos e paralelos (GUEDES, 2006)	12
Figura 2.9 - Alargador ajustável de máquina (STEMMER, 1995)	13
Figura 2.10 - Tipos de chanfros de alargadores de máquina (STEMMER, 1995)	14
Figura 2.11 - Tipos de alargadores com uma única aresta de corte (MAPAL, 2008a)	16
Figura 2.12 - Distribuição das lâminas; a) alargador com uma única aresta; b)alargador com lâminas gêmeas; c) Alargador com múltiplas arestas (MAPAL, 2008a).....	17
Figura 2.13 - Alargadores de múltiplas arestas de corte com um novo método de fixação (MAPAL, 2008a)	17
Figura 2.14 - Definição das componentes da força de usinagem (GEHRING, 1980 apud SCHROTER, 1989)	21
Figura 2.15 - Seção transversal do cavaco (SCHROTER, 1989)	22
Figura 2.16 - Três principais partes do um motor	25
Figura 2.17 - Ilustração de um conjunto da válvula (Adaptado de SANTOS, 2004)....	25
Figura 2.18 - Mau funcionamento do conjunto da guia de válvula - a) Quebra da válvula por excesso de folga; b) Aspiração do óleo da parte superior do motor para a câmara de combustão; c) Fluxo de óleo sendo direcionado para o sistema de escape de gases (STROCKEL,1969)....	26
Figura 2.19 - Uso de alargador manual em guias de válvulas automotivas (STROCKEL, 1969)	27
Figura 2.20 - Elementos do acabamento superficial (ROSA, 2005)	27
Figura 2.21 - Definição da média aritmética das alturas (R_a) (GADELMAWLA, 2002)	28
Figura 2.22 - Exemplos de diferentes superfícies com o mesmo valor de R_a (TAYLOR ROBSON, 2001)	29

Figura 2.23 - Definição do desvio de circularidade	29
Figura 2.24 - Definição do desvio de cilindridade	30
Figura 2.25 - Exemplos do desvio de cilindridade (AGOSTINHO, 1977 e TAYLOR ROBSON, 2001)	31
Figura 2.26 - Fluxograma de produção de peças sinterizadas (DIAS, 1996)	32
Figura 2.27 - Relação entre perda da qualidade e o valor nominal (Adaptado de PRATES, 1998)	34
Figura 2.28 - Decomposição do desvio de uma observação em relação a média (BARROS NETO et al., 2007)	36
Figura 3.1 - Guia de válvula: a) Imagem; b) Desenho com dimensões	40
Figura 3.2 - Alargador com piloto e sem piloto	41
Figura 3.3 - Dispositivo de fixação; a) foto da montagem completa; b) detalhes internos	43
Figura 3.4 - Mandril hidro-mecânico com alargador	44
Figura 3.5 - Barra de mandrilar com alargador	44
Figura 3.6 - Ajuste de batimento radial do alargador fixado a barra de mandrilar	45
Figura 3.7 - Montagem do sistema de aquisição de dados	46
Figura 3.8 - Esquema de conexão do sistema de aquisição de dados	46
Figura 3.9 - Diagrama de blocos utilizados no LabVIEW®	47
Figura 3.10 - Apalpador especial para o circularímetro	48
Figura 3.11 - Planos de medição de circularidade.....	48
Figura 3.12 - Corte da guia para estudo da rugosidade; a) Dispositivo de fixação para corte; b) Guia após o corte.....	49
Figura 3.13 - Perfil de rugosidade de uma das guias de válvulas.....	50
Figura 3.14 - Estudo da porosidade; a) Imagem para estudo; b) calibração do programa.....	50
Figura 3.15 - Análise das imagens do MEV no ImageTool; a) Áreas dos tons selecionados; b) Imagem em preto e branco.....	51
Figura 4.1 - Desvio de cilindridade das guias de válvula ainda em bruto	53
Figura 4.2 - Imagens obtidas no MEV	54
Figura 4.3 - Cavacos resultantes do alargamento	55
Figura 4.4 - Valores de circularidade obtidos na primeira etapa	56
Figura 4.5 - Valores de circularidade obtidos na segunda etapa	57
Figura 4.6 - Fixação do alargador na barra de mandrilar; a) sem deslocamento; b) com deslocamento	58

Figura 4.7 - Alargadores após o uso.	59
Figura 4.8 - Desvios de circularidade e cilindridade com mandril hidro-mecânico .	60
Figura 4.9 - Desvios de circularidade e cilindridade com a barra de mandrilar	61
Figura 4.10 - Comportamento dos sinais adquiridos	61
Figura 4.11 - Influência das variáveis sobre a força passiva resultante	63
Figura 4.12 - Influência das variáveis sobre a força no eixo Z	64
Figura 4.13 - Amplitude de vibração versus método de fixação.....	65
Figura 4.14 - Influência das variáveis de corte sobre a vibração usando mandril hidro-mecânico	66
Figura 4.15 - Influência das variáveis sobre a circularidade utilizando o mandril hidro-mecânico.....	68
Figura 4.16 - Influência das variáveis sobre o desvio de cilindridade utilizando o mandril hidro-mecânico	70
Figura 4.17 - Influência do avanço sobre a circularidade nos ensaios da 1ª e 2ª etapa	71
Figura 4.18 - Influência das variáveis sobre o desvio de circularidade, usando a barra de mandrilar	72
Figura 4.19 - Influência das variáveis sobre o desvio de cilindridade, usando a barra de mandrilar	73
Figura 4.20 - Influência das variáveis independentes sobre Ra com mandril hidro-mecânica	75
Figura 4.21 - Comparação dos valores de Ra para os dois métodos de fixação	76
Figura 4.22 - Influência das variáveis independentes sobre Ra com o uso da barra de mandrilar.....	77

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 - Equações para avaliação da qualidade segundo Taguchi.....	35
Tabela 2.2 - ANOVA para a Técnica Taguchi com 3 variáveis	38
Tabela 3.1 - Características do material utilizado (FIAT, 2008)	40
Tabela 3.2 - Características dos alargadores utilizados nos testes	41
Tabela 3.3 - Planejamento estatístico e respectivos fatores analisados.....	42
Tabela 4.1 - Desvios de circularidade e cilindridade nas guias em bruto	53
Tabela 4.2 - Valores de porosidade do material em bruto (em porcentagem).....	54
Tabela 4.3 - Dureza do material (HRB)	55
Tabela 4.4 - Organização dos ensaios	57
Tabela 4.5 - Desvios de cilindridade e circularidade (μm).....	60
Tabela 4.6 - Análise de variância para a força passiva resultante	63
Tabela 4.7 - Análise de variância para a força do eixo z.....	64
Tabela 4.8 - Análise de variância para vibração	66
Tabela 4.9 - Análise de variância para o desvio de circularidade com uso de mandril hidro-mecânico	67
Tabela 4.10 - Análise de variância para a cilindridade com mandril hidro-mecânico.....	69
Tabela 4.11 - Análise de variância para o desvio de circularidade com uso da barra de mandrilar.....	72
Tabela 4.12 - Análise de variância para o desvio de cilindridade com uso da barra de mandrilar.....	73
Tabela 4.13 - Valores de Ra para os dois métodos de fixação (μm)	74
Tabela 4.14 - Análise de variância para Ra com uso do mandril hidro-mecânico	74
Tabela 4.15 - Análise de variância para Ra com uso da barra de mandrilar	77

LISTA DE SÍMBOLOS E ABREVIATURAS

- ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas
- APC - Aresta Postiça de Corte
- CBN - Nitreto Cúbico de Boro Cristalino
- β - Ângulo entre os parafusos superiores e inferiores que fixam o alargador.
- θ - Deslocamento angular em relação ao eixo da barra de mandrilar.
- ap - Profundidade de corte (mm)
- f - Avanço de corte (mm/rot)
- f_z - Avanço por aresta ou avanço por dente (mm/aresta)
- Fx - Força radial na direção X ou força passiva em X (N/m)
- Fy - Força radial na direção Y ou força passiva em Y (N/m)
- Fz - Força na direção Z ou força axial (N/m)
- d - Diâmetro do menor círculo na avaliação da cilindricidade
- D - Diâmetro do maior círculo na avaliação da cilindricidade
- HRB - Dureza Rockwell B
- HSS - Aço rápido (High Speed Steel)
- J - Deslocamento linear promovido pela extremidade do alargador em relação ao eixo central da barra.
- MEV - Microscópio Eletrônico de Varredura
- PCD - Diamante policristalino (PolyCrystalline Diamond)
- r - Raio do menor círculo na avaliação da circularidade
- R - Raio do maior círculo na avaliação da circularidade
- RMS - Valor quadrático médio (Root Mean Square)
- rpm - Rotação por Minuto
- Vc - Velocidade de corte (m/min).

SUMÁRIO

CAPÍTULO 1 – Introdução	1
1.1 – Justificativa	2
1.2 – Objetivos	2
1.3 – Organização do trabalho	3
 CAPÍTULO 2 – Revisão bibliográfico	 4
2.0 – Obtenção de furos	4
2.1 – Alargamento	5
2.1.1 – <i>Materiais utilizados nos alargadores.....</i>	7
2.1.2 - <i>Terminologia e geometria dos alargadores</i>	8
2.2 – Classificação dos alargadores	9
2.2.1 - <i>Quanto ao tipo de operação</i>	9
2.2.2 - <i>Quanto ao tipo de dentes (canais)</i>	10
2.2.3 - <i>Quanto à fixação</i>	12
2.2.4 - <i>Quanto ao sentido de corte</i>	12
2.2.5 - <i>Quanto ao uso</i>	12
2.2.6 - <i>Quanto à geometria do furo</i>	13
2.2.7 - <i>Quanto à regulagem</i>	13
2.2.8 - <i>Quanto ao número de dentes</i>	13
2.2.9 - <i>Quanto ao tipo de chanfro</i>	14
2.2.10 – <i>Classificação segundo o Metals Handbook</i>	14
2.3 – Uma nova geração de alargadores	15
2.4 – Parâmetros para operações de alargamento	17
2.4.1 – <i>Velocidade de corte</i>	18
2.4.2 – <i>Avanço</i>	18
2.4.3 – <i>Profundidade de corte</i>	19
2.4.4 – <i>Fluido de corte</i>	19
2.5 – Forças de corte no alargamento	20
2.6 – Outros trabalhos de alargamento	22
2.7 – Motores a combustão	24
2.7.1 - <i>Constituição do motor</i>	24

2.7.2 - Conjunto da Válvula	25
2.7.3 – Alargamento da guia de válvula	26
2.8 – Avaliação da superfície usinada	27
2.8.1 – Média aritmética das alturas ou rugosidade média (<i>Ra</i>).....	28
2.8.2 – Desvio de circularidade	29
2.8.3 – Cilindricidade	30
2.9 – Materiais sinterizados	31
2.10 – Técnica Taguchi	33
2.10.1 – Função perda	35
2.10.2 – Análise de Variância – ANOVA	36
Capítulo 3 - Procedimento experimental	39
3.1 - Material da peça de trabalho	39
3.2 - Ferramentas utilizadas	40
3.3 - Planejamento estatístico e parâmetros de corte	41
3.4 - Método de fixação da peça	42
3.5 - Métodos de fixação da ferramenta	44
3.6 - Máquina-ferramenta	45
3.7 - Aquisição de dados	45
3.8 - Análise da qualidade dos furos	47
3.8.1 – Circularímetro	47
3.8.2 – Medição da rugosidade superficial	49
3.9 – Análise de porosidade através de imagens	50
CAPÍTULO 4 - Resultados e discussões	52
4.1 - Considerações Iniciais	52
4.2 - Caracterização do material da guia de válvula	52
4.2.1 - Análise de Porosidade do material em bruto	54
4.2.2 - Dureza do material	55
4.2.3 - Cavacos resultantes da usinagem	55
4.3 - Influência do método de fixação	56
4.4 – Alargadores após o uso	58
4.5 – Desvios de circularidade e cilindricidade	59
4.6 – Análise dos sinais adquiridos	61
4.6.1 – Influência das forças nos eixos X e Y	62

4.6.2 – <i>Influência da força no eixos Z</i>	64
4.6.3 – <i>Influência das variáveis de corte sobre a vibração</i>	65
4.7 - <i>Influência das variáveis independentes sobre o desvio de circularidade e cilindridade</i>	67
4.7.1 – <i>Desvio de circularidade utilizando mandril hidro-mecânico</i>	67
4.7.2 – <i>Desvios de circularidade e cilindridade utilizando a barra de mandrilar</i>	71
4.8 – <i>Rugosidade</i>	74
4.8.1 – <i>Rugosidade com o uso do mandril hidro-mecânico</i>	74
4.8.2 – <i>Rugosidade com uso da barra de mandrilar</i>	76
CAPITULO 5 – Conclusões	78
CAPITULO 6 – Sugestões para trabalhos futuros	80
Referências Bibliográficas	81
Apêndice – Parâmetros resultantes das análises de superfícies	88

CAPÍTULO I

INTRODUÇÃO

A usinagem abrange um grande conjunto de processos de fabricação utilizados para remover uma certa quantidade de material indesejado, na forma de cavaco, de uma peça. A usinagem é utilizada para transformar blocos fundidos de matéria-prima no formato desejado, com dimensões e acabamentos especificados para cumprir os requisitos de projeto. Quase todo produto fabricado possui componentes que necessitam ser submetidos a usinagem, frequentemente para se obter grande exatidão dimensional. Portanto, este conjunto de processos é um dos mais importantes dentro da fabricação por causa do valor agregado ao produto final. A maioria das aplicações industriais de usinagem é feita em materiais metálicos (BLACK, 1989). Dentro deste contexto de grande importância há a usinagem de componentes automotivos, especialmente a usinagem de guias de válvulas.

Em motores de combustão interna, as guias de válvulas possuem a função de posicionar de forma adequada as válvulas que controlam a entrada e saída de gases do motor. Falhas geométricas nas guias acarretam problemas de funcionamento, tais como: consumo excessivo de combustível e óleo, batidas internas, pressão excessiva no cárter e fumaça negra nos gases descartados. Normalmente, estes problemas acontecem de forma natural com o desgaste dos componentes do motor, porém falhas no processo de alargamento da guia de válvula durante a fabricação podem antecipar os mesmos, causando redução na vida útil do motor, aumentando a emissão de gases poluentes e danificando outros componentes como velas de ignição, pistões, catalisador e outros.

Atualmente o processo de alargamento das guias é executado com uma ferramenta monocortante de Diamante Policristalino (PCD), sendo de alto custo em relação a outras ferramentas de corte. Neste trabalho foram avaliadas as influências da velocidade de corte e do avanço sobre os desvios geométricos de cilindridade e circularidade resultantes do alargamento com ferramentas de metal duro (de menor custo em relação ao PCD) em guias

de válvulas automotivas fabricadas a partir de aço sinterizado. Para os testes foram avaliadas quatro geometrias de ferramentas variando o número de arestas de corte e conicidade inicial do alargador. Na avaliação do desempenho das ferramentas de corte foram analisados os sinais de força e vibração, adquiridos durante o alargamento.

Bezerra (1998) comenta a existência de poucos trabalhos técnicos-científicos sobre alargamento na literatura. Entretanto, existem várias recomendações práticas oferecidas pelos fabricantes de ferramentas, as quais são muitas vezes conflitantes entre si ou com resultados de testes práticos.

1.1 - JUSTIFICATIVA

A produção anual de veículos no Brasil está em torno de 2 milhões de unidades, cujos motores tem em média 8 válvulas. Portanto, a operação de alargamento de guias de válvulas é realizada cerca de 16 milhões de vezes por ano, apenas em nosso país.

O desvio da forma circular ou cilíndrica das guias próximo às tolerâncias de projeto é um problema encontrado durante o processo de alargamento, levando à necessidade de maiores estudos na tentativa de utilizar uma ferramenta de menor custo e com valores ótimos de velocidade de corte e avanço, que resultem em uma superfície interna da guia de válvula com melhor qualidade, ou seja, com desvios geométricos mínimos e aceitáveis, adequada ao funcionamento do conjunto válvula e guia de válvula.

Existe a necessidade de conhecer melhor a influência dos fatores ou parâmetros que influenciam na operação de alargamento, para que as condições de corte ideais possam ser identificadas, obtendo um corte estável, com maior produtividade e menor gasto com ferramentas de corte, além de reduzir o consumo de óleo lubrificante e consequentemente reduzir a emissão de gases e partículas pelo motor, contribuindo para o meio ambiente.

1.2 – OBJETIVOS

Este estudo tem três objetivos principais:

- Verificar a influência da geometria do alargador, da velocidade de corte, do avanço e do sistema de fixação dos alargadores na qualidade dos furos.
- Avaliar a qualidade dos furos realizados em guias de válvulas automotivas, baseando-se em parâmetros de rugosidade superficial, circularidade e cilindridade, obtidos com o uso de alargadores de metal duro;
- Relacionar a qualidade dos furos com as forças resultantes e as vibrações observadas durante o processo;

1.3 – ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO

Este trabalho possui cinco capítulos. No Capítulo 1 foi apresentada a introdução. No capítulo 2, foi realizada uma revisão bibliográfica sobre alargadores, dando ênfase aos trabalhos com relevância ao estudo em questão.

No terceiro capítulo é apresentada a metodologia, o planejamento estatístico e os equipamentos utilizados na preparação e execução dos ensaios. No Capítulo 4 são mostrados os resultados, bem como as discussões dos mesmos. As conclusões obtidas e as propostas para trabalhos futuros se encontram nos capítulos 5 e 6, respectivamente. Nos apêndices estão os valores de rugosidade superficial e dos desvios de circularidade e cilindridade para cada guia de válvula usinada.

CAPÍTULO II

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.0 – OBTENÇÃO DE FUROS

Os furos são elementos muito comuns e importantes em conjuntos mecânicos. Empregados em várias peças e produtos desempenham importantes funções, como: condutores de fluidos, alojamento de rolamentos, interiores de roscas, acoplamento de eixos, buchas e outras. Nas indústrias tem-se várias opções para realizá-los, dependendo das formas e condições em que se encontram nas peças (PANGRÁCIO, 2003).

A engenharia moderna exige uma produção em massa de furos com bom acabamento e precisão geométrica, necessários para a montagem de precisão. Estes requisitos geralmente não podem ser atendidos pelas brocas helicoidais (SHUNMUGAM E SAMASUNDARAM, 1990). A existência de apenas duas guias na periferia não garantem a orientação necessária (STEMMER, 1995), sendo necessária operações subseqüentes para dar ao furo características operacionais necessárias.

A confecção de furos é, geralmente, obtida pelo processo de furação. Mas quando há necessidade de alta qualidade final, ainda se empregam, por exemplo, os processos de mandrilamento, alargamento e brunimento. Nestes processos, deve-se realizar um pré-furo para que a ferramenta possa executar a usinagem. Porém, com as recentes melhorias em geometrias e materiais de ferramentas aliados aos recursos de comando numérico computadorizado, pode-se obter furos de grandes diâmetros sem necessidade de pré-furo (PANGRÁCIO, 2003).

Pangrácio (2003) afirma ainda, que esses processos de acabamento são caracterizados pelo pequeno volume de cavaco que retiram e pela possibilidade de melhor qualidade superficial e dimensional. Além disso, os processos são selecionados conforme as seguintes condições: o material a ser usinado, o tipo de furo a ser realizado, a relação comprimento/diâmetro, o acabamento superficial e as tolerâncias geométricas.

Vernier (2006) acrescenta que o alargamento para furos de alta qualidade é um processo rápido e de custo favorável, comparado com o mandrilamento fino. Este processo permite maiores valores de avanço e maior vida útil da ferramenta.

2.1 – ALARGAMENTO

O processo de furação é basicamente um processo de desbaste que geralmente produz furos com tolerâncias grandes (ISO IT11- IT14). Quando são necessários melhores acabamentos superficiais ou tolerâncias mais apertadas é necessário o uso de alargadores, que servem para prover a furos já existentes, a tolerância dimensional e acabamento desejado (STEMMER, 1995). Dormer (2007) recomenda o uso de alargadores quando se deseja furos com tolerâncias ISO de IT05 a IT12.

Alargamento é uma operação de usinagem na qual uma ferramenta rotativa executa um leve corte para melhorar a precisão e reduzir a rugosidade da superfície do furo (METALS HANDBOOK, 1989).

Segundo Weinert et al. (1998), alargamento é um processo de usinagem utilizado para produzir furos com alta definição geométrica, dimensional e qualidade superficial, freqüentemente utilizado para diâmetros abaixo de 20 mm.

Ferraresi (1975) define alargamento como um processo mecânico de usinagem destinado ao desbaste ou ao acabamento de furos cilíndricos ou cônicos, com auxílio de ferramenta geralmente multicortante. Para tanto, a ferramenta ou a peça giram e a ferramenta ou a peça se deslocam segundo uma trajetória retilínea, coincidente ou paralela ao eixo de rotação da ferramenta.

Na prática, os furos são geralmente usinados com brocas helicoidais e o alargamento é realizado como uma segunda operação para conferir melhor acabamento ao furo.

Devido à pequena remoção de material e à necessidade de uma remoção uniforme durante o alargamento, os furos iniciais produzidos por brocas ou outros processos de furação devem ter circularidade, retitude e acabamento superficial regulares. Alargadores tendem a seguir a linha de centro dos furos já existentes, e em determinados casos, há necessidade de uma operação de mandrilamento antes da operação de alargamento, de modo que se consiga atingir as tolerâncias requeridas (SCHROETER, 1989).

Segundo Bezerra (1998), o processo de alargamento tem grande aplicação na indústria automobilística, onde houve grande desenvolvimento na produção de veículos com o uso de materiais de menor densidade, tais como as ligas de alumínio-silício na fabricação de cabeçotes de motor.

Santos (2004) afirma que o alargamento é empregado na usinagem de diferentes peças. Além de usinar válvulas hidráulicas e componentes da indústria aeronáutica, este processo é muito utilizado na fabricação de motores de combustão interna. No caso das guias de válvulas, este processo é utilizado na usinagem de seu furo interno e em seu alojamento.

Do Metals Handbook (1989) pode-se extrair:

- Os materiais mais alargados são os aços com dureza de 15 a 30 HRC, sendo também utilizado em materiais não ferrosos, de menor dureza, e aços com dureza superior a 52 HRC. Este processo é largamente utilizado para acabamento de furos realizados em ferro fundido;
- As operações de alargamento não objetivam a remoção de uma grande quantidade de material. Isto normalmente é feito de maneira mais econômica por outros processos, como furação e mandrilamento. Quando a profundidade de corte é maior que 0,5 mm, para um furo com menos de 50 mm, alargamento especial ou mandrilamento deve ser considerado;
- Na prática, a quantidade de material a ser removido é fortemente influenciada pela composição do material da peça e de sua dureza. Por ser um processo de corte, a formação do cavaco é um fato importante para a eficiência do processo. Se muito pouco material é removido, o alargador irá apenas atritar-se na peça ao invés de cortá-la. Isto resultaria em danos para o alargador e para a superfície da peça. Para o alargamento de alta precisão é recomendável reduzir levemente a conicidade do alargador e usar uma bucha guia com o alargador de modo que a tolerância desejada possa ser obtida.

Tanto Hanna (2003) como Mapal (2008a) fabricam alargadores com conicidade invertida. Fazendo com que a ponta do alargador possua maior diâmetro e ocorra uma redução de 1:1000 no sentido da haste de fixação. Reduzindo o atrito entre a ferramenta e o a parede do furo, evitando que o final da aresta de corte risque a superfície recém usinada.

A ocorrência de vibrações durante o alargamento tem um efeito prejudicial na vida da ferramenta assim como no acabamento do furo. Stemmer (1995) destaca que em alargadores de corte múltiplo, é usual a colocação dos dentes em divisões não simétricas, com o objetivo de evitar vibrações. Entretanto, os pares opostos ficam a 180° um do outro, de maneira a possibilitar uma fácil medição do diâmetro da ferramenta, como mostrado na Figura 2.1.

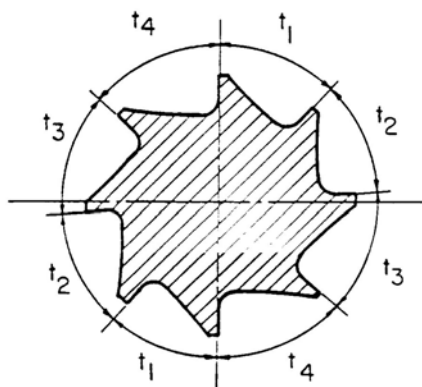


Figura 2.1 – Arestas do alargador com divisão não uniforme (STEMMER, 1995)

O acabamento de furos alargados depende da dureza do material, condições da aresta de corte, avanço e velocidade de corte. Sob condições ideais, é possível obter acabamentos de $1,0 \mu\text{m}$ ou menos. Embora, no alargamento de aço recozido os valores mais comuns estejam na faixa de $2,5$ a $3,2 \mu\text{m}$. Quando é desejada uma superfície com super-acabamento, métodos como o brunimento ou polimento devem ser considerados (METALS HANDBOOK, 1989).

Segundo Stemmer (1995), um acabamento refinado do gume (aresta) de corte em alargadores tem notável efeito sobre a vida da ferramenta, sendo observado um aumento de vida na ordem de dez vezes para ferramentas lapidadas em relação às retificadas.

2.1.1 – Materiais utilizados nos alargadores

Segundo o Metals Handbook (1989), os alargadores manuais são normalmente confeccionados de aço carbono ou de aço com baixa liga endurecidos a 62 HRC ou mais. Os alargadores para uso em máquinas são feitos de aço rápido ou possuem a haste em aço de baixa liga e insertos de metal duro nas arestas de corte. Para alargamento de materiais duros ou abrasivos, usa-se o aço rápido com maior teor de vanádio para obter superfícies com melhor acabamento e dar maior vida à ferramenta.

De um modo geral, os alargadores evoluíram junto com os materiais utilizados na fabricação de outras ferramentas de corte. Tanto Dormer (2007), Hanna (2003) e Mapal (2008a) possuem alargadores em aço rápido (HSS), metal duro, CERMET, Nitreto Cúbico de Boro (CBN) e Diamante Policristalino (PCD). No caso dos três últimos materiais, normalmente a ferramenta é feita de um material de baixo custo e somente as lâminas de corte utilizam os materiais citados.

2.1.2 - Terminologia e geometria dos alargadores

A Figura 2.2 mostra a velocidade de corte (V_c), o avanço (f) e a profundidade de corte (a_p) para o processo de alargamento. Neste processo, a usinagem é dividida em duas operações básicas: corte nas arestas principais e alisamento nas arestas laterais, as quais apóiam numa extensão relativamente grande contra a superfície do furo já usinado (WEINERT et al., 1998).

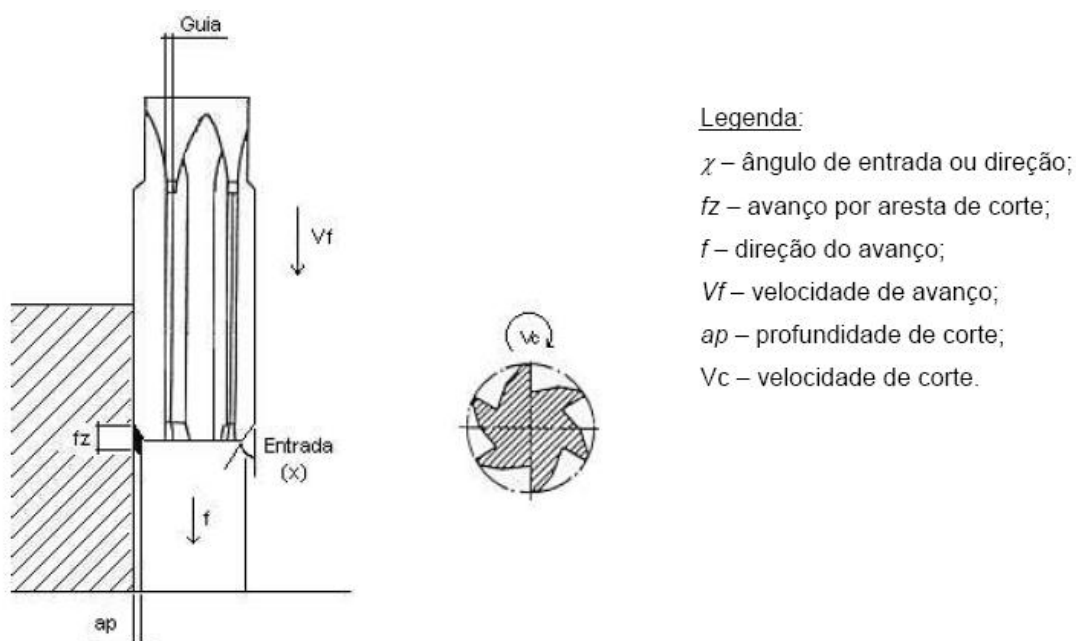


Figura 2.2 – Grandezas envolvidas no alargamento (SANTOS, 2004)

Um projeto de um alargador de canais retos é mostrado na Figura 2.3. O ângulo de corte e outros detalhes não são apreciavelmente mudados para alargamento de diversos metais, exceto o ângulo principal de folga que é aumentado de 12° para 15° para materiais macios, como, o alumínio. Às vezes, porém, mudanças secundárias nos valores típicos mostrados podem melhorar os resultados da usinagem. Por exemplo, o normal é um chanfro de entrada com 45° , às vezes seu valor é modificado para obter superfícies com melhor acabamento superficial (METALS HANDBOOK, 1989).

As oito arestas mostradas na Figura 2.3 são de um típico alargador de 25 mm de diâmetro. Um número menor de arestas é utilizado em alargadores pequenos e um número maior para alargadores de maior diâmetro (12 ou mais arestas para um alargador de 50 mm). Se um alargador tem muitas arestas, não haverá espaço suficiente para a saída do

cavaco. Por outro lado, se o mesmo possuir poucas arestas irá vibrar, principalmente ser for um alargador de canais retos (METALS HANDBOOK, 1989).

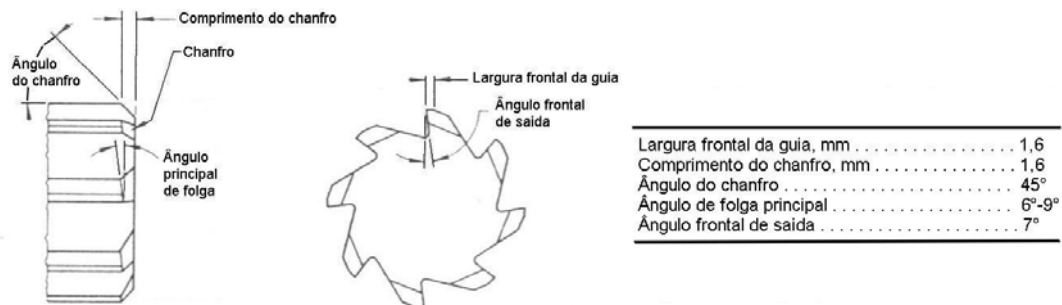


Figura 2.3 – Principais ângulos e dimensões de um alargador de canais retos (Adaptado de METALS HANDBOOK, 1989)

Toda a terminologia utilizada nos alargadores pode ser vista com detalhes na Figura 2.4. A Figura 2.5 detalha os principais ângulos dos mesmos, segundo a NBR 7487 (SKF, 1987, *apud* Bezerra, 1998, p. 12-13).

2.2 – CLASSIFICAÇÃO DOS ALARGADORES

Os alargadores podem ser classificados de diversas maneiras. Neste trabalho, são classificados quanto as suas características construtivas, como o tipo de operação, número de arestas e outros. Ao final é mostrada a classificação adotada pelo Metals Handbook(1989).

2.2.1 - Quanto ao tipo de operação

Podem ser de desbaste ou acabamento. São usados para aumentar o diâmetro de furos em bruto, como os obtidos por fundição ou forjamento. As brocas usuais não são muito recomendadas, devido à existência de apenas duas guias na periferia, que não garantem a necessária orientação da broca no furo. Os alargadores de desbaste helicoidais possuem três ou mais canais, com as respectivas arestas e guias. Distinguem-se ainda das brocas helicoidais pelo fato de não terem aresta transversal, pois a ponta da ferramenta é interrompida por um plano normal ao eixo da broca (STEMMER, 1995).

Os alargadores de acabamento são ferramentas destinadas ao acabamento de furos com grande exatidão e bom acabamento superficial. Possuem em geral, um número par de dentes distribuídos na periferia.

2.2.2 - Quanto ao tipo de dentes (canais)

Podem ser de dentes retos ou helicoidais. Os alargadores de dentes retos, de menor custo, são os mais utilizados, e preferidos para trabalhos de precisão. Os tipos de canais podem ser visualizados na Figura 2.6 (SCHROETER, 1989 e STEMMER, 1995).

Para a usinagem de furos com rasgos ou interrupções na parede, evita-se o uso de alargadores de dentes retos. Neste caso, os alargadores usados são do tipo helicoidal, com hélice esquerda para corte à direita (ou vice-versa). A direção da hélice discorda da direção de corte para que o cavaco seja empurrado para a frente, evitando que este prejudique a superfície usinada. Isto também causa uma força axial que faz com que a ferramenta se fixe melhor no cone e elimine folgas da máquina (STEMMER, 1995).

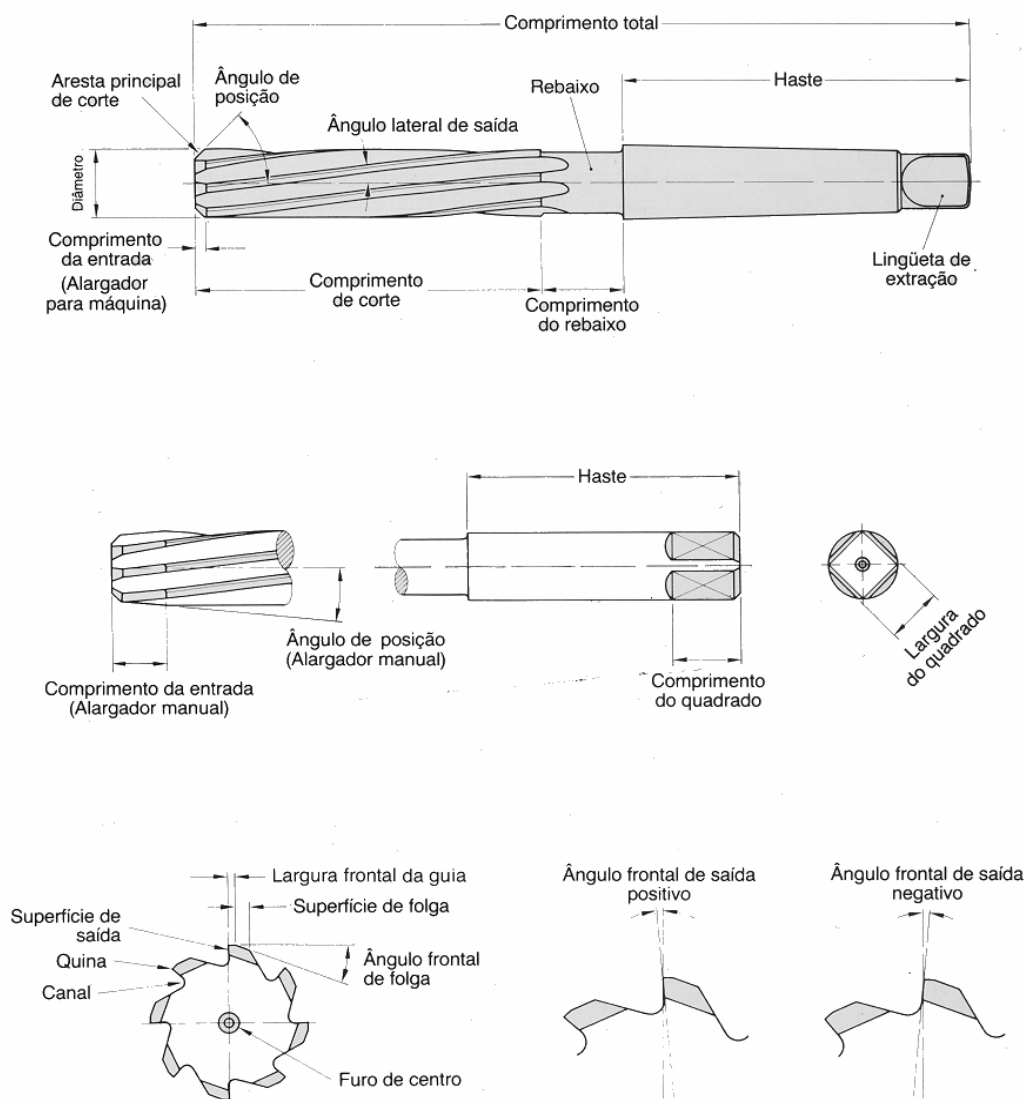


Figura 2.4 – Terminologia dos alargadores (SKF, 1987 *apud* Bezerra, 1998, p. 12)

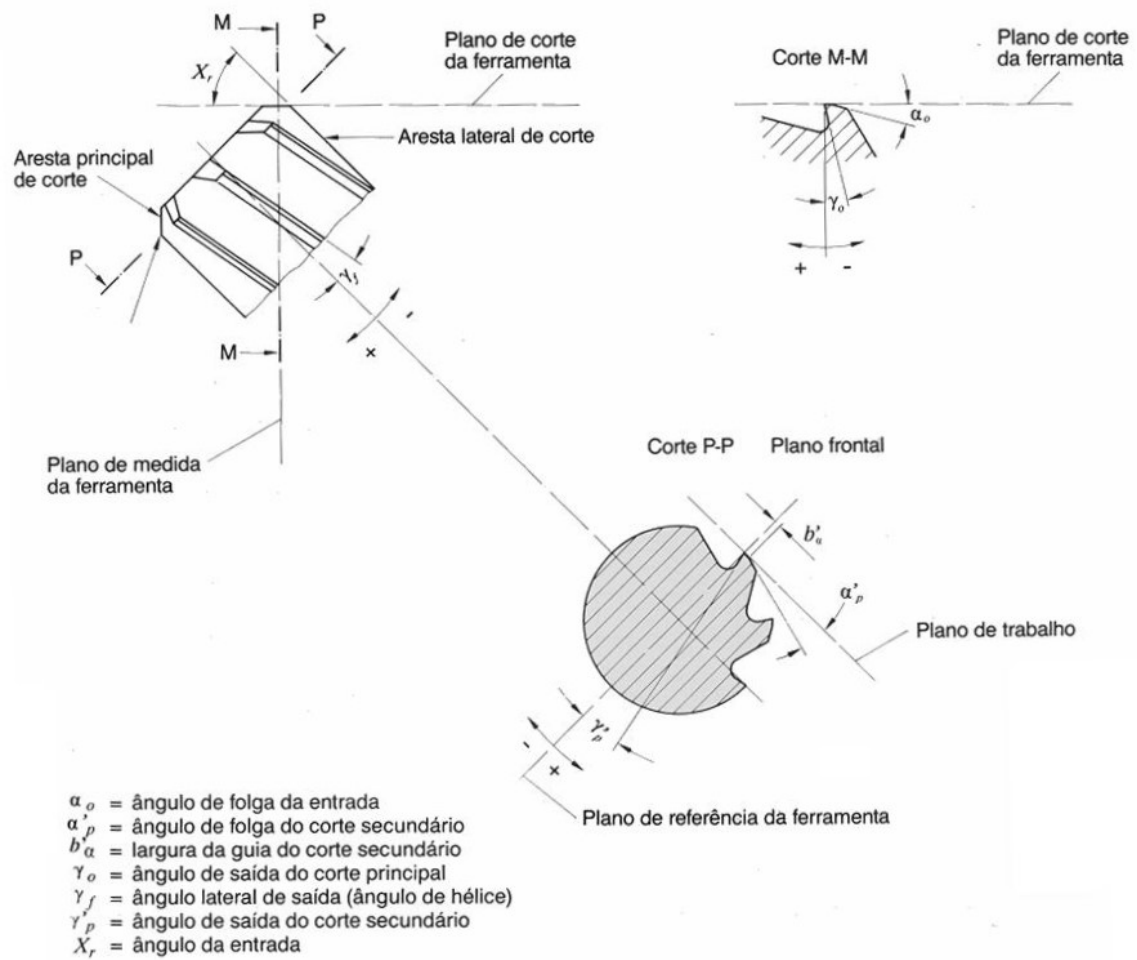
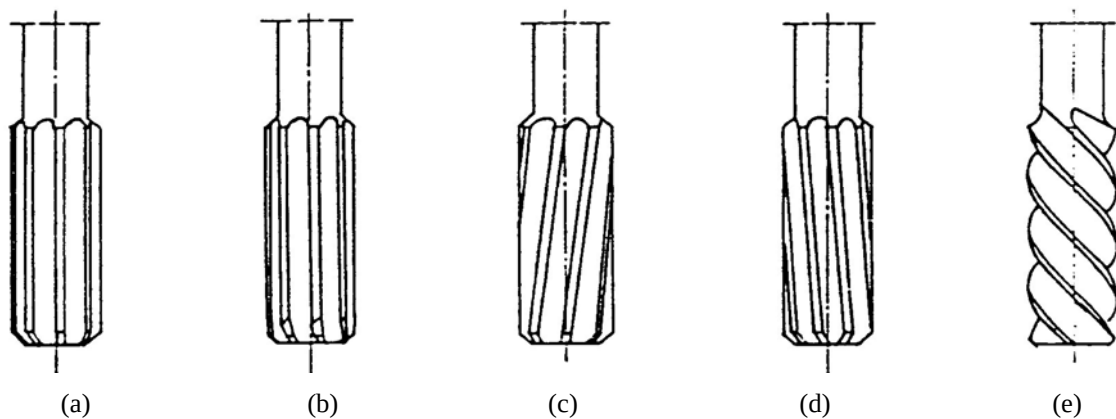


Figura 2.5 – Ângulos dos alargadores (SKF, 1987, *apud* Bezerra, 1998)



- a) Canais retos
 b) Canais retos com entrada helicoidal a esquerda
 c) Canais helicoidais a direita (-10°)
 d) Canais helicoidais a esquerda (-10°)
 e) Canais helicoidais a esquerda (-45°)

Figura 2.6 – Tipos de canais (STEMMER, 1995)

2.2.3 - Quanto à fixação

Podem ter haste cônica ou cilíndrica.

2.2.4 - Quanto ao sentido de corte

O sentido de corte verifica-se olhando o alargador de topo, posicionado horizontalmente diante do observador. Se o dente inferior corta da esquerda para a direita, diz-se que o corte é à direita. Neste caso, o alargador observado de topo corta em sentido anti-horário. Caso contrário, o corte é à esquerda.

2.2.5 - Quanto ao uso

Podem ser manuais ou de máquina. Para Pollack (1988) e Stemmer (1995), os alargadores manuais distinguem-se dos alargadores de máquina pelo chanfro de entrada maior e de menor inclinação nos alargadores manuais, para facilitar a entrada da ferramenta no furo (Figura 2.7).

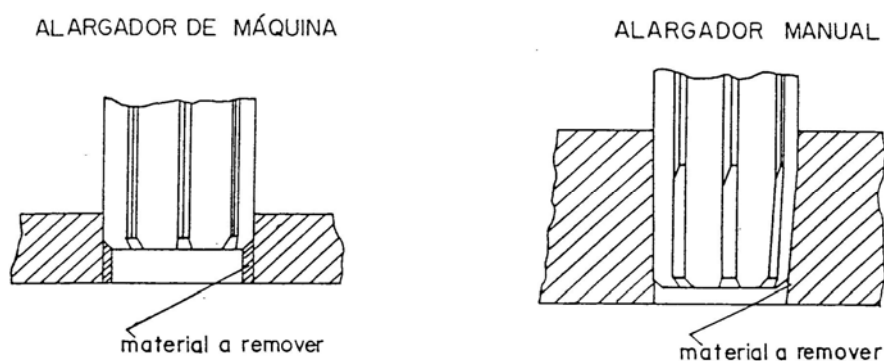


Figura 2.7 – Alargadores de máquina e manual (STEMMER, 1995)

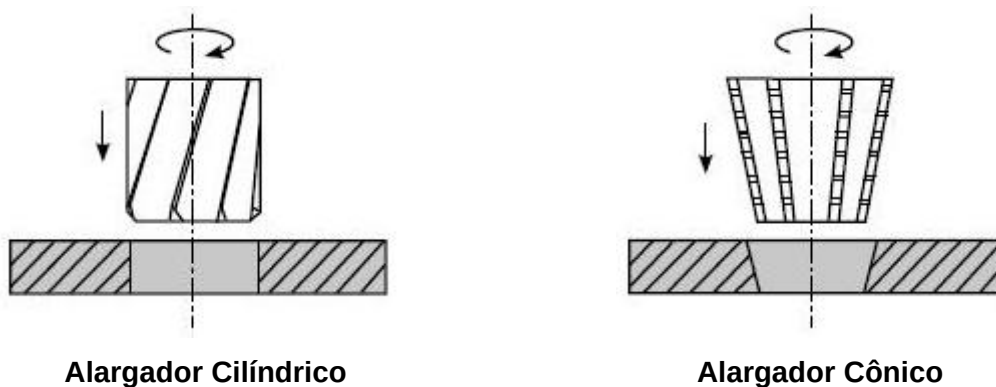


Figura 2.8 – Alargadores cônicos e paralelos (GUEDES, 2006)

2.2.6 - Quanto à geometria do furo

Podem ser cônicos ou paralelos. Alargadores cônicos são utilizados para acabamento em furos para pinos ou cones Morse (Figura 2.8)

2.2.7 - Quanto à regulação

Podem ser fixos ou ajustáveis. Nos alargadores fixos, uma ferramenta é construída para apenas uma dimensão, enquanto que nas ferramentas ajustáveis é possível variar o diâmetro destas, dentro de certa faixa de valores, através de uma regulação radial das arestas. Um exemplo, deste tipo de alargador, pode ser visto na Figura 2.9.

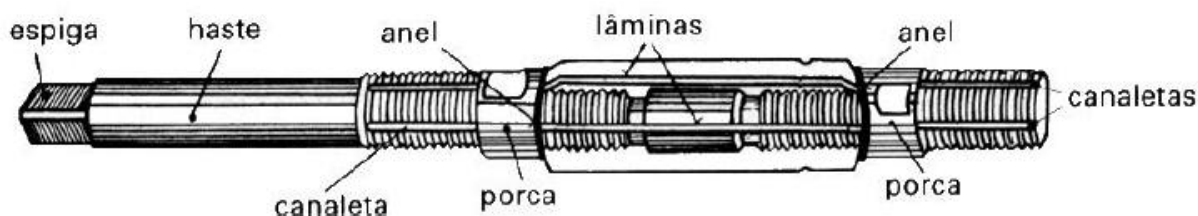


Figura 2.9 – Alargador ajustável de máquina (STEMMER, 1995)

2.2.8 - Quanto ao número de dentes

Podem ser de corte múltiplo (vários dentes) ou de corte único. Weinert et al. (1998) dizem que com alargadores multicorte pode-se minimizar um desvio de forma circular pela otimização na distribuição das lâminas, ainda que resultados muito melhores possam ser obtidos com alargadores de corte único. Além disso, o projeto de alargadores de corte único também se distingue por um número de vantagens adicionais, e, entre estas, a separação das funções de corte e guia em elementos de trabalho diferentes — lâmina e guia — são especialmente importantes. Durante o corte, as forças passivas que foram geradas nas arestas de corte são transferidas para o corpo da ferramenta através das guias, de tal forma que a ferramenta é guiada no furo usinado e a superfície é alisada.

Usando-se ferramentas com corte único e guias independentes, surgem novas possibilidades de projeto da ferramenta, pelas quais será obtido um aumento do desempenho. Possuem intercambiabilidade dos componentes de trabalho e permitem a aplicação de diferentes pares de matérias, como a lâmina em CERMET e as guias de PCD.

A estrutura simples do corpo da ferramenta básica deixa espaço suficiente para o projeto específico de suprimento interno de refrigerante. Os alargadores de corte único

oferecem a possibilidade de ajustar a lâmina se o limite de tolerância for excedido devido ao desgaste.

2.2.9 - Quanto ao tipo de chanfro

Os alargadores podem ter a entrada conforme mostrado na Figura 2.10.

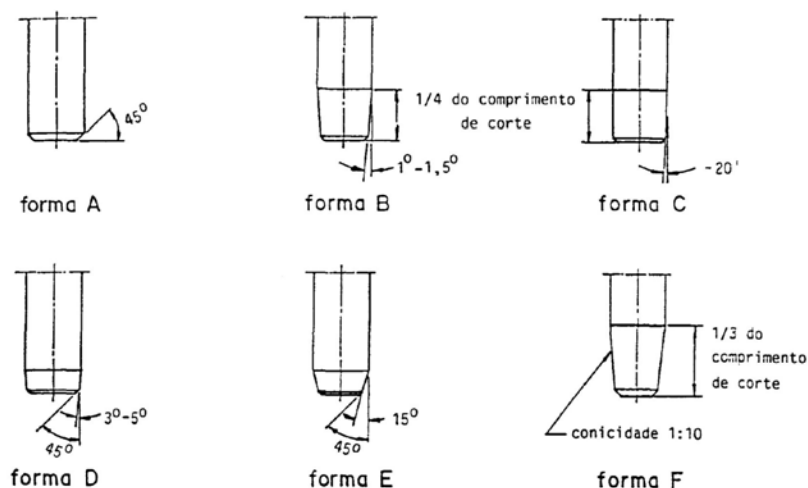


Figura 2.10 – Tipos de chanfros de alargadores de máquina (STEMMER, 1995)

2.2.10 – Classificação segundo o Metals Handbook

O Metals Handbook (1989) classifica os principais tipos de alargadores da seguinte forma:

- de canal reto;
- de canal helicoidal;
- de corte frontal;
- reguláveis;
- ocos (sem haste);
- de lâminas flutuantes;
- canhão.

Existem também outros tipos de alargadores especiais, incluindo alargadores ferramenteiros, alargadores cônicos, alargadores *Bridge*, escareadores de tubos, ferramentas conjugadas broca-alargador e alargadores de diâmetro múltiplo.

2.3 – UMA NOVA GERAÇÃO DE ALARGADORES

Segundo Mapal (2008a), o alargamento e o mandrilamento de precisão são os métodos mais usados para usinagem de furos com grande exatidão. Ferramentas com lâminas e guias intercambiáveis estão em uso em todas as partes do mundo em uma ampla gama de projetos. De acordo com a operação de usinagem, estas ferramentas permitem geometria de furos e acabamento superficial que frequentemente torna possível economizar operações adicionais de usinagem, como a retificação e o brunimento.

Os alargadores com lâmina única já são projetados há algum tempo. Sua patente foi registrada por Kress et al. (1994). No ano de 1987, Kress escreveu sobre alguns métodos de acabamento em furos e como os alargadores com uma única aresta de corte poderiam melhorar o acabamento dos mesmos, bem como substituir operações como mandrilamento fino com o uso destas ferramentas.

Os alargadores de aresta única de corte executam o corte por meio de uma lâmina enquanto outros elementos chamados de guias, localizados em locais estratégicos, se encarregam de guiar a ferramenta. Outra característica importante é a conicidade invertida, com diâmetro maior no início do alargador e diâmetro menor no fim da aresta de corte. Weinert et al. (1998) destacam que alargadores de corte único oferecem a possibilidade de ajustar a lâmina se o limite de tolerância for excedido devido ao desgaste.

Na Figura 2.11 são mostrados dois tipos de alargadores de aresta única disponíveis no mercado. No primeiro modelo, as lâminas de corte possuem somente uma aresta de corte que quando desgastada, requer a substituição da pastilha. No segundo modelo, as pastilhas se parecem com as utilizadas no processo de fresamento. Estas são fabricadas na forma sextavada, o que lhe permite ter seis arestas de corte. Assim, quando ocorrer o desgaste a pastilha não será substituída, e sim girada para que se possa utilizar outra aresta de corte.

O passo seguinte na evolução dos alargadores foram os de lâminas gêmeas. O conceito do projeto é o mesmo utilizado em alargadores com uma única aresta de corte, mas, ao invés de uma lâmina, estes alargadores possuem duas arestas cortantes, permitindo que seja utilizado o dobro do avanço, o que, de um modo geral, representa uma redução de 50% no tempo de usinagem. O uso destas ferramentas na usinagem de ferro fundido GG25 resultou numa redução de 58% no tempo de usinagem de furos com 50 mm de comprimento, quando comparado com um alargador de múltiplas arestas de corte (MAPAL, 2008b).

Por último, existem os alargadores de múltiplas arestas de corte ou múltiplas facas. As vantagens obtidas nos alargadores de uma única aresta de corte foram multiplicadas por várias arestas de corte. Assim, o avanço permitido será “n” vezes maior. Onde “n” é o número de aresta de corte.

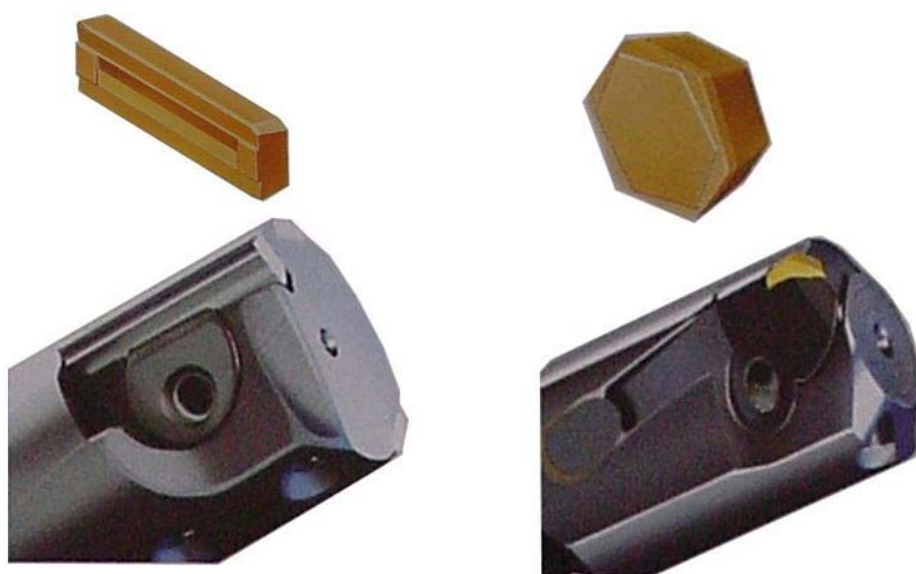


Figura 2.11 – Tipos de alargadores com uma única aresta de corte (MAPAL, 2008a)

Com o objetivo de reduzir os tempos de usinagem e a quantidade de ferramentas que uma linha de produção necessita, foram criadas algumas ferramentas modulares que possuem novos métodos de fixação, onde um cone (Morse ou ISO) com uma haste é fixado ao eixo-árvore da máquina e os alargadores são fixados na haste. A haste é produzida dentro de tolerâncias apertadas, sendo retificadas e balanceadas. Deste modo, quando é necessária a troca do alargador, troca-se somente a extremidade do cone-eixo, garantindo uma fixação rígida e adequada às exigências do processo (MAPAL, 2008a).

Agárico (2004) destaca as possibilidades que as ferramentas modulares podem propiciar na linha de produção. As vantagens vão de ferramentas especialmente projetadas para uma dada aplicação, o que normalmente resulta na eliminação de processos subsequentes, redução na quantidade de ferramentas necessárias na linha de produção, redução no tempo de usinagem e menores custos de fabricação. Um bom exemplo de modularidade é a barra de mandrilar que foi utilizada neste trabalho.

Conforme o Metals Handbook (1989), os alargadores devem possuir número de arestas compatíveis com seu diâmetro. Com isto, furos de diâmetros reduzidos só podem usufruir dos benefícios dos alargadores de corte único. Agárico (2004) destaca que as

ferramentas modulares normalmente estão disponíveis para furos com mais de 30 mm de diâmetro.

A Figura 2.12 mostra a distribuição de lâminas nos alargadores monocortantes, lâminas gêmeas e múltiplas aresta de corte. A Figura 2.13 mostra um alargador de lâminas gêmeas e outro de múltiplas arestas. Mostra também como é a fixação em ferramentas modulares.

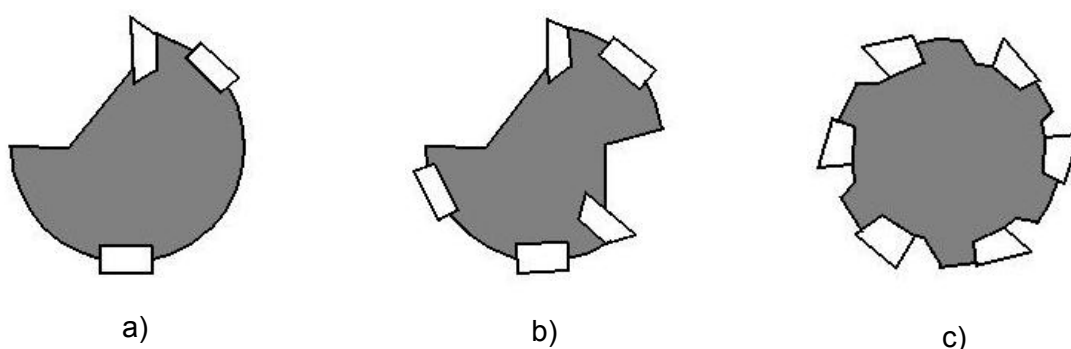


Figura 2.12 – Distribuição das lâminas: a) alargador com uma única aresta; b) alargador com lâminas gêmeas; c) Alargador com múltiplas arestas (MAPAL, 2008a).

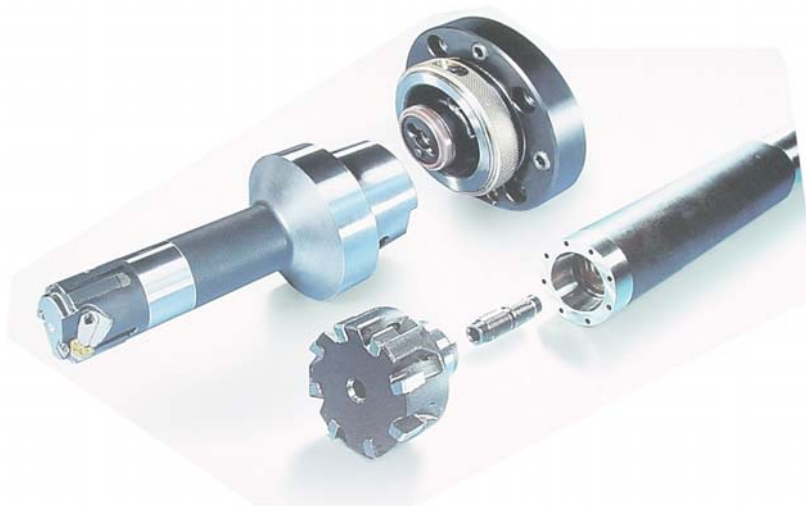


Figura 2.13 – Alargadores de múltiplas arestas de corte com um novo método de fixação (MAPAL, 2008a)

2.4 – PARÂMETROS PARA OPERAÇÕES DE ALARGAMENTO

Segundo Machado e Silva (2004), os principais parâmetros de corte para uma ferramenta são: a velocidade de corte, o avanço e a profundidade de corte. Outra variável

importante no processo de usinagem é o uso do fluido de corte que juntamente com os parâmetros de corte definem o tempo de vida de uma ferramenta.

De acordo com o Metals Handbook (1989), durante o alargamento a velocidade de corte e o avanço geram efeitos importantes sobre os resultados, principalmente na rugosidade superficial e na vida da ferramenta. Ao executar um alargamento sem conhecimento prévio, é conveniente ser conservador quanto à primeira combinação de velocidade e avanço. Estes parâmetros podem ter seus valores incrementados até o primeiro sinal de vibração. Quando este ponto for determinado é conveniente manter a velocidade e diminuir o avanço, para um acabamento melhor e maior vida da ferramenta. Frequentemente, uma variação de aproximadamente 10% na velocidade pode causar ou eliminar a vibração.

2.4.1 – Velocidade de corte

Segundo Stemmer (1995), as velocidades de corte usadas em alargadores de desbaste são aproximadamente 1/4 das velocidades usadas em operações de desbaste no torno, para o mesmo material.

Para alargar um furo de 50 mm de diâmetro em aço de baixo carbono com ferramenta de aço rápido, Booth (1989) recomenda velocidade de corte de 8 a 10 m/min, avanço de 0,5 a 1,5 mm/rev. Para o aço inoxidável, a velocidade deve ser de 4 a 6 m/min com avanço de 0,45 a 0,8 mm/rev.

Devido à sua geometria, a maioria dos alargadores são mais facilmente danificados que as brocas, por isso é usualmente utilizada aproximadamente 66% da velocidade de corte utilizada na furação (Stemmer, 1995).

Da Silva (2001), utilizando alargador de metal duro da classe K10 para usinar ferro fundido nodular, utilizou as velocidades de 16, 26, 30 e 36 m/min. O melhor acabamento foi obtido com 16 m/min, sendo isto atribuído ao fato de que ao aumentar a velocidade de corte além de se induzir vibrações inerentes ao sistema peça-ferramenta, aparecem camadas de material da peça aderentes nas arestas de corte, que prejudicam o acabamento da superfície. Estes fatos também foram observados nos trabalhos de Weinert et al. (1998) e Soratgar, 1987 *apud* Bezerra (1998).

2.4.2 – Avanço

Para Pollack (1988), o avanço para alargamento é aproximadamente três vezes maior que o utilizado no processo de furação. A velocidade de corte é aproximadamente 75% da utilizada no processo em comparação.

Com ferramenta de aço rápido, os avanços (em mm/rot) usados, para a maioria dos materiais, situam-se em torno de 1% do diâmetro do furo, reduzindo-se progressivamente a 0,5%, para furos maiores de 50 mm (STEMMER, 1995).

Da Silva (2001) verificou que ao aumentar o valor do avanço de 0,20 para 0,25mm/rot há um significativo aumento da rugosidade superficial. Isto já era esperado pelo fato da distância entre os picos e vales da superfície usinada aumentarem com a elevação do avanço.

Shunmugam e Somasundoram (1990) afirmam que, em geral, avanços altos resultam em superfícies ruins. Considerando o erro de circularidade, conseguem-se resultados satisfatórios usando-se duas vezes o avanço utilizado durante a furação. Entretanto, seus melhores resultados foram encontrados quando se utilizou 3 vezes o avanço recomendado para a furação. Melhores resultados foram encontrados em baixa velocidade de corte, sendo que o aumento da velocidade de corte deteriorava a superfície.

Da Silva (2001) verificou que a combinação de velocidades de corte e avanços mais elevados, como é o caso de 36 m/min e 0,25 mm/rot, produz menores valores de desvio e conicidade, porém é importante ressaltar que isto pode comprometer o acabamento superficial. Seria de se esperar que elevadas velocidades de corte produzissem maiores valores de desvios, devido a existência de vibração do sistema, no entanto essa relação não demonstra ser verdadeira para o desvio de conicidade assim como é para a rugosidade.

2.4.3 – Profundidade de corte

Segundo o Metals Handbook (1989), quando se deseja remover grande quantidade de material, os alargadores sólidos ou especiais são preferidos, não sendo recomendado o uso de alargadores ocos.

Nos experimentos de Schroeter (1989) se observou que as pequenas profundidades de corte faziam com que a ferramenta esmagasse o material. Por outro lado, grandes profundidades aumentavam as forças de corte e provocavam vibrações audíveis, que poderiam danificar o alargador. Os melhores resultados foram encontrados com profundidades de corte de 0,2 e 0,3 mm.

2.4.4 – Fluido de corte

Durante a usinagem, o fluido de corte melhora a eficiência do processo. Isto pode ser mensurado através do aumento da vida da ferramenta, melhorias nas tolerâncias dimensionais, redução das forças de corte, vibração e rugosidade superficial.

Segundo Machado e Silva (2004), as principais funções dos fluidos de corte são: lubrificação, a baixas velocidades de cortes, e refrigeração, a altas velocidades de corte. Funções menos importantes seriam ajudar a retirar o cavaco da região de corte e proteger a máquina ferramenta e a peça contra corrosão atmosférica.

Zeng (1996) mostrou a influência do tipo de fluido de corte no processo de alargamento em aço inoxidável, com a substituição de um fluido mineral por outro vegetal e obteve como resultado uma redução de 50% no torque e uma redução de 8 μm para aproximadamente 2 μm na rugosidade média da superfície.

Embora os fluidos de corte sejam benéficos na maioria das operações de alargamento, algumas aplicações não o requerem. O ferro fundido cinzento é normalmente alargado a seco. Algumas vezes, em função da geometria da peça, o uso de fluido de corte se torna impraticável (METALS HANDBOOK, 1989).

Weinert et al. (1998) dizem que existem exemplos consagrados de aplicação de torneamento ou fresamento sem lubrificante, em furação há apenas soluções primárias para quantidades mínimas ou usinagem a seco, sendo que a substituição de fluidos de corte é particularmente difícil no processo de alargamento, onde a concentração do fluido solúvel em água chega a ser aumentada em até 15% para que se possa garantir um processo estável e uma lubrificação satisfatória. Isso faz com que o alargamento ocupe uma posição-chave entre os processos para os quais se busca uma substituição de lubrificantes.

Estes autores ainda afirmam que, para este problema, existem basicamente duas estratégias: uma se refere à redução da concentração do fluido de corte, e a outra envolve aplicação de conceitos diferentes, como, por exemplo, a lubrificação com um sistema de pulverização-névoa. Ambas devem coincidir com uma otimização do material dos elementos de trabalho e com a geometria da ferramenta. Entretanto, para a aplicação industrial a redução da concentração do fluido de corte não leva a quaisquer vantagens, porque os custos para o fornecimento representam apenas uma pequena parcela dos custos totais, desde que os lubrificantes empregados tenham manutenção e monitoramento adequados.

2.5 – FORÇAS DE CORTE NO ALARGAMENTO

De acordo com a norma DIN 6584, a força de avanço por dente (aresta) é denominada de F_{F1} e é um vetor que está no mesmo sentido do eixo da ferramenta. Perpendicular a F_{F1} e tangente ao perímetro da ferramenta, tem-se a força total de corte por aresta (F_{c1}), que é a soma da força principal de atrito (F_{CA1}) e a força principal de corte (F_{CC1}). Neste mesmo alinhamento encontram-se também o vetor da direção de corte e vetor

da direção da velocidade de corte (GEHRING, 1980 *apud* SCHROTER, 1989). Perpendicular ao eixo da ferramenta e a direção de corte, existe a força passiva (F_{p1}). A força resultante da usinagem (F_1) é o resultado vetorial das forças F_{C1} , F_{F1} , e F_{p1} , como ilustrado na Figura 2.14.

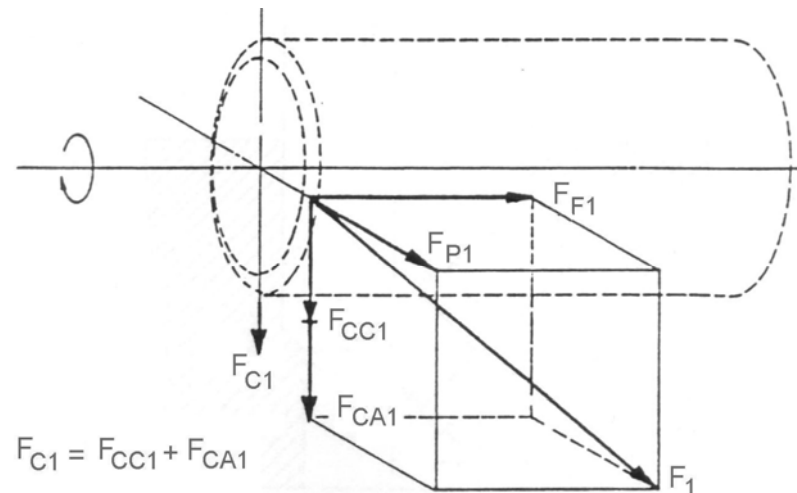


Figura 2.14 – Definição das componentes da força de usinagem (GEHRING, 1980 *apud* SCHROTER, 1989)

A partir das forças totais de corte e de avanço por dente, e da seção transversal do cavaco, Figura 2.15, é possível determinar a pressão específica de corte K_C e a pressão específica de avanço K_f , segundo:

$$K_C = \frac{F_{C1}}{b \cdot h} = \frac{2 \cdot F_{C1}}{a \cdot f_z} \quad (2.1)$$

$$K_f = \frac{F_{F1}}{b \cdot h} = \frac{2 \cdot F_{F1}}{a \cdot f_z} \quad (2.2)$$

Onde: a = sobremedida de usinagem (diferença entre os diâmetros);

h = espessura de corte;

b = comprimento de corte;

f_z = avanço por dente;

χ_r = ângulo de direção da aresta.

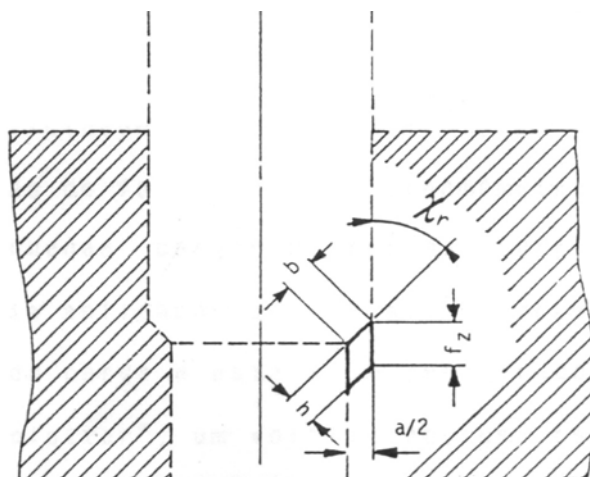


Figura 2.15 – Seção transversal do cavaco (SCHROTER, 1989)

Yang et al. (2002) criaram um modelo dinâmico para os processos de alargamento e furação. Este modelo foi composto por quatro partes: a força de corte na ponta da ferramenta (onde a velocidade é igual a zero no caso das brocas), o modelo de forças na aresta de corte, modelo dinâmico da máquina-ferramenta e correlação regenerativa entre a força e a vibração da máquina. Para tanto, foi utilizado um modelo 3D da formação do cavaco para descrever a correlação entre a aresta de corte e a peça. Deste modo, o modelo consegue prever as forças dinâmicas e a vibração limite. Também foi revelada a forma como o avanço e o ângulo de ponta da broca afetam a vibração. Os resultados da simulação mostram que o método é relativamente preciso, com erro médio de 10%.

Bhattacharyya et al. (2005) criaram um modelo mecânico com ênfase nas falhas e no desalinhamento ocorridos no processo de alargamento. Em 2006, estes mesmos autores desenvolveram um novo modelo, sendo mais completo que o primeiro. A partir da entrada de dados como geometria do alargador, avanço, velocidade de corte, geometria inicial do furo, erros de coaxialidade, inclinação do eixo-árvore e outros parâmetros, o modelo é capaz de prever o torque e as forças radial e passiva resultantes do processo de alargamento.

2.6 – OUTROS TRABALHOS DE ALARGAMENTO

Shunmugam e Somasundaram (1990) investigaram o processo de alargamento através da decomposição das frequências do sinal de torque. Onde associaram a primeira harmônica do sinal às ondas provocadas pela marca de avanço e identificaram frequências relacionadas à rotação do eixo-árvore e ao número de arestas. Concluíram também que os efeitos da velocidade de corte são muito difíceis de serem percebidos no alargamento.

Mathews e Shunmugam (1999a) estudaram o monitoramento do processo através de emissão acústica. Investigaram a correlação entre o processo de produção do cavaco e o sinal de emissão acústica gerado, mostrando que esta técnica é bastante sensível a variações nos parâmetros de corte e a ocorrência de alguns fenômenos como vibração.

Mathews e Shunmugam (1999b) treinaram uma rede neural artificial, alimentada com sinais de emissão acústica, força de corte e vibração para obterem como resultado R_a (rugosidade média), o desvio de circularidade e a tensão residual. Concluíram que fenômenos aleatórios ocorrem durante o processo e somente um sinal não é suficiente para análise. Utilizar mais de um meio de monitoramento (sensor) junto a redes neurais é a melhor maneira de monitorar o processo.

Bayly et al. (2001) utilizaram um modelo quase-estático para investigar os mecanismos que levam o alargador a oscilar e a criar lóbulos nos furos. A formulação levou a um problema de autovalor com solução que inclui oscilação e modos instáveis. Os modos corresponderam bem com comportamentos observados na prática. Concluíram que a formação de lóbulos é um processo regenerativo e que não é fortemente afetado pela rotação ou frequência natural do alargador. Além disso, o atrito ou amortecimento associado à largura frontal da guia (*margins*) aparece sob algumas condições, alterando a quantidade final de lóbulos.

Dilley et al. (2004) criaram um modelo dinâmico de alargamento que inclui amortecimento, semelhante ao utilizado no processo de torneamento e fresamento. A análise das equações de movimento levaram a um problema de autovalor que trabalha com uma combinação de frequência do eixo-árvore e profundidade de corte que resultaram em um processo estável.

Os autores concluíram ainda, que a forma do furo é dependente da dinâmica do processo de corte. A inclusão de um mecanismo de amortecimento permite prever os modos de baixa frequência que parecem corresponder aos erros de formas comumente encontrados na prática. Os resultados obtidos possuem boa precisão, mas o parâmetro de amortecimento do alargador não é bem conhecido, pois este se move dentro de um furo e a rigidez da ferramenta aumenta com a profundidade. O aumento da rigidez afeta a frequência natural da ferramenta, mas não afeta as frequências modeladas. Estudos experimentais são necessários para melhorar a precisão do modelo.

Towfighian et al. (2007) desenvolveram um modelamento com elementos finitos para vibrações em baixas velocidades de corte e com variação da geometria do alargador. Assim como no trabalho de Bayly et al. (2001), a formulação utilizada se baseia num modelo quase-estático com solução de um problema de autovalor. A modificação na geometria do

alargador permitiu que condições mais estáveis fossem obtidas com variações das posições das arestas de corte. Quando posicionadas com diferentes espaços entre elas, as arestas de corte criam um mecanismo de amortecimento considerável, capaz de melhorar significativamente as superfícies resultantes do alargamento.

2.7 – MOTORES A COMBUSTÃO

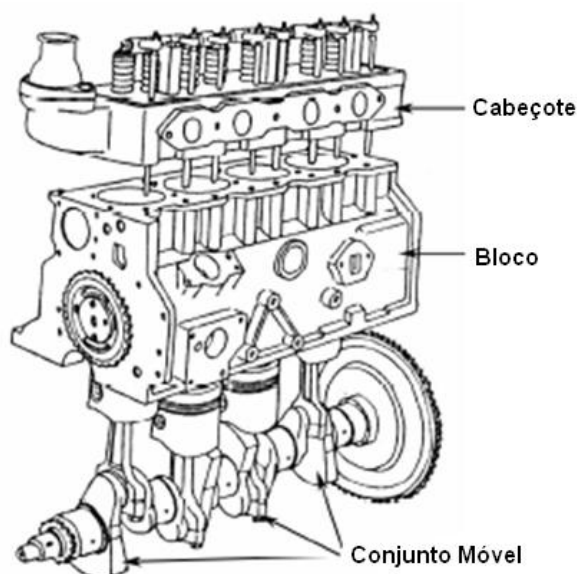
A palavra automóvel apareceu no final do século XIX e difundiu-se rapidamente para indicar o novo meio que modificava substancialmente as condições de transporte. Com a invenção da máquina a vapor, foi possível substituir a tração animal e também o esforço humano em muitos trabalhos. No final de 1771, Cugnot construiu o primeiro veículo a vapor, que percorreu as ruas de Paris a 3 km/h. Entretanto, a utilização do motor a vapor em veículos tornou-se complicada por razões técnicas, tais como tamanho e desempenho.

Em 1862, Nikolaus August Otto (alemão) inventou o motor cujo ciclo de funcionamento leva seu nome e que necessita de centelha elétrica para inflamar a mistura ar-combustível. Em 1897, o também alemão Rudolph Diesel inventou o motor cujo ciclo leva seu nome e que inflama a mistura por meio da compressão.

O motor de combustão interna atual é o resultado do trabalho de diversos engenheiros e pesquisadores com contribuições de várias ciências, destacando-se aquelas que levaram os motores a consumirem menos combustível e reduzirem as emissões de partículas na atmosfera ou no meio ambiente.

2.7.1 - Constituição do motor

A Figura 2.16 é uma imagem clássica que mostra as três principais partes de um motor de combustão interna. O cabeçote cobre a parte superior dos cilindros formando, com a cabeça do êmbolo, a câmara de combustão. O bloco é a parte principal do motor e aloja várias partes móveis e as câmaras de combustão. O conjunto móvel é responsável por converter os movimentos lineares dos cilindros em movimentos circulares, que passam por um sistema de redução para serem transmitidos as rodas.



2.16 – Três principais partes de um motor.

2.7.2 - Conjunto da Válvula

A Figura 2.17 mostra um conjunto composto por válvula, guia, sede e mola. Todos os itens devem estar bem ajustados para que o motor apresente bom funcionamento, com baixo ruído, baixa emissão de gases e bom rendimento.

Neste conjunto a sede de válvulas é a superfície onde a válvula se apóia para vedar o cilindro. A guia de válvula a mantém em sua posição de trabalho e permite o seu deslocamento. A válvula permite a entrada e a saída dos gases no cilindro e a mola tem como função fazer o fechamento da válvula. A abertura e fechamento das válvulas são realizados por meio de um came sincronizado com a posição do pistão.

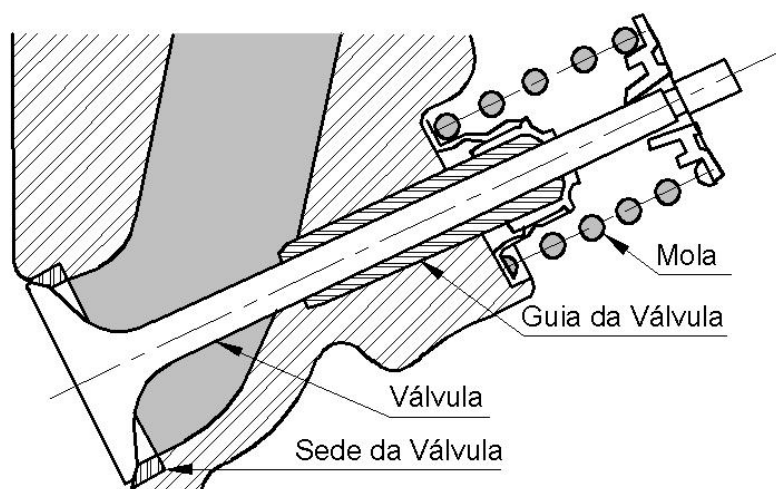


Figura 2.17 – Ilustração de um conjunto da válvula (Adaptado de SANTOS, 2004).

A Figura 2.18a ilustra o mau funcionamento deste conjunto devido ao excesso de folga causado por desgaste e como este pode levar a quebra da válvula.

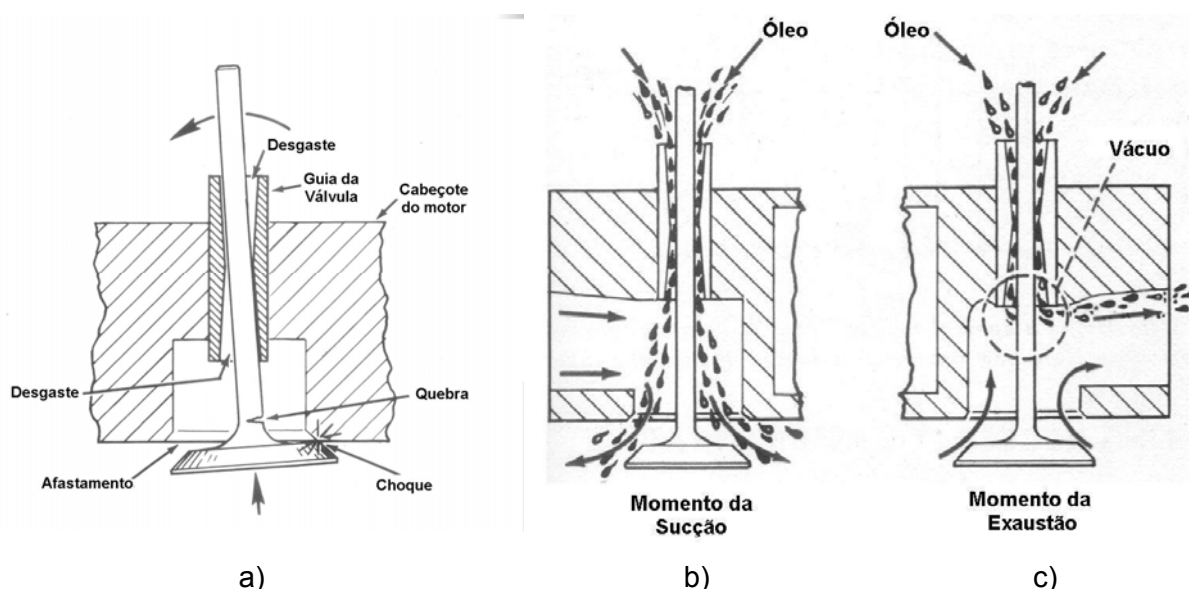


Figura 2.18 – Mau funcionamento do conjunto da guia de válvula - a) Quebra da válvula por excesso de folga; b) Aspiração do óleo da parte superior do motor para a câmara de combustão; c) Fluxo de óleo sendo direcionado para o sistema de escape de gases (STOCKEL,1969).

Outro problema deste conjunto é mostrado na Figura 2.18b, onde é gerado um fluxo de óleo na admissão do motor e o lubrificante da parte superior do motor é sugado para dentro da câmara de combustão, criando uma mistura de óleo mais combustível que resultará numa grande emissão de poluentes. Os resíduos resultantes desta queima podem ainda se depositar sobre a vela de ignição diminuindo a eficiência do motor. O mau funcionamento ainda permanece no momento da exaustão, direcionando o fluxo de óleo para o sistema de escape de gases do motor, conforme é mostrado na Figura 2.18c.

2.7.3 – Alargamento da guia de válvula

O uso de alargadores na usinagem de guias de válvulas não é algo recente. A Figura 2.19 mostra o uso manual destas ferramentas para conferir às guias de válvulas as dimensões requeridas.

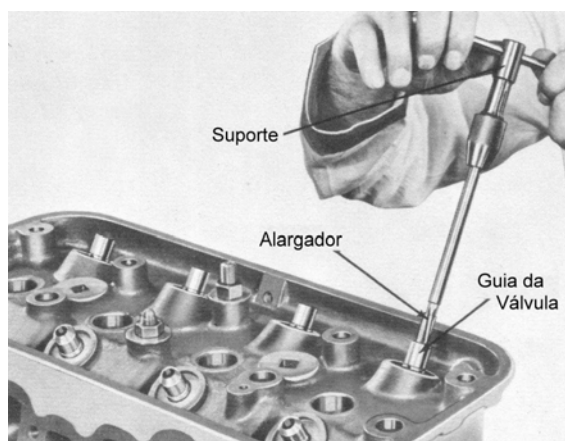


Figura 2.19 – Uso de alargador manual em guias de válvulas automotivas (STOCKEL, 1969)

2.8 – AVALIAÇÃO DA SUPERFÍCIE USINADA

Em aplicações mecânicas onde é requerida elevada exatidão, as tolerâncias dimensionais nem sempre são suficientes para garantir os requisitos de funcionalidade das peças. As medidas do diâmetro, por exemplo, não são suficientes para assegurar que um furo seja perfeitamente cilíndrico.

Uma superfície pode ser avaliada de diversas formas, dentre elas, quanto ao desvio de forma e o acabamento superficial. No caso de furos, a avaliação do desvio de forma é feito através do estudo dos valores de circularidade e cilindridade, que serão comentados nas sessões 2.8.2 e 2.8.3. O acabamento superficial pode ser avaliado pela ondulação, rugosidade e falhas, conforme mostrado na Figura 2.20.

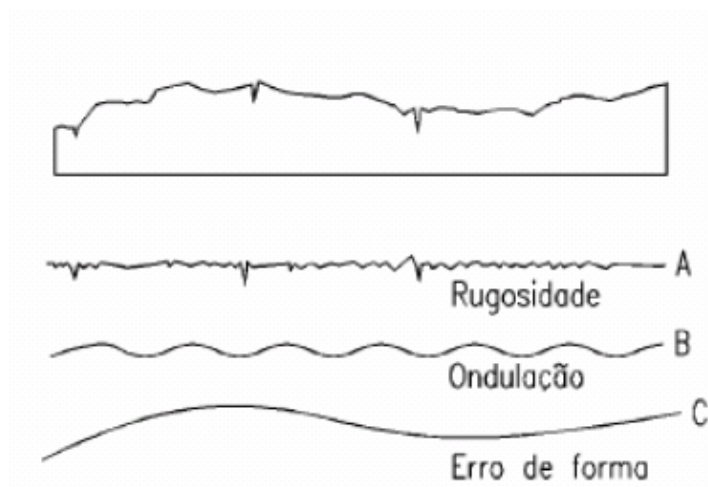


Figura 2.20 – Elementos do acabamento superficial (ROSA, 2005)

A rugosidade são irregularidades finas ou erros micro-geométricos resultantes da ação inerente do processo de corte, podendo ser estudada através de alguns parâmetros destinados a sua descrição. Neste trabalho foi utilizada somente a rugosidade média na avaliação do acabamento superficial dos furos alargados.

2.8.1 – Média aritmética das alturas ou rugosidade média (R_a)

De acordo com NBR 4287 (2002) a rugosidade média é a média aritmética dos valores absolutos das ordenadas $y(x)$ no comprimento de amostragem, como mostrado na Figura 2.21.

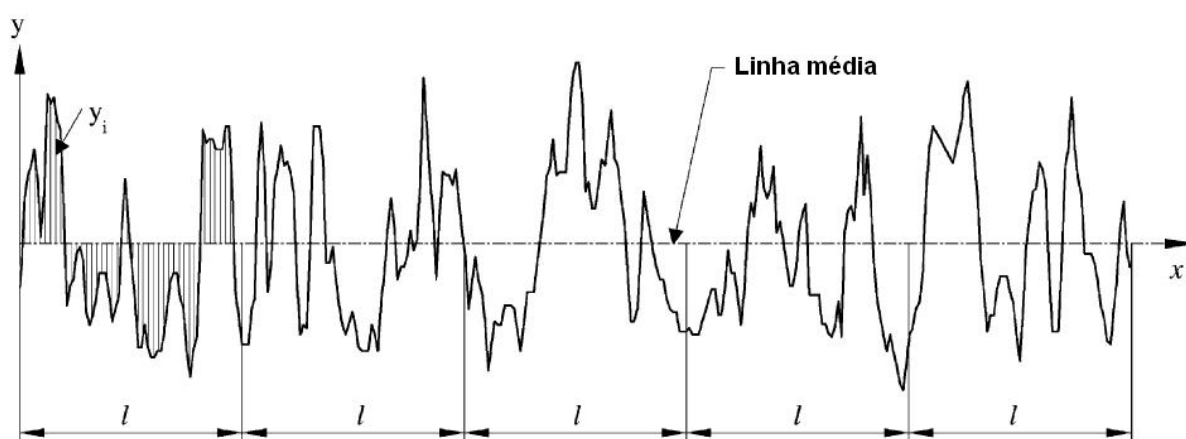


Figura 2.21 - Definição da média aritmética das alturas (R_a) (GADELMAWLA, 2002)

Este parâmetro é matematicamente definido e digitalmente implementado pela Equação (2.3). A rugosidade média não fornece nenhuma informação sobre comprimento de onda e não é sensível a pequenas variações no perfil.

$$Ra = \frac{1}{l} \int_0^l |y| dx \quad (2.3)$$

Onde:

l = Comprimento amostrado;

y = Alturas.

Assim como outros parâmetros de rugosidade, o parâmetro R_a por si só, não é capaz de caracterizar completamente uma superfície. A Figura 2.22 mostra como perfis diferentes podem apresentar o mesmo valor de rugosidade média.

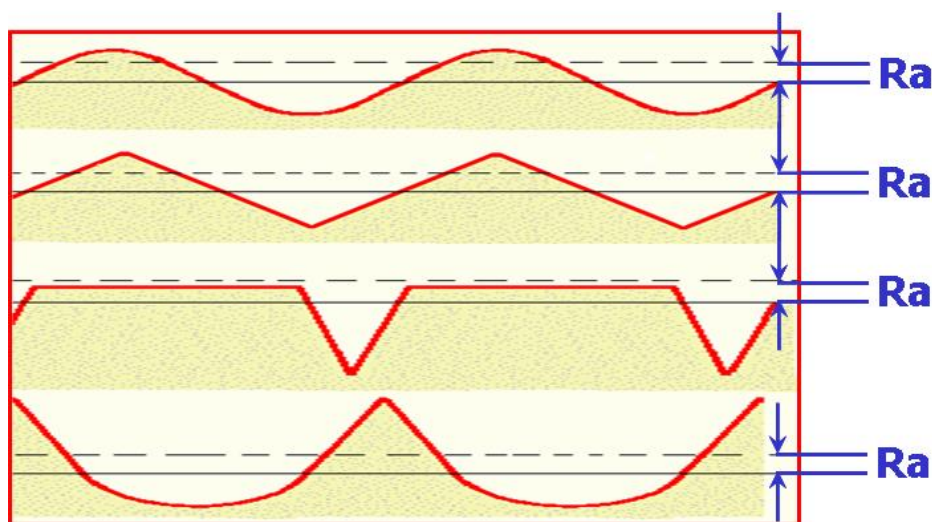


Figura 2.22 – Exemplos de diferentes superfícies com o mesmo valor de R_a (TAYLOR ROBSON, 2001)

2.8.2 – Desvio de circularidade

De acordo com Agostinho (1977) e NBR 6409 (1997) a circularidade é definida como a distância “T” entre dois círculos concêntricos que contêm o perfil adquirido, sendo a diferença entre o maior raio (R) e o menor (r), conforme mostrado na Figura 2.23. Nas guias de válvulas em estudo, a maior erro de circularidade admissível é de $9\ \mu\text{m}$.

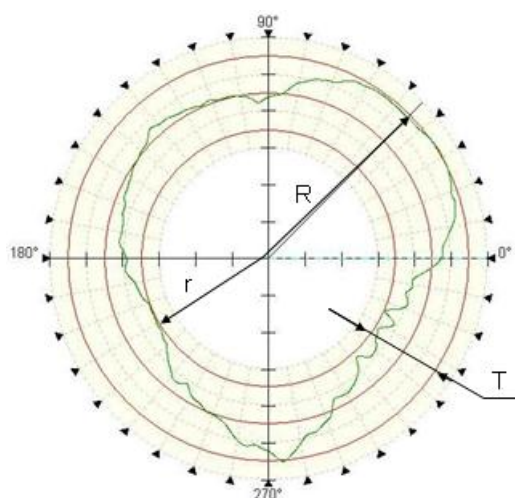


Figura 2.23 – Definição do desvio de circularidade

Agostinho (1977) afirma que uma peça cilíndrica é geralmente considerada circular, supondo-se que o desvio de forma esteja dentro dos limites dimensionais do diâmetro. Para furos e eixos de qualidade até IT 8, inclusive, o desvio de circularidade em geral será no máximo igual à tolerância de fabricação. Para furos e eixos, a tolerância de circularidade deverá ser igual à metade da tolerância de fabricação.

Este autor afirma ainda que raramente é necessário especificar tolerância de circularidade, visto que os erros de forma, estando dentro das tolerâncias dimensionais, são suficientemente pequenos para se obter montagem e funcionamento adequados da peça. Existem casos, no entanto, que os erros permissíveis, devido a razões funcionais, são tão pequenos que a precisão necessária não pode ser garantida somente pela tolerância dimensional. Nesses casos, será necessário especificar tolerâncias de circularidade. É o caso típico de cilindros de motores a combustão interna, onde a tolerância dimensional pode ser aberta (H11), porém a tolerância da circularidade tem que ser necessariamente estreita, para evitar vazamentos.

2.8.3 – Cilindricidade

De acordo com a NBR 6409 (1997) a cilindridade é definida como metade da diferença entre cilindros concêntricos que contém o perfil adquirido, ou seja, metade da diferença entre o maior diâmetro (D) e menor (d) na Figura 2.24.

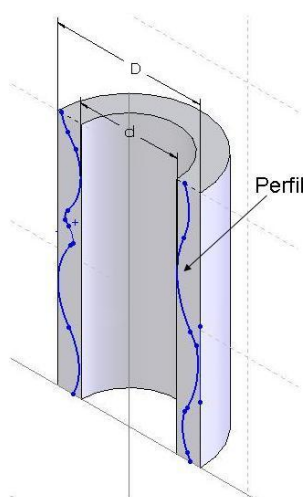


Figura 2.24 – Definição do desvio de cilindridade

A cilindridade pode ser causada por diversos desvios na forma do furo, como mostrado na Figura 4.25.

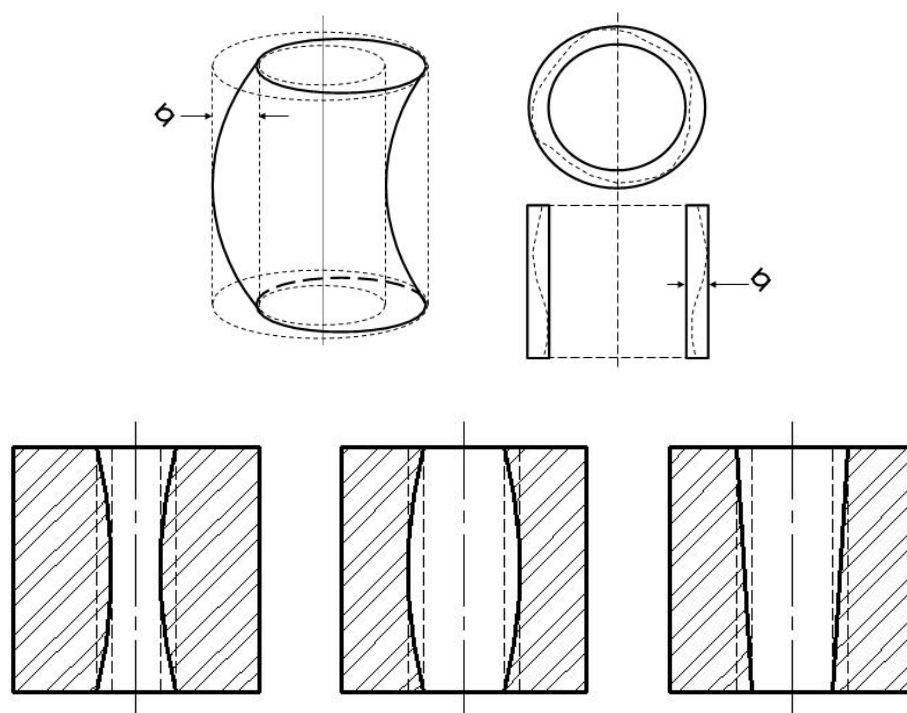


Figura 2.25 – Exemplos do desvio de cilindridade (AGOSTINHO, 1977 e TAYLOR ROBSON, 2001)

2.9 – MATERIAIS SINTERIZADOS

Segundo o Metals Handbook (1998), a metalurgia do pó foi utilizada pela primeira vez no Egito, na África e na Índia a 3000 A.C., para fabricação de ferramentas a partir de “ferro esponja”. Este processo ressurgiu na Europa nos séculos XVIII e XIX para a produção da platina, neste momento surgiu a primeira técnica moderna de metalurgia do pó, criada por Wollaston. Na década de 1970, as indústrias utilizaram a metalurgia do pó sob a forma de aços ferramentas e forjados. No fim desta década, varias descobertas significativas foram realizadas, tais como: utilização de pós-metálicos de alta pureza e pressões isostáticas, o que eliminou a segregação e garantiu a homogeneidade de peças. A característica que diferencia a metalurgia do pó de outras técnicas metalúrgicas é o fato da matéria-prima estar na forma pulverizada. Este pó de substâncias metálicas, ou eventualmente não-metálicas, possui características físicas que dependem de sua origem e que irão influenciar as propriedades finais dos produtos sinterizados (METAL HANDBOOK, 1998 e CHAVERINI, 1996).

Os materiais selecionados e misturados são colocados em moldes ou matrizes, cujas cavidades apresentam as formas e dimensões da peça a ser fabricada. Então o pó é

comprimido e submetido a altas temperaturas, geralmente variando de 60 a 75% da temperatura de fusão do material em uso. Esta operação é realizada em atmosfera protetora para se evitar fenômenos como oxidação e descarbonetação (METALS HANDBOOK, 1998).

Outras possibilidades como a recompressão, acabamento e tratamentos térmicos podem ser utilizados para melhorar características físico-mecânicas. A recompressão consegue melhorar a densidade, resistência mecânica ou o acabamento superficial. Quando necessário, o acabamento é executado por usinagem. Quanto aos tratamentos térmicos, podem ser feitos os mesmos utilizados em materiais obtidos por técnicas convencionais. Pode ser realizada a têmpera, nitretação, oxidação, cementação, carbo-nitretação e outros (CHIAVERINI, 1996). Um fluxograma deste processo é mostrado na Figura 2.26.

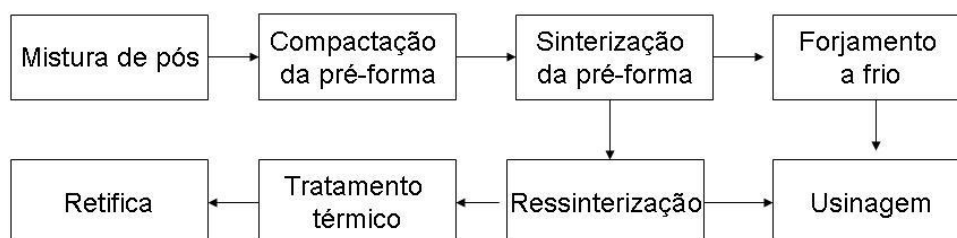


Figura 2.26 – Fluxograma de produção de peças sinterizadas (DIAS, 1996)

Para peças que trabalham em ambientes corrosivos, pode-se utilizar aço inoxidável como matéria-prima ou pode-se ainda utilizar revestimentos protetores, principalmente quando o material possui maior densidade.

O uso da metalurgia do pó vem crescendo rapidamente na indústria. As montadoras conhecem bem as vantagens oferecidas por esta técnica. Segundo Salgado et al. (2001), o mercado brasileiro utiliza cerca de 3 Kg de produtos sinterizados por veículo, enquanto Europa e Japão utilizam em torno de 6 Kg. Alguns modelos de carros nos Estados Unidos chegam a ter 24 Kg de peças sinterizadas por veículo.

No caso de componentes estruturais para fins automotivos, cerca de 90% das peças fabricadas por metalurgia do pó tem como elemento básico o ferro. Peças que sofreram compactação simples e depois a sinterização são quase que a totalidade das peças automotivas. Uma das características desta técnica é que a densidade máxima dos produtos limita-se a $7,2 \text{ g/cm}^3$. Aplicações que necessitam de maior resistência utilizam técnicas mais sofisticadas de sinterização (SALGADO et al., 2001).

O processo de sinterização consome menos da metade da energia consumida por técnicas convencionais, aproveita cerca de 97% da matéria prima, possibilita o controle da

densidade e da porosidade, o que resulta em menor impacto ao meio ambiente e menor custo de fabricação, com qualidade superior à obtida pelos processos convencionais. Para exemplificar, Salgado (2007) citou casos com resultados técnicos e econômicos altamente positivos. "Uma biela forjada por sinterização, além de reduzir aproximadamente 15% do custo, resulta em melhor homogeneidade da microestrutura e maior resistência à fadiga. Numa engrenagem, a redução de custo é de 40%, porque diminui a etapa de usinagem e elimina o tratamento térmico. Nos mancais, a redução é de 20%, com eliminação de usinagem e redução de fraturas".

Segundo Chiaverini (1996), a usinagem de aços sinterizados não oferecem dificuldades especiais, sobretudo quando a densidade for suficientemente alta. Para melhorar a usinabilidade de um material sinterizado, elementos como fósforo e enxofre podem ser adicionados (SALGADO, 2001).

Salgado (2001) afirma ainda, que o ferro fundido é um dos materiais convencionais utilizados na produção de guias de válvulas, devido à sua propriedade de lubrificação em estado sólido, proporcionada pela grafita, e pela alta resistência ao desgaste, dada pelos carbonetos. Trabalhos como este e o de Santos (2004) mostram que as guias de válvulas atualmente já são produzidas a partir de aços sinterizados.

Outra técnica disponível é o sinter-forjados, onde a matéria-prima em forma de pó é submetida a um processo que mistura técnicas de forjamento e de sinterização. Nos sinter-forjados os moldes trabalham em menor temperatura que os sinterizados, o que representa uma redução de custos. Ambas as técnicas possuem suas vantagens e as vezes é difícil decidir qual é a melhor para uma aplicação específica (DIAS, 1996).

2.10 – TÉCNICA TAGUCHI

Para compreender a técnica proposta e poder utilizá-la neste trabalho foram consultados Duncan (1965), Anderson (1993), Phadke (1993), Ross (1993), Montgomery (1997), Prates (1998), Lorenzen e Ranjit (2003), Barros Neto et al. (2007) e outros. Apesar de muitas consultas, todas as bibliografias dizem basicamente o mesmo sobre o Método Taguchi.

O Método Taguchi foi criado pelo engenheiro Genichi Taguchi e começou a ser divulgado principalmente pela indústria automobilística no início dos anos 80 (PRATES, 1998).

Taguchi vê a perda num conceito mais amplo, sendo normalmente associada a custos ocorridos na produção, e também os custos sofridos no decorrer da vida útil do

produto (reparos, devolução à indústria e outros problemas). A estratégia é incentivar produtos uniformes para que se possam reduzir custos na produção e na utilização do produto. Os dois conceitos fundamentais do método são:

1. Perdas de qualidade devem ser definidas como desvio dos valores objetivos, e não conformidade com especificações; assim são medidas em um sistema mais amplo de custos e não por custos locais nos pontos de detecção de defeitos.
2. Obter um sistema com altos níveis de qualidade requer que a qualidade seja projetada, em outras palavras, o produto deve ser pensado desde o projeto.

Através dos resultados práticos alcançados, o Método Taguchi tem encontrado grande aceitação entre os engenheiros, porém existem algumas críticas entre os estatísticos e matemáticos (BARROS NETO et al., 2007). Muito embora estes críticos reconheçam sua contribuição com os conceitos de função perda e projeto robusto.

O método faz uso de duas ferramentas que se sobressaem: a função perda e o uso do delineamento de experimentos. A primeira determina as perdas monetárias pagas, devido ao desvio da característica de desempenho do produto do seu valor ideal e a segunda é a utilização do delineamento de experimentos de uma maneira diferenciada, procurando os níveis dos parâmetros que tornam o produto robusto às fontes de variabilidade e o projeto de tolerâncias de menor custo.

A Figura 2.27 mostra de forma simplificada a relação entre perda de qualidade e o desvio de objetivo. As perdas ocorrem quando o valor mensurado (y) se distancia do valor objetivo (m). Quando o resultado excede qualquer um dos limites previstos ($m \pm \Delta$) o produto deve ser inutilizado ou em alguns casos retrabalhados, mas de toda forma o custo máximo previsto foi extrapolado.

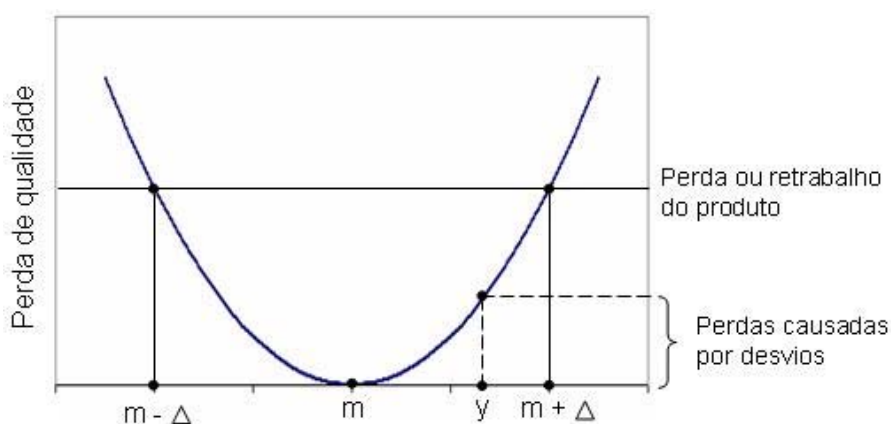


Figura 2.27 – Relação entre perda da qualidade e o valor nominal (Adaptado de PRATES, 1998)

2.10.1 – Função perda

A função perda pode ser descrita como uma função $L(y)$ e transformada numa série de Taylor em torno de um valor nominal (m).

$$L(y) = L(m + y - m) \text{ ou} \quad (2.5)$$

$$L(y) = L(m) + \left[\frac{L'(m)}{1!} \right] (y - m) + \left[\frac{L''(m)}{2!} \right] (y - m)^2 + \dots$$

Ao se desprezar os termos de ordem superior a 2, a equação (2.5) é reduzida a:

$$L(y) = \left[\frac{L''(m)}{2!} \right] (y - m)^2 \quad (2.6)$$

$$L(y) = k(y - m)^2 \quad (2.7)$$

Na Equação (2.7) é criada uma constante k que pode ser determinada pela substituição dos outros valores na fórmula. O valor de k é obtido pelo conhecimento das perdas causadas ao se ultrapassar as tolerâncias admitidas, o que normalmente é igual ao custo da perda integral do produto.

Com base no conceito da função perda, a Equação (2.7) pode ser alterada conforme mostrado na segunda coluna da Tabela 2.1. Estas alterações permitem a adequação da análise ao problema em questão.

Tabela 2.1 – Equações para avaliação da qualidade segundo Taguchi.

Formas de avaliação	Função perda	Relação Sinal/ Ruído
Nominal é melhor	$L(y) = k(y - m)^2$	$S / R = -10 \log V$
Quanto menor melhor	$L(y) = k(y)^2$	$S / R = -10 \log \left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i^2 \right)$
Quanto maior melhor	$L(y) = \frac{1}{y^2}$	$S / R = -10 \log \left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{1}{y_i^2} \right)$

De Barros et al. (2007) sintetizam bem a teoria taguchiana. Os fatores que podem ser controlados durante a fabricação são denominados de parâmetros ou sinal (S). Os que

não podem ser controlados são denominados de ruído (R). Nesta abordagem, o ruído deve ser incluído durante o planejamento e desenvolvimento do produto. Para isso, o autor recomenda o uso de planejamentos fatoriais ortogonais.

Dois tipos de planejamentos devem ser construídos: um arranjo interno, envolvendo apenas os parâmetros, e um arranjo externo baseado nas fontes de ruído. Esses dois arranjos são então cruzados, isto é, realizam-se todas as combinações possíveis.

Para Taguchi, a resposta deve estar o mais próximo possível do alvo, mas também deve ser robusta a influência do ruído. Isto significa que se deve levar em conta não só as respostas dos ensaios, mas também o ruído. Na realização desta análise são utilizadas as fórmulas contidas na terceira coluna da Tabela 2.1

Na área de fabricação mecânica, mais precisamente na área de usinagem, esta técnica é muito pouco utilizada. Um exemplo de trabalho que utilizou o planejamento de Taguchi foi de Bruno et al. (2005) que trabalharam com torneamento de aço SAE 1045.

Neste trabalho, sobre guias de válvulas automotivas, foi criado um planejamento que contém 3 fatores a 4 níveis, onde são necessários 16 ensaios para avaliação das variáveis de entrada. A função perda e a análise relação sinal/ruído foi do tipo quanto menor melhor.

2.10.2 – Análise de Variância – ANOVA

Barros Neto et al. (2007) afirmam que é fundamental avaliar a qualidade de um modelo ou dos dados obtidos. O método mais utilizado para fazer esta análise de forma numérica é a Análise de Variância (ANOVA).

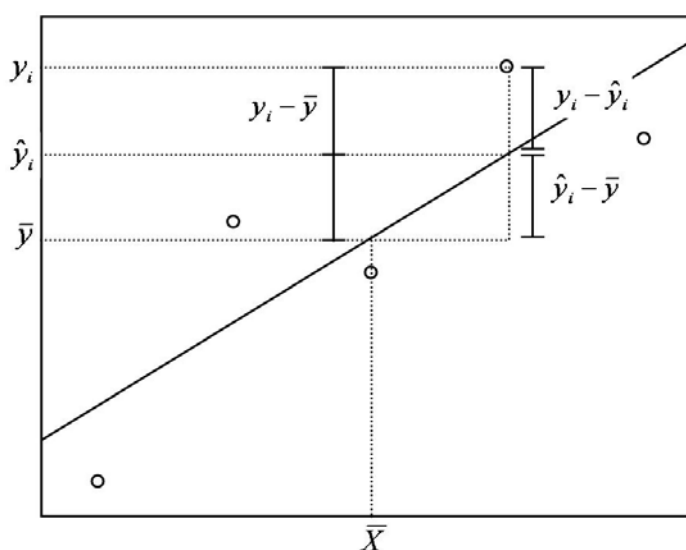


Figura 2.28 – Decomposição do desvio de uma observação em relação à média ($\bar{x}$) (BARROS NETO et al., 2007)

O primeiro passo é fazer a decomposição algébrica dos desvios das respostas observadas em relação a média global ($\bar{x}$), como mostrado na Figura 2.28. O desvio de uma resposta individual em relação à média de todas as respostas observadas, $(y_i - \bar{y})$, pode ser decomposto em duas parcelas, conforme o equacionamento 2.8.

$$(y_i - \bar{y}) = (\hat{y}_i - \bar{y}) + (y_i - \hat{y}_i) \quad (2.8)$$

A primeira parcela, $(\hat{y}_i - \bar{y})$, representa o desvio da previsão feita pelo modelo. A segunda parcela é a diferença entre o valor observado e o valor previsto. Na análise quantitativa os valores da Equação (2.8) são elevados ao quadrado gerando a Eq.o (2.9). Mais detalhes matemáticos podem ser encontrados em Barros Neto et al. (2007).

$$\sum (y_i - \bar{y})^2 = \sum (\hat{y}_i - \bar{y})^2 + \sum (y_i - \hat{y}_i)^2 \quad (2.9)$$

Estas somas de quadrados costumam ser chamadas de Somas Quadráticas (SQs). Desta forma, a Equação (2.9) pode ser resumida e resultar na Eq. (2.10).

$$SQ_T = SQ_R + SQ_r \quad (2.10)$$

Onde:

SQ_T = Soma quadrática em torno da média;

SQ_R = Soma quadrática da regressão (respostas);

SQ_r = Soma quadrática residual.

Os Graus de Liberdade (GL) de uma variável são definidos como os valores que a mesma pode assumir dentro do estudo. Deste modo, se a velocidade de corte assumir os valores 20, 40 e 60 m/min, então esta variável possui 3 graus de liberdade. Dentro dos planejamentos estatísticos é normal considerar algumas interações entre os graus de liberdade das variáveis. Na análise de ANOVA normalmente as variáveis perdem um grau de liberdade (MONTGOMERY, 1997).

Dividindo-se as somas quadráticas pelos seus respectivos números de graus de liberdade, obtêm-se as Médias Quadráticas (MQs).

No programa Statistica[®] é gerada uma tabela de análise de variância adequada ao planejamento estatístico utilizado, sendo geralmente diferente de um planejamento para outro. Para o planejamento baseado na Técnica Taguchi com 3 variáveis, os cálculos são realizados conforme a Tabela 2.2.

Tabela 2.2 – ANOVA para a Técnica Taguchi com 3 variáveis.

	SQ	GL	MQ	F	P
Variável 1	$\sum (\hat{y}_1 - \bar{y})^2$	$(n_1 - 1)$	$SQ_1 \div (n_1 - 1)$	$SQ_1 \div SQ_r$	(F_1, n_1, n_r)
Variável 2	$\sum (\hat{y}_2 - \bar{y})^2$	$(n_2 - 1)$	$SQ_2 \div (n_2 - 1)$	$SQ_2 \div SQ_r$	(F_2, n_2, n_r)
Variável 3	$\sum (\hat{y}_3 - \bar{y})^2$	$(n_3 - 1)$	$SQ_3 \div (n_3 - 1)$	$SQ_3 \div SQ_r$	(F_3, n_3, n_r)
Residual	$\sum (y_i - \hat{y})^2$	$\sum_1^3 (n_i - 2)$	$SQ_r \div (n_r)$		

O valor P, também chamado de *P-value*, é o nível de significância observado para a variável em estudo. Seu valor é determinado através da distribuição F (*Fischer-Snedecor*) e os graus de liberdade da variável e do residual. Se o valor de P for maior ou igual que o nível de significância desejado, a hipótese nula será aceita. Quanto menor o valor de P, mais significativa é a variável. Para um nível de significância superior a 95%, P deve ser menor que 0,05 (DA SILVA, 2005).

CAPÍTULO III

PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

Este capítulo descreve os materiais e métodos utilizados para atingir os objetivos propostos no capítulo 1. A metodologia consistiu na realização de ensaios de usinagem das guias de válvulas, com medição de forças e vibração. Após a usinagem foram medidos os desvios de circularidade, cilindridade e a rugosidade superficial resultante nas guias de válvulas. Os parâmetros, ou variáveis independentes, estudados no planejamento estatístico foram: velocidade de corte, avanço e geometria do alargador.

Objetivando minimizar o número de ensaios necessários foi implementado um planejamento experimental, baseado na Técnica Taguchi. Os valores para as variáveis independentes foram tomados de comum acordo com os técnicos da indústria fornecedora das ferramentas. Os furos trabalhados possuíam diâmetro inicial de 4,5 mm e comprimento de 44 mm, sendo alargados para o diâmetro de 5 mm, o que tornou a profundidade de corte constante para todos os ensaios.

As variáveis dependentes ou resultantes a serem analisadas são: Desvios de circularidade e cilindridade, rugosidade superficial, forças de corte e vibração. Em todos os ensaios foi utilizado o fluido de corte emulsionável com concentração de 10%, na condição de jorro.

3.1 – MATERIAL DA PEÇA DE TRABALHO

Todos os ensaios foram realizados em buchas de aço sinterizado, utilizadas para a fabricação das guias de válvulas automotivas. Este material foi cedido pela FIAT POWERTRAIN, divisão do grupo FIAT responsável pela produção de motores na montadora. Na Figura 3.1 pode-se visualizar uma guia e suas principais dimensões. Outras características podem ser encontradas na Tabela 3.1.

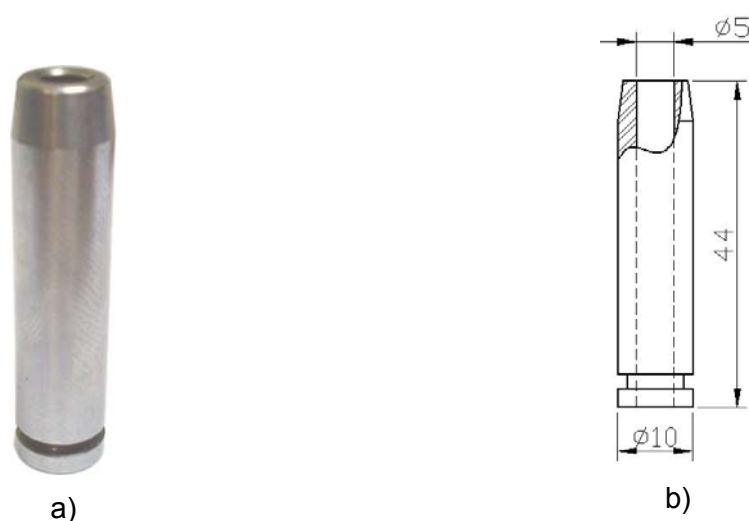


Figura 3.1 – Guia de válvula: a) Imagem; b) Desenho com dimensões

Tabela 3.1 - Características do material utilizado (FIAT, 2008)

Composição Química [%] em peso	C 1,0-1,5	Mn 0,7-1,3	S 0,2-0,7	Sn 0,1-1,0
	Cu 1,0-4,0	Outros elementos ≤ 2	Ferro Composição restante	
Densidade	≥ 6,3g/cm ³ - Variação admissível de um ponto para outro ≤ 0,4 g/cm ³			
Dureza aparente	50 – 95 HRB			
Estrutura	Matriz perlítica com áreas ricas em cobre, presença de lubrificantes sólidos. Porosidade distribuída de forma uniforme.			

3.2 – FERRAMENTAS UTILIZADAS

Normalmente, o processo de alargamento é uma operação subsequente à furação, porém neste trabalho, a bucha já possui um furo de 4,5 mm, obtido durante o processo de sinterização, o que dispensa o uso de broca helicoidal para criação de um pré-furo, não sendo necessário nenhum tipo de preparação antes do alargamento.

Para realização dos testes foram selecionadas quatro ferramentas de metal duro, com diâmetro nominal de 5 mm, sem revestimento, sendo duas com piloto integrado e outras duas que necessitam de uma quinta ferramenta como piloto, conforme é mostrado na Tabela 3.2.

Tabela 3.2 – Características dos alargadores utilizados nos testes

Nº	Código do fabricante	Nº de arestas	Tipo
1	K42282	4	Sem piloto
2	K42283	6	Sem piloto
3	K18465	4	Com piloto
4	K42281	6	Com piloto

Para os dois primeiros alargadores, é necessária a criação de um furo inicial ou furo piloto, realizado por uma outra ferramenta, diferente das quatro citadas. Esta ferramenta piloto possui um pequeno comprimento cônico, responsável por criar um furo-guia de aproximadamente 10 mm de comprimento e 4,8 mm em seu menor diâmetro. Com isso, qualquer uma das duas ferramentas é guiada somente no início do processo. As duas últimas ferramentas da tabela possuem um pequeno piloto na ponta, o que permite que elas sejam guiadas até o fim da usinagem. Esta diferença pode ser observada na Figura 3.2.



Figura 3.2 – Alargador com piloto e sem piloto

3.3 – PLANEJAMENTO ESTATÍSTICO E PARÂMETROS DE CORTE

O planejamento utilizado durante a fase de pré-testes foi o Taguchi, também conhecido como projeto robusto. A escolha deste método baseou-se na necessidade de criar um planejamento que aceitasse três fatores (ferramenta, velocidade de corte, avanço) com quatro níveis cada. O número de níveis foi definido em função da quantidade de ferramentas envolvidas no estudo.

Para o gerenciamento de dados foi utilizado o programa Statistica 7.0[®]. A partir do número de fatores e níveis, é gerada uma tabela com o mínimo de combinações necessárias para execução do experimento, mostrados na Tabela 3.3.

Tabela 3.3 – Planejamento estatístico e respectivos fatores analisados.

Teste	Ferramenta		Velocidade de corte (m/min)		Rotação (rpm)	Avanço (mm/dente)		Z	Avanço (mm/min)
1	1	K42282	1	33	2102	1	0,035	4	294
2	1	K42282	2	38	2420	2	0,050	4	484
3	1	K42282	3	42	2675	3	0,065	4	696
4	1	K42282	4	47	2994	4	0,080	4	958
5	2	K42283	1	33	2102	2	0,050	6	631
6	2	K42283	2	38	2420	1	0,035	6	508
7	2	K42283	3	42	2675	4	0,080	6	1284
8	2	K42283	4	47	2994	3	0,065	6	1167
9	3	K18465	1	33	2102	3	0,065	4	546
10	3	K18465	2	38	2420	4	0,080	4	774
11	3	K18465	3	42	2675	1	0,035	4	374
12	3	K18465	4	47	2994	2	0,050	4	600
13	4	K42281	1	33	2102	4	0,080	6	1009
14	4	K42281	2	38	2420	3	0,065	6	944
15	4	K42281	3	42	2675	2	0,050	6	802
16	4	K42281	4	47	2994	1	0,035	6	629

Z= Número de dentes da ferramenta.

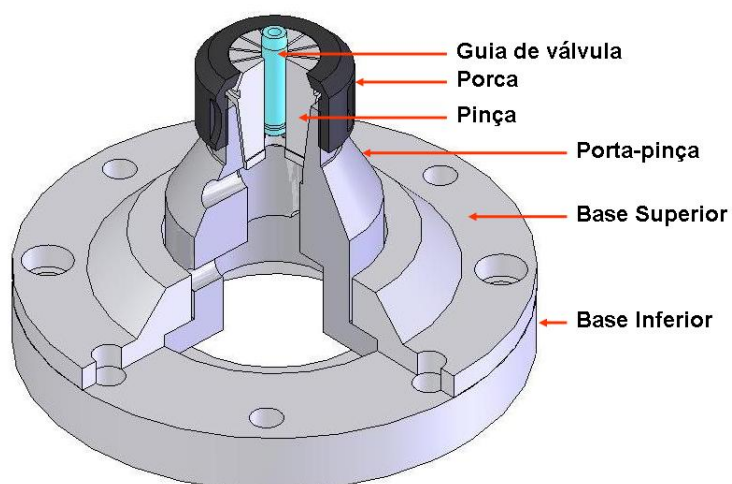
O fabricante recomenda que os alargadores trabalhem com velocidade de corte de 40 m/min e avanço de 0,06 mm/aresta. Durante a elaboração do planejamento experimental foi necessário definir quatro valores de velocidades de corte (33; 38; 42 e 47 m/min) e mais quatro valores de avanços (0,035; 0,050; 0,065 e 0,080 mm/aresta), de modo que os parâmetros recomendados pelo fabricante ficassem no ponto médio.

3.4 – MÉTODO DE FIXAÇÃO DA PEÇA

Siqueira et al. (2006) perceberam que um dos fatores limitantes na usinagem de anéis para a sede de válvula, era a fixação deste item, pois necessitaria de muitos cabeçotes de motores para este fim. Não é possível fixar os anéis ou guias de válvulas em um cabeçote de motor e depois removê-los para a inserção de novos itens, de forma adequada, o que motivou a criação de um dispositivo de fixação.



(a)



(b)

Figura 3.3 – Dispositivo de fixação: a) foto da montagem completa; b) detalhes internos;

A Figura 3.3 mostra este dispositivo, que é composto por uma base para fixação sobre a mesa da máquina ou sobre um dinamômetro. Na parte superior deste conjunto foi adicionada uma pinça fabricada sob encomenda, utilizada para fixar os anéis. Quando se deseja alargar a guia, deve-se substituir esta pinça por outra com diâmetro de 10 mm, permitindo trocar uma guia usinada por uma em bruto de forma simples e confiável.

3.5 – MÉTODOS DE FIXAÇÃO DA FERRAMENTA

Para a fixação do alargador ao eixo-árvore foram utilizados dois métodos de fixação. O primeiro método foi um mandril hidro-mecânico, mostrado na Figura 3.4.



Figura 3.4 – Mandril hidro-mecânico com alargador

O segundo método é o utilizado na linha de fabricação, sendo denominado de barra de mandrilar. Este método consiste em uma ferramenta onde são fixadas lâminas de corte, para desbaste ou acabamento da sede e um alargador para acabamento das guias de válvula, conforme mostrado na Figura 3.5. Na prática, este conjunto executa primeiro o alargamento e depois o mandrilamento das sedes.



Figura 3.5 – Barra de mandrilar com alargador

A barra de mandrilar possui quatro parafusos dispostos a 90° uns dos outros. Através do ajuste destes parafusos, pode-se corrigir o batimento radial do alargador. Para isto, foi utilizado um relógio comparador com resolução de 1 μm , como mostrado na Figura 3.6. Os ajustes realizados resultaram em erro de batimento máximo de 3 μm , não sendo possível

eliminar o batimento radial. De acordo com o fornecedor dos alargadores, o maior batimento admissível é de 4 μm .



Figura 3.6 – Ajuste de batimento radial do alargador fixado à barra de mandrilar

3.6 – MÁQUINA-FERRAMENTA

Os ensaios foram realizados em um centro de usinagem ROMI® Discovery 760, com potência máxima de 11 kW e rotação de 10 a 10.000 RPM.

3.7 – AQUISIÇÃO DE DADOS

Um dinamômetro Kistler® 9265B foi utilizado para medição das forças de corte. Este equipamento foi montado sobre a mesa da máquina-ferramenta e o dispositivo de fixação da guia foi montado sobre o mesmo. Junto a esta montagem, foi adicionado um acelerômetro para monitoramento de vibrações. Um esquema desta montagem pode ser visto na Figura 3.7.

Os sinais gerados pelo dinamômetro são inseridos numa caixa de distribuição, responsável por separar os sinais das forças de corte. Após a decomposição, os sinais são amplificados e condicionados por um amplificador de carga, e então podem ser inseridos no bloco conector BNC-2110. O sinal gerado pelo acelerômetro também é amplificado e condicionado por um amplificador de carga apropriado, antes de ser inserido no bloco conector da placa de aquisição. Os sinais analógicos são transformados em sinais digitais pela placa de aquisição inserida no interior do computador. Todo esquema descrito pode ser visualizado na Figura 3.8.

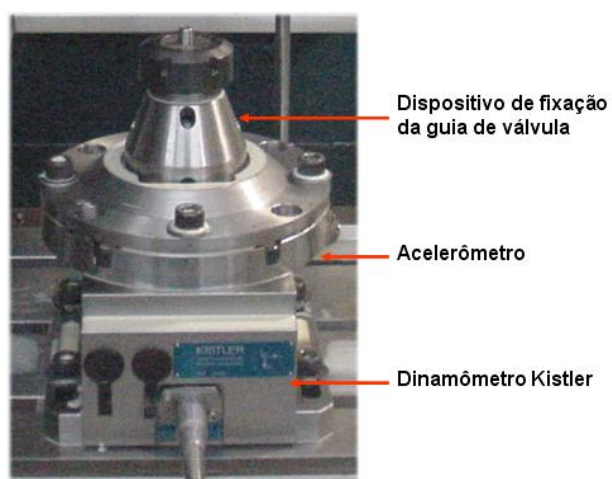
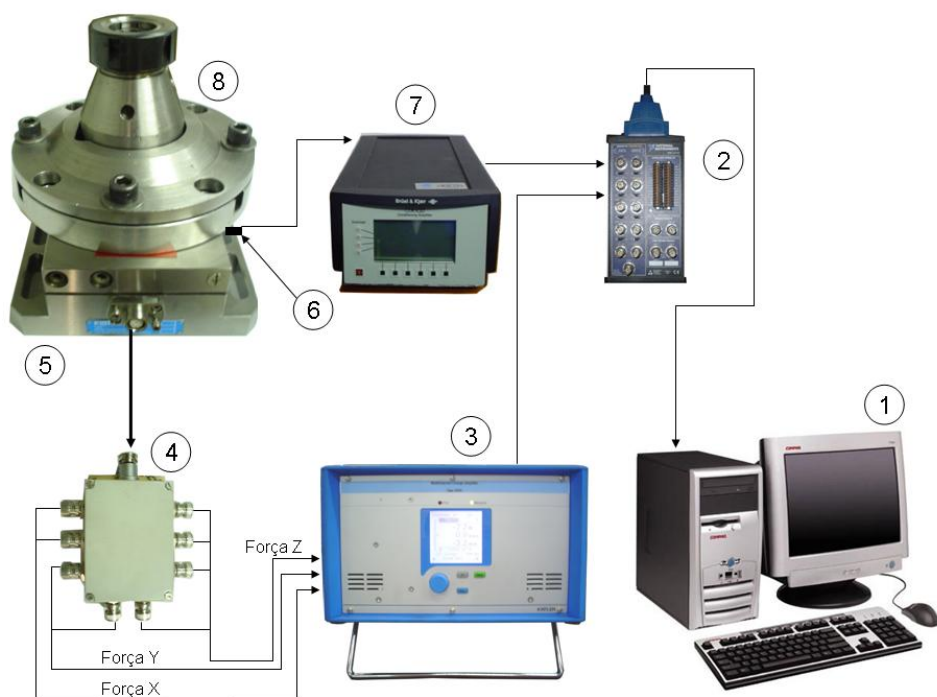


Figura 3.7 – Montagem do sistema de aquisição de dados



- | | |
|---|--|
| 1 - Computador com placa de aquisição | 6 - Sensor de vibração (acelerômetro) |
| 2 - Bloco conector BNC-2110 | 7 - Amplificador para o acelerômetro |
| 3 - Amplificador de carga da Kistler® 5070A | 8 - Dispositivo de fixação do anel e guia de válvula |
| 4 - Caixa de distribuição da Kistler® 5407A | |
| 5 - Dinamômetro da Kistler® 9265B | |

Figura 3.8 – Esquema de conexão do sistema de aquisição de dados

Finalizando a parte de aquisição, todo gerenciamento da placa de aquisição e gravação das informações, foi realizado por meio do programa LabVIEW®, conforme o diagrama de blocos mostrado na Figura 3.9.

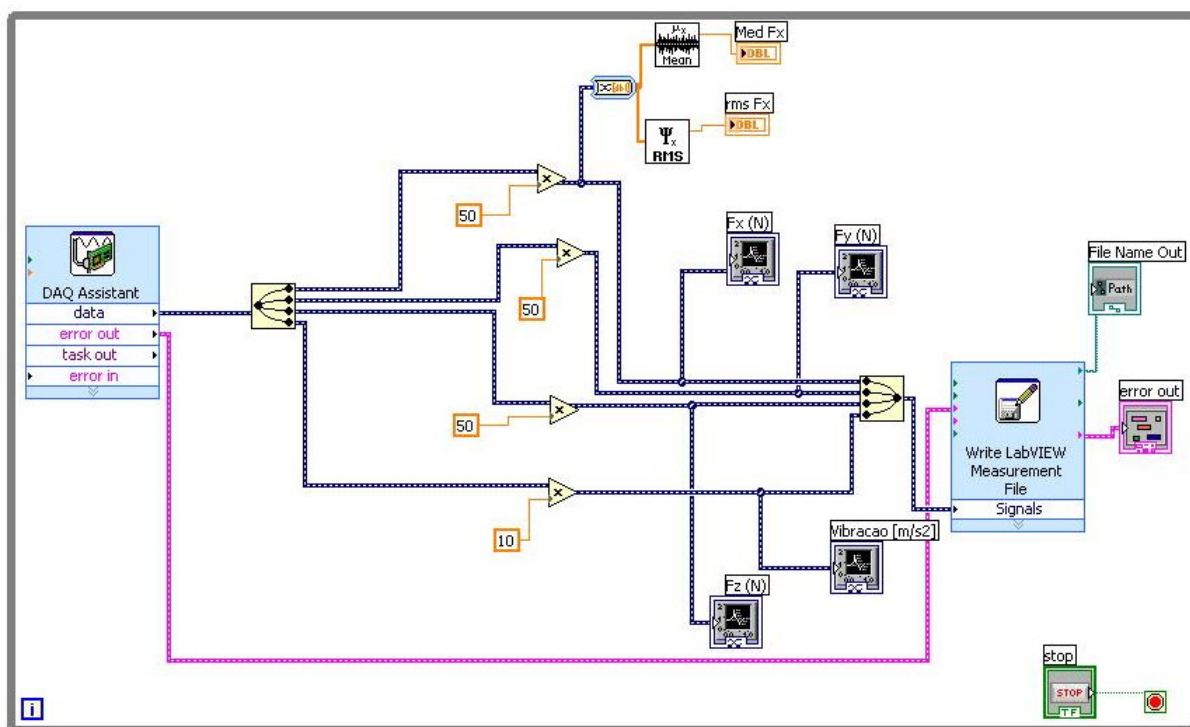


Figura 3.9 – Diagrama de blocos utilizado no LabVIEW®

Para maior confiabilidade e rigor científico, os ensaios apresentados na Tabela 3.3 foram realizados 3 vezes para a barra de mandrilar e 2 vezes para o mandril hidromecânico.

3.8 – Análise da qualidade dos furos

3.8.1 – Circularímetro

Os principais parâmetros de avaliação da qualidade da superfície usinada, neste trabalho, são os desvios de circularidade e de cilindricidade. Para este fim, foi utilizado um circularímetro Taylor-Hobson, modelo Talyrond 131, disponível no Laboratório de Metrologia da Universidade Federal de Uberlândia. A resolução deste equipamento é de 0,01 μm e sua capacidade máxima de medição é de 370 mm para diâmetro e 225 mm para altura.

Devido às dimensões da peça em estudo, 5 mm de diâmetro e 44 mm de comprimento, foi necessária a utilização de um apalpador especial, mostrado na Figura 3.10, com haste longa e esfera de 0,8 mm de diâmetro na ponta.

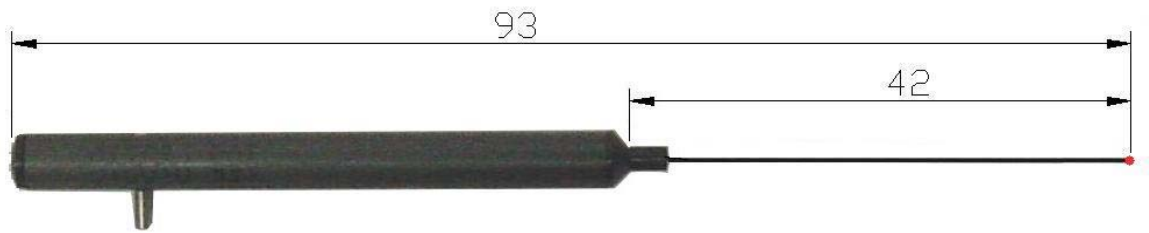


Figura 3.10 – Apalpador especial para o circularímetro

As medições de circularidade foram feitas na direção vertical, de cima para baixo. A altura inicial foi de 42 mm e a final de 7 mm, com uma nova leitura a cada 5 mm, totalizando oito planos de medições, conforme o desenho da Figura 3.11. Durante a medição da cilindridade o procedimento era basicamente o mesmo, só que iniciava-se na parte inferior da peça, nas alturas de 4, 5 e 6 mm, e finalizava na parte superior, nas alturas de 39, 40 e 41 mm.

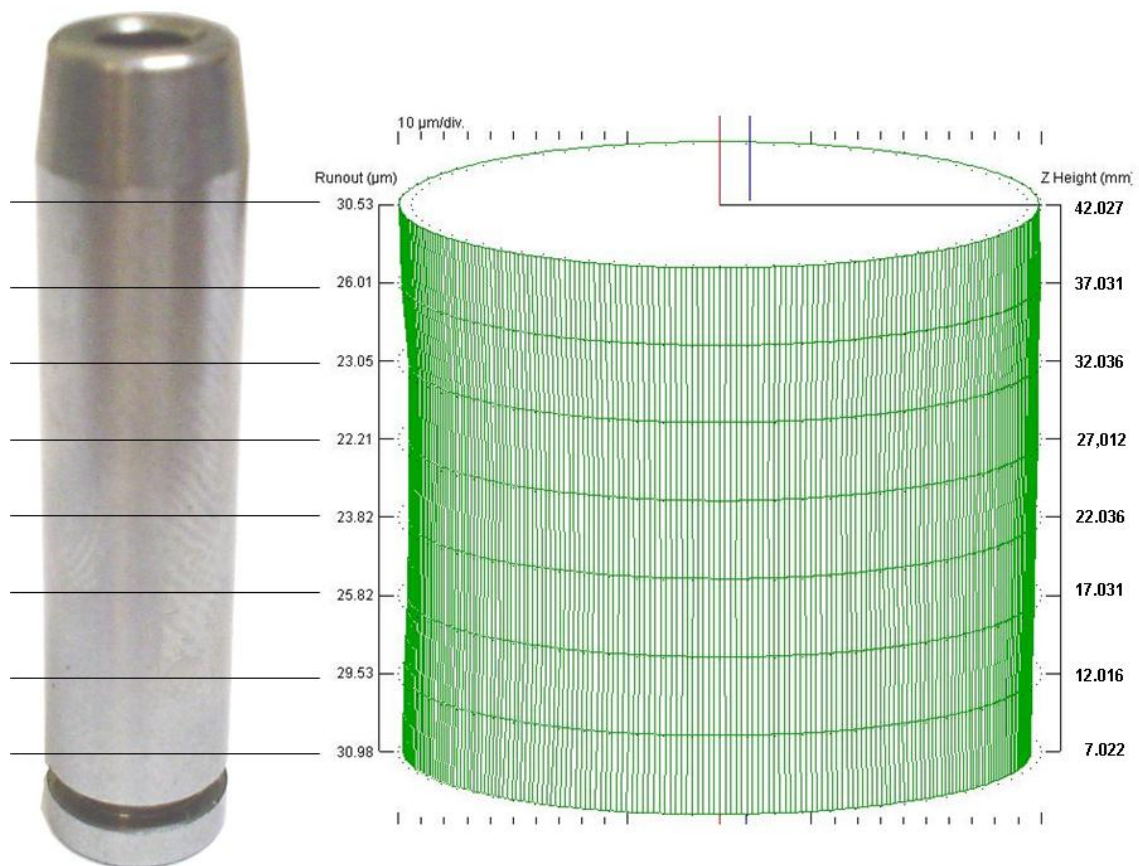


Figura 3.11 – Planos para medição de circularidade e cilindridade.

Da forma como as medições foram conduzidas, foi possível avaliar 35 dos 44 mm da peça, ficando aproximadamente 5 mm na parte superior sem que fosse realizada nenhuma medição. Esta situação foi criada de forma proposital, pois o fornecedor do material recomenda que as análises ignorem 5 mm de cada borda do material.

3.8.2 – Medição da rugosidade superficial

Uma das propostas deste trabalho é verificar alguns parâmetros de rugosidade superficial. Para que este estudo pudesse ser realizado na parte interna das peças usinadas, estas tiveram de ser seccionadas. A Figura 3.12a mostra o esquema de um suporte que foi confeccionado para que as guias pudessem ser cortadas na posição desejada, quando fixadas à máquina de corte. A Figura 3.12b mostra uma guia após o corte.

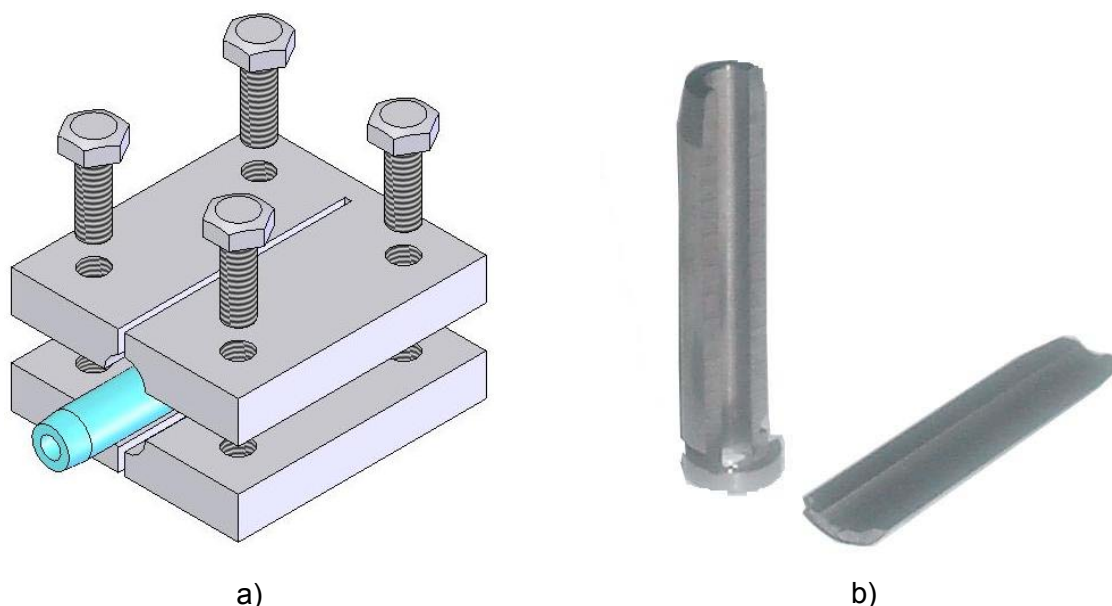
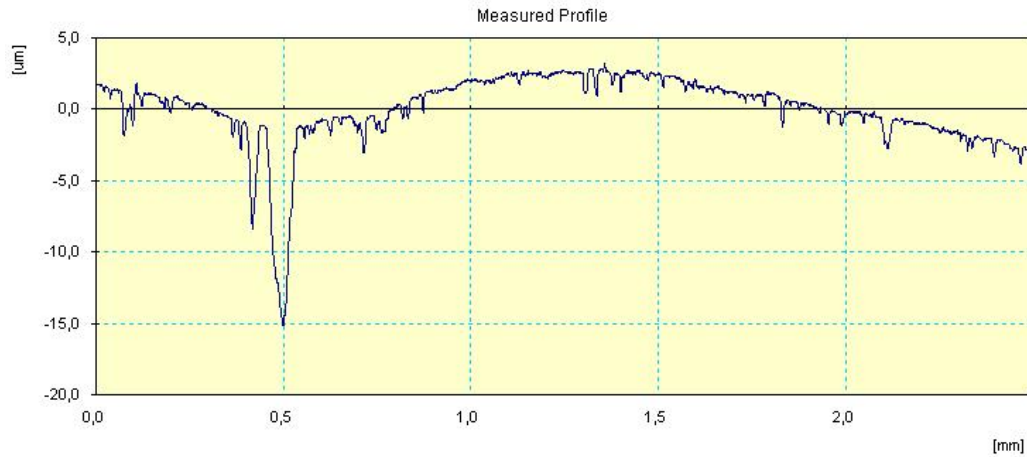


Figura 3.12 – Corte da guia para estudo da rugosidade: a) Dispositivo de fixação para corte; b) Guia após o corte.

O rugosímetro portátil da marca Mitutoyo, modelo SJ201P, foi utilizado nas medições de rugosidade. Este equipamento pode ser utilizado de forma independente ou conectado a um computador. Quando usado de forma independente o usuário deve selecionar o parâmetro de rugosidade de seu interesse, a unidade desejada (polegada ou milímetro), *cut-off* e outras configurações.

Quando esse instrumento é conectado ao computador, o usuário pode fazer todas as configurações por meio deste. Após a leitura do perfil, é gravado um arquivo com as informações adquiridas. O programa que acompanha o rugosímetro calcula, de forma automática, alguns parâmetros de rugosidade e mostra o perfil adquirido, conforme

mostrado na Figura 3.13. O usuário pode utilizar o arquivo que contém o perfil adquirido para calcular parâmetros não fornecidos.

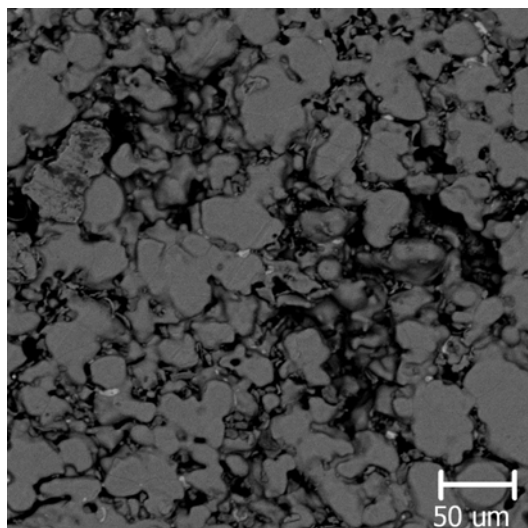


a)

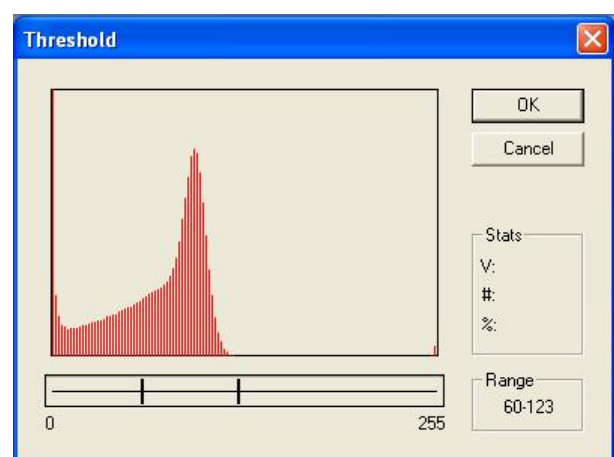
Figura 3.13 – Perfil de rugosidade de uma das guias de válvulas

3.9 – Análise de porosidade através de imagens

Para quantificar a quantidade de poros existente no material, foram utilizadas imagens obtidas com um Microscópio Eletrônico de Varredura - MEV, existente no Laboratório de Tribologia e Materiais na Universidade Federal de Uberlândia.



a)



b)

Figura 3.14 – Estudo da porosidade: a) Imagem para estudo; b) calibração do programa

Na análise das imagens, foi utilizado um programa chamado ImageTool[®]. O procedimento de análise começa com uma imagem semelhante à mostrada na Figura 3.14a, obtida com o uso do MEV. No ImageTool[®] a imagem obrigatoriamente deve estar no padrão de tons de cinza. Com isto a cor branca será identificada pelo número 255 e a cor preta pelo número zero. Na Figura 3.14b é mostrado um gráfico que mostra o quanto uma tonalidade está presente na imagem. O usuário seleciona uma faixa de tons que identifica a área que se deseja estudar. Nas imagens estudadas os tons que melhor representaram os poros estavam na faixa de 60 a 120.

Para que o usuário saiba o que está sendo selecionado, o programa substitui os tons selecionados pela cor vermelha, conforme mostrado na Figura 3.15a.

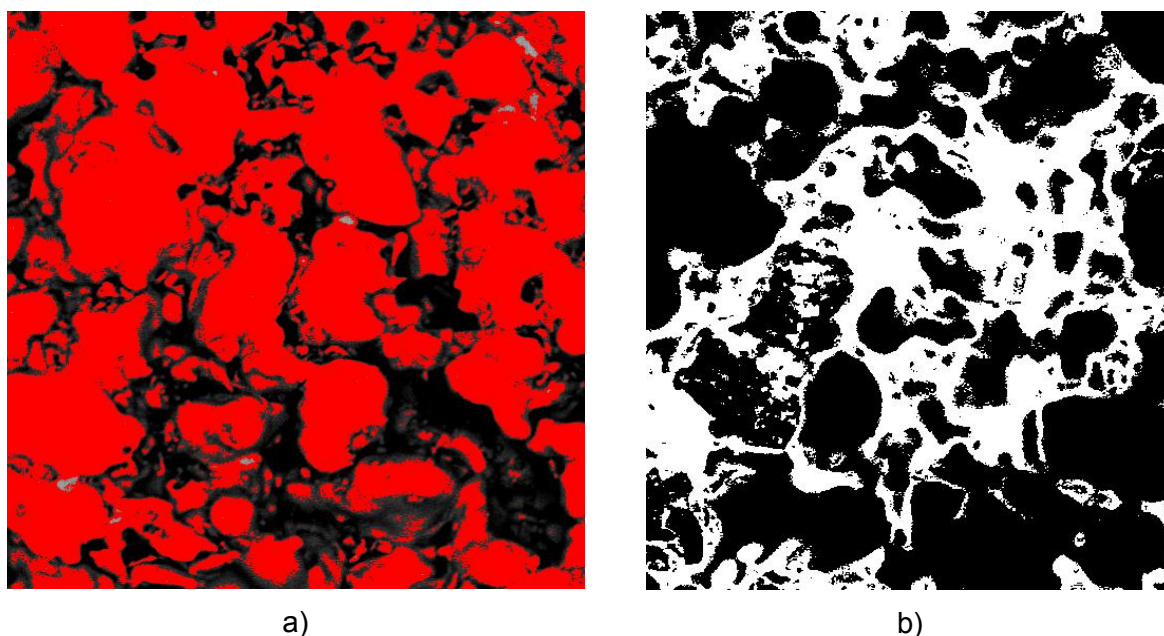


Figura 3.15 – Análise das imagens do MEV no ImageTool: a) Áreas dos tons selecionados; b) Imagem em preto e branco

Após a identificação do que será considerado como poro e o que será considerado material, a imagem é convertida para um padrão binário, onde só existem as cores, branco e preto, conforme mostrado na Figura 3.15b. Finalmente é realizada uma contagem de quantos pontos brancos e quantos pontos pretos existem na figura, permitindo saber qual porcentagem de cada uma das duas cores.

CAPÍTULO IV

RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 – Considerações Iniciais

Os ensaios foram realizados de acordo com a Tabela 3.3 e para caracterizar bem a superfície resultante do alargamento, foram realizadas oito medições de circularidade, em planos equidistantes. Os dados obtidos em todos os ensaios de alargamento estão nos apêndices da dissertação. Neste capítulo são mostrados os valores médios de todas as medições realizadas.

O planejamento estatístico para os experimentos e a análise dos resultados foram realizados com auxílio do programa Statística[®]. Conforme foi comentado no segundo capítulo deste trabalho, o planejamento Taguchi possui algumas formas de otimização, baseada na relação sinal/ruído. O método escolhido foi o “quanto menor melhor”, que é calculado pela Tabela 2.1.

Os valores expostos em alguns gráficos são resultados de um logaritmo, podendo possuir valores positivos e negativos, necessitando de uma atenção extra por parte do leitor. O valor ideal é obtido quando a solução for igual a zero. Como este fato não ocorre neste trabalho, os melhores valores encontrados são os que estão mais próximos de zero.

4.2 – Caracterização do material da guia de válvula

Devida à pequena remoção de material e a necessidade de uma remoção uniforme no alargamento, os furos iniciais produzidos por brocas ou outros processos de furação, devem ter circularidade, retitude e acabamento superficial regulares, como citado por Schroeter (1989). Alargadores tendem a seguir a linha de centro dos furos já existentes.

Com base neste fato, foram selecionados cinco amostras, de forma aleatória, e seus desvios de circularidade e cilindridade foram mensurados. Os valores obtidos são mostrados na Tabela 4.1.

Na linha de produção os desvios de circularidade e de cilindridade não devem ser superiores a 9 μm . As amostras apresentaram desvios médios de circularidade geralmente inferiores aos admitidos na linha de produção. O mesmo não ocorre com os desvios de

cilindricidade, seus valores apresentaram grande variação, além de geralmente ficarem acima do valor máximo admitido.

Tabela 4.1 – Desvios de circularidade e cilindridade nas guias em bruto

	Circularidade (μm)								Média	Cilindricidade (μm)			Média
Bruto-01	5,95	5,75	5,35	4,97	3,41	4,45	8,44	8,97	5,91	15,96	15,84	16,70	16,16
Bruto-02	5,52	2,89	2,30	6,82	2,64	4,27	3,52	4,33	4,03	9,72	13,63	13,32	12,22
Bruto-03	6,31	5,80	6,28	7,23	6,78	7,90	10,93	9,87	7,63	16,02	19,43	16,34	17,26
Bruto-04	6,66	9,67	8,92	6,59	5,79	6,60	6,79	6,81	7,22	19,58	22,22	20,79	20,86
Bruto-05	5,23	6,05	4,68	5,08	3,96	5,35	5,14	5,98	5,18	9,18	9,61	9,84	9,54

A Figura 4.1 mostra o resultado de uma das medições de desvios de cilindridade realizada em uma das guias ainda em bruto. Do lado direito existe uma escala com oito alturas, onde foram realizadas as medidas de circularidade para obtenção do desvio de cilindridade. Deste modo, foi possível avaliar 35 mm do comprimento da guia. Na escala do lado esquerdo, é mostrado o batimento radial (*runout*) daquele plano. Este valor indica o quanto que os círculos que descrevem a cilindridade estão deslocados em relação ao eixo de rotação da mesa do circularímetro. Pequenos batimentos radiais são compensados matematicamente pelo programa utilizado no equipamento não afetam os resultados de cilindridade.

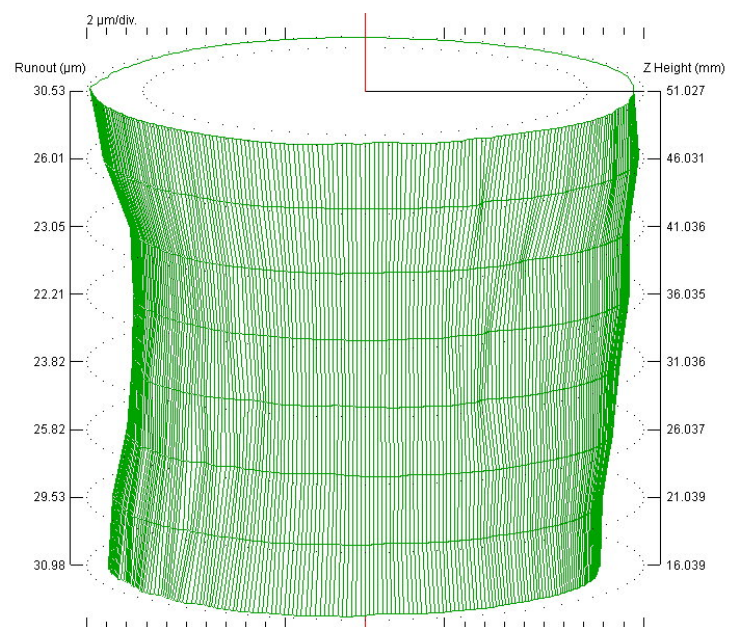


Figura 4.1 – Desvio de cilindridade das guias de válvula ainda em bruto

Durante as medições, foi observado que existe um desvio de cilindridade no furo a ser alargado, conferindo-lhe um perfil na forma de “C”, que se mostrou presente na guia

mesmo depois de realizado o alargamento, confirmando a afirmação de Schroeter(1989) sobre os alargadores seguirem a linha de centro do furo já existente.

Foi notado que quando a curvatura do furo aumenta, ocorre um incremento no valor do desvio de cilindricidade das guias de válvula alargadas.

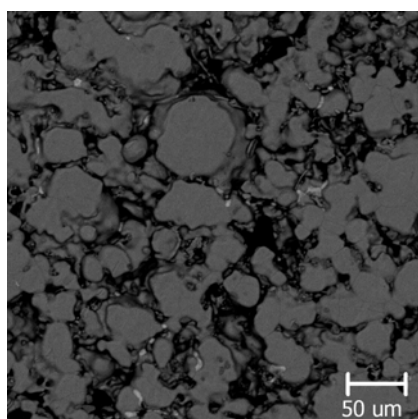
4.2.1 – Análise de Porosidade do material em bruto

Com base nas imagens mostradas na Figura 4.2 e outras obtidas por meio de um Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV), foi realizada a estimativa da porosidade do material no programa ImageTool[®]. Os valores que representam a área ocupada por poros são mostrados na Tabela 4.2.

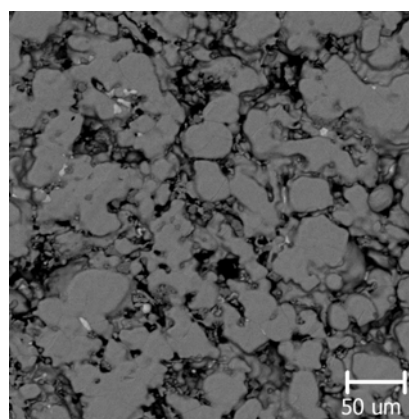
De acordo como os dados contidos na Tabela 3.1, as amostras podem ter variação de até 5% na densidade. Como esta característica está diretamente ligada à quantidade de poros existente no material, este valor foi adotado como a máxima variação de poros no material.

Tabela 4.2 – Valores de porosidade do material em bruto (em porcentagem).

Amostra 01	Amostra 02	Amostra 03	Amostra 04	Média	Desvio Padrão
37,9	40,8	37,6	39,5	38,0	1,5



a)



b)

Figura 4.2 – Imagens obtidas no MEV

Segundo os valores contidos na Tabela 4.2, o material da peça possui um grau de porosidade de 38%, com desvio padrão de 1,5 e está de acordo com a máxima variação admitida, que é de 5%. Portanto, a variação na porosidade não será levada em conta na avaliação dos resultados provenientes da usinagem.

Apesar dos valores encontrados indicarem que as amostras possuem pequena variação na quantidade de poros, a técnica utilizada é passível de erros, pois o processo de calibração do programa de análise de imagens depende do bom senso e experiência do operador.

4.2.2 – Dureza do material

Os valores resultantes da medição de dureza do material são mostrados na Tabela 4.3. Foram selecionadas três amostras, onde foram realizadas cinco identificações em cada. A dureza média foi de 74 HRB, com desvio padrão de 4 HRB, o que representa uma variação de 5%.

Na última coluna da Tabela 4.3 é mostrado o resultado do erro tipo 1, executado conforme descrito por Guedes (2004). Este cálculo foi realizado com o intuito de mostrar que o número de identificações era suficiente para caracterizar a dureza do material.

Tabela 4.3 – Dureza do material (HRB)

Amostras	Ensaio					Média	Desvio Padrão	Geral		Erro tipo 1 Nº Medições necessárias
	1	2	3	4	5			Média	Desvio Padrão	
1	68	70	67	70	67	68	1,5	74	4	6
2	76	77	76	76	77	76	0,6			1
3	77	76	76	77	76	76	0,6			1

4.2.3 – Cavacos resultantes da usinagem

A Figura 4.3 mostra que o cavaco resultante do processo é do tipo descontínuo e possui forma de lascas soltas, o que é bom porque não afeta a produtividade do processo e não há tendência do cavaco ficar preso entre o alargador e o furo, o que poderia danificar a superfície usinada.

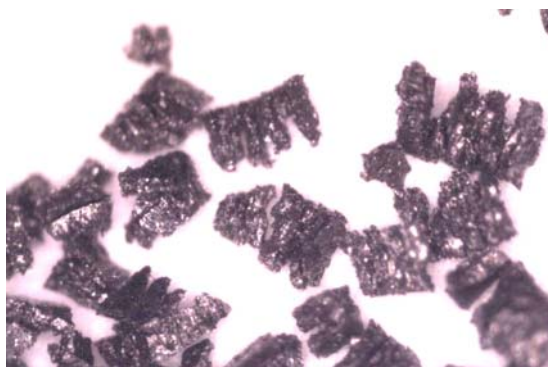


Figura 4.3 – Cavacos resultantes do alargamento

4.3 – Influência do método de fixação

Durante a fase de preparação dos ensaios não se sabia qual seria o método de fixação mais adequado, o que levou à utilização de um mandril hidro-mecânico no primeiro conjunto de ensaios. Posteriormente, durante visita técnica ao fornecedor dos alargadores, o método de fixação foi considerado inadequado por não permitir a correção do batimento radial do alargador. Então foi adotado o segundo método, denominado barra de mandrilar, que é utilizado na linha de produção e que possui parafusos para ajuste do batimento radial do alargador.

Realizada a alteração, os ensaios foram refeitos e foi adicionada uma réplica para o segundo método. A comparação dos resultados obtidos, na primeira fase dos testes realizados, com os dois métodos de fixação, foram denominados de dados da 1ª etapa. Na Figura 4.4, observa-se que os desvios de circularidade foram menores quando se utilizou o primeiro método de fixação. Era esperado que os desvios de circularidade com o uso da barra de mandrilar fossem menores que os encontrados com o mandril hidro-mecânico, devido à possibilidade de correção do batimento radial do alargador.

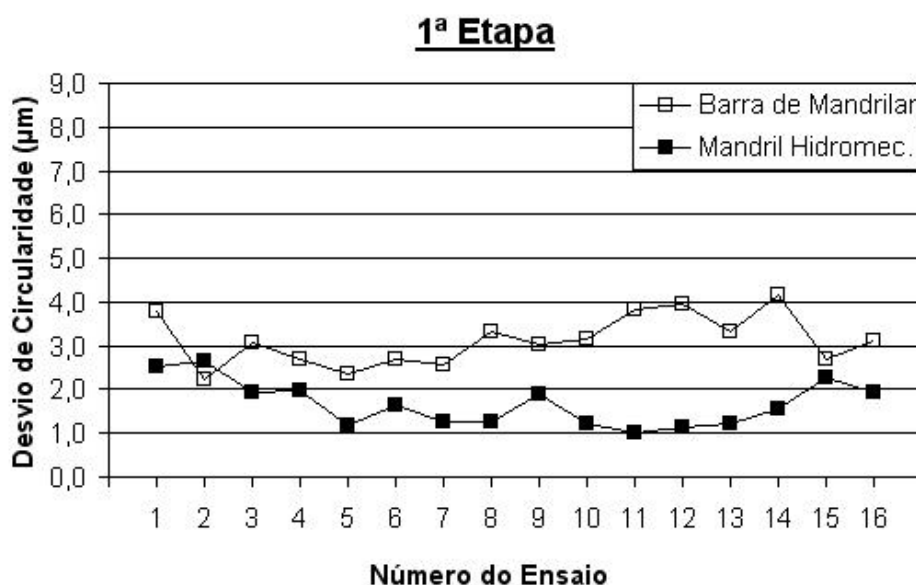


Figura 4.4 – Valores de circularidade obtidos na primeira etapa.

Com intuito de confirmar os resultados obtidos, foi realizada uma segunda etapa de ensaios, onde todos os ensaios, com os dois métodos de fixação, foram replicados. Conforme mostrado na Tabela 4.4, foram totalizados dois conjuntos de ensaios para o mandril hidro-mecânico e três para a barra de mandrilar.

Tabela 4.4 – Organização dos ensaios

1ª Etapa			2ª Etapa	
Mandril hidro-mecânico	Barra de mandrilar	Barra de mandrilar	Barra de mandrilar	Mandril hidro-mecânico

A Figura 4.5, apresenta os dados da segunda etapa, onde os valores de circularidade para os dois métodos sofreram um pequeno aumento, em relação aos dados da primeira etapa. Em 12 dos 16 testes, o mandril hidro-mecânico produziu menores desvios de circularidade que a barra de mandrilar. Parte deste resultado se deve ao fato de que o mandril hidro-mecânico possui fluido em seu interior, proporcionando um certo grau de amortecimento no sistema. As ondas mecânicas perdem energia quando passam de um meio sólido para um líquido.

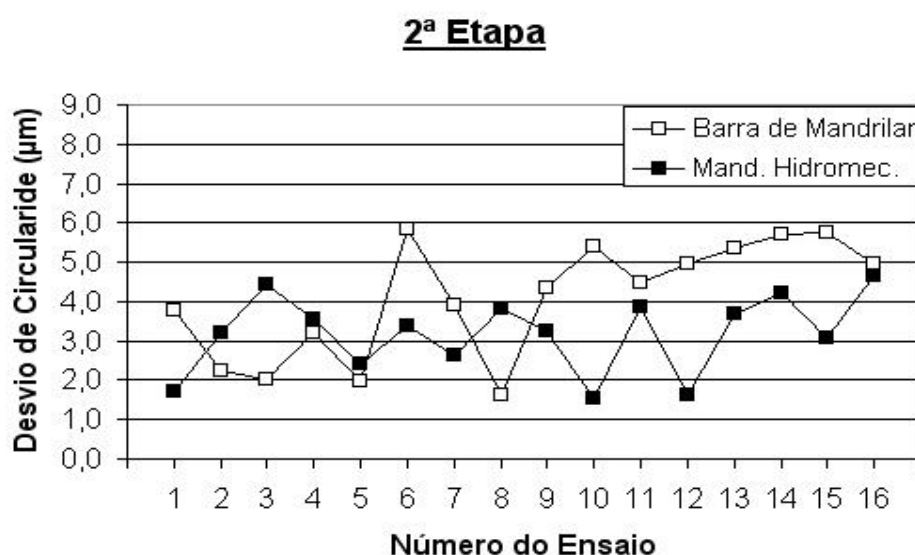


Figura 4.5 – Valores de circularidade obtidos na segunda etapa.

Quanto à utilização barra de mandrilar para os testes, a eficiência da fixação do alargador, na mesma, pode ser questionada. Nela existem seis parafusos para fixação do alargador. Quatro destes parafusos estão na parte inferior, dispostos a 90° uns dos outros, com a função de permitir o ajuste do batimento radial da ferramenta. Os outros dois parafusos estão na parte superior, dispostos a 180° um do outro, com a função de prender o alargador de modo que não se solte ou deslize. Entre os parafusos superiores e os inferiores existe um ângulo β , com valor pouco inferior a 45°, conforme mostra a vista superior na Fig. 4.6a.

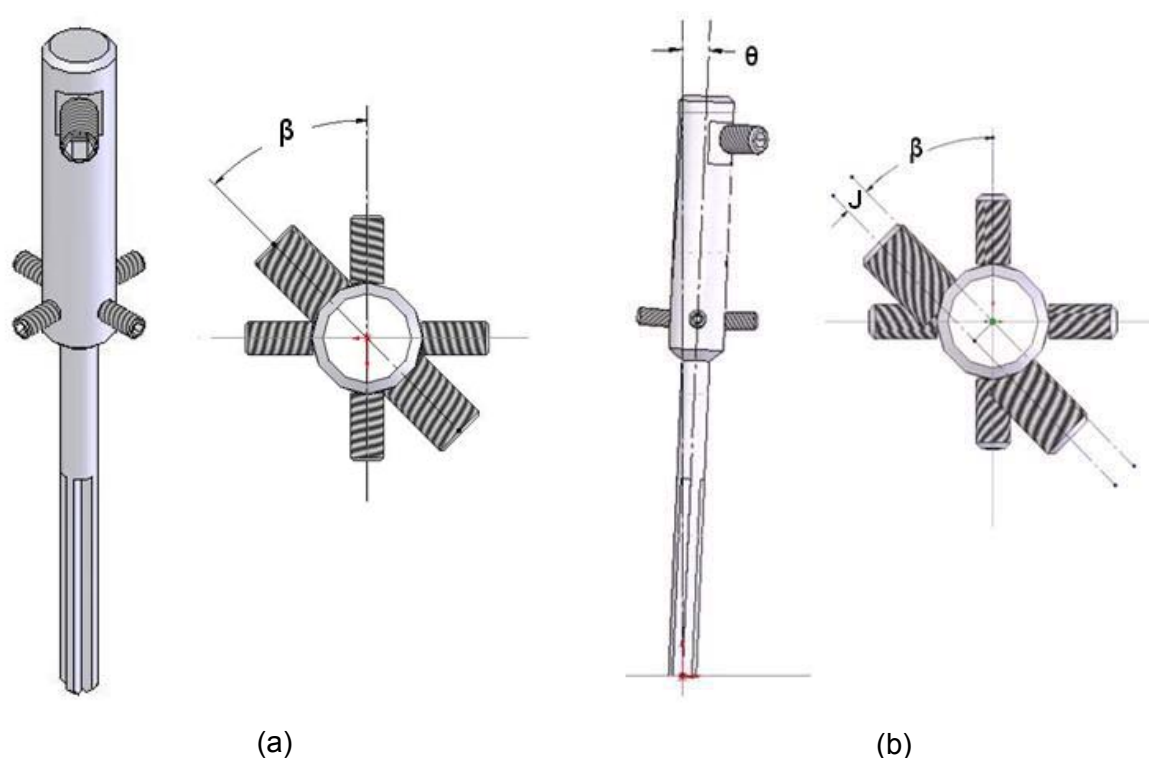


Figura 4.6 – Fixação do alargador na barra de mandrilar: a) sem deslocamento; b) com deslocamento

Nesta hipótese, os parafusos de fixação não foram capazes de manter a rigidez da fixação, permitindo um deslocamento angular “ θ ” no eixo do alargador, como é mostrado na Figura 4.6b. Convertendo o deslocamento angular em um deslocamento linear “ J ”, verifica-se que para cada micron deslocado na parte superior, ocorre um erro na ponta do alargador igual a 2 microns, o que resulta em uma pequena oscilação da ponta da ferramenta, explicando o aumento dos desvios geométricos de circularidade e cilindridade.

Schroeter (1989) alargando alumínio aeronáutico com ferramentas de aresta única regulável fez uso de um suporte pendular. O jogo axial e radial proporcionado pelo pêndulo levou a piora da superfície do furo.

4.4 – Alargadores após o uso

A Figura 4.7 mostra um conjunto de imagens tiradas com o microscópio configurado para ampliação de 45 vezes. Foi notado que os alargadores de número 2, 3 e 4 apresentaram material aderido na quina da aresta de corte, mas não foi notado nenhum desgaste considerável. Santos (2004) alargou guias de válvulas automotivas e verificou a ocorrência de pequeno acúmulo de latão na quina do alargador de metal duro, entretanto não houve análise da influência deste acúmulo em seus resultados.

Na Figura 4.7d é mostrado o alargador número 4, com 6 arestas e piloto, onde é notada presença de poros próximos ao centro da ferramenta, mas não nas arestas de corte. Assim, os resultados obtidos com a usinagem não são influenciados por desgastes dos alargadores.

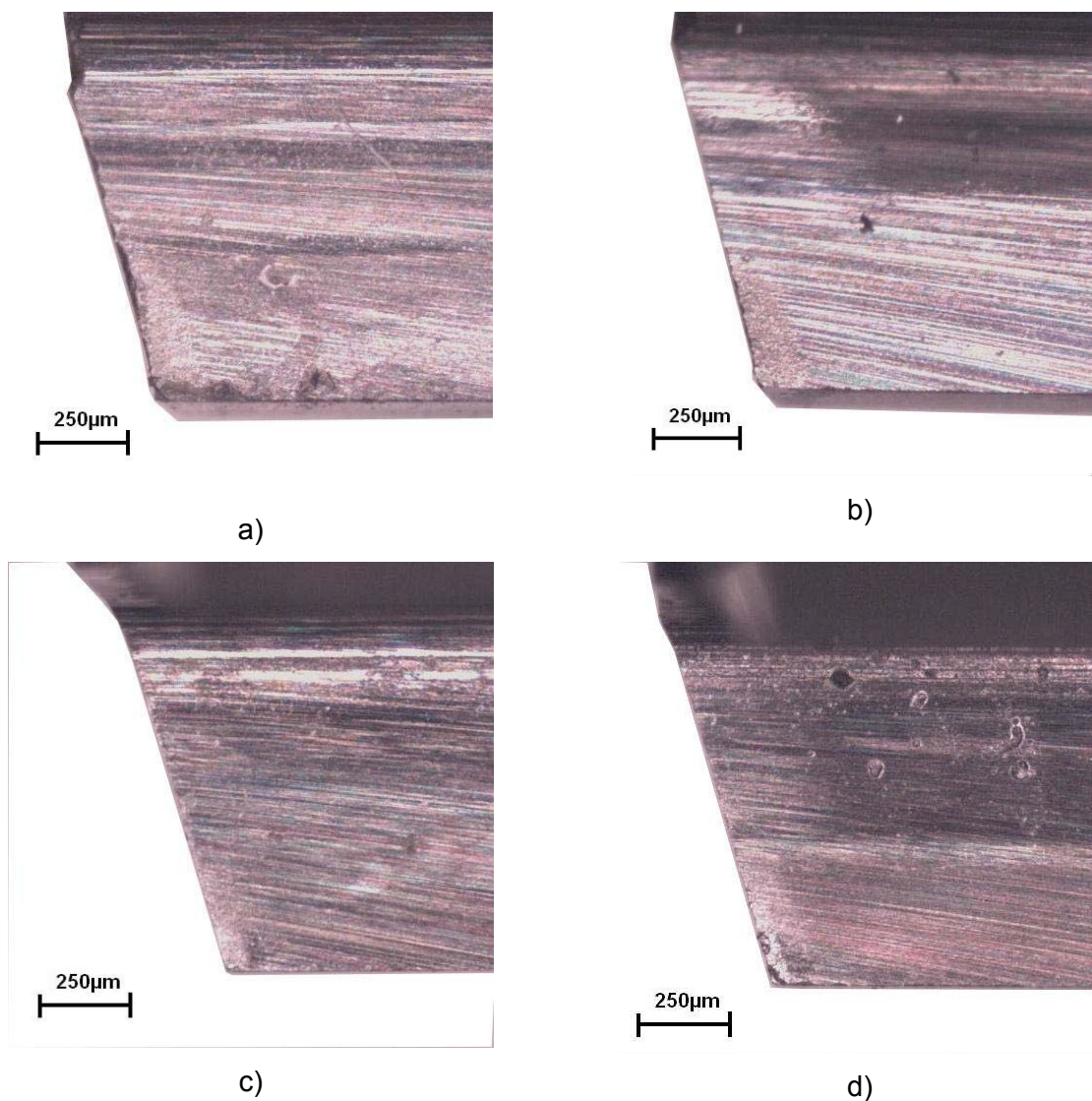


Figura 4.7 – Alargadores após o uso: a) N° 1 – 4 arestas e sem piloto; b) N° 2 – 6 arestas e sem piloto; c) N° 3 – 4 arestas e com piloto; d) N° 4 – 6 arestas e com piloto.

4.5 – Desvios de circularidade e cilindricidade

Na Tabela 4.5 é mostrado os valores médios calculados a partir dos ensaios da 1ª e 2ª etapa. De acordo com a penúltima linha da tabela, o mandril hidro-mecânico resultou em menores desvios de circularidade e cilindricidade. Nas Figuras 4.8 e 4.9 são mostrados os desvios geométricos para o mandril hidro-mecânico e para a barra de mandrilar. Em ambas

as figuras, a curva de desvios de cilindridade acompanha a de desvios de circularidade. A distância entre as curvas é de aproximadamente 4,6 μm para o primeiro método de fixação utilizado e de 3,9 μm para o segundo.

Tabela 4.5 – Desvios de cilindridade e circularidade (μm).

Ensaio	Barra de mandrilar		Mandril hidro-mecânico	
	Circularidade	Cilindridade	Circularidade	Cilindridade
1	3,78	7,98	2,11	6,14
2	2,24	6,41	2,92	6,33
3	2,56	6,97	3,17	7,29
4	2,95	7,50	2,77	6,13
5	2,17	6,87	1,80	5,05
6	4,26	8,61	2,52	5,88
7	3,23	7,10	1,96	5,94
8	2,47	6,65	2,55	6,29
9	3,70	8,69	2,58	7,97
10	4,27	9,45	1,37	4,53
11	4,14	8,89	2,44	5,47
12	4,48	8,95	1,39	4,80
13	4,35	9,16	2,45	7,32
14	4,92	9,64	2,87	7,13
15	4,23	9,51	2,68	6,93
16	4,03	9,18	3,31	8,06
Média	3,61	8,22	2,43	6,33
Desvio Padrão	0,85	1,10	0,55	1,03

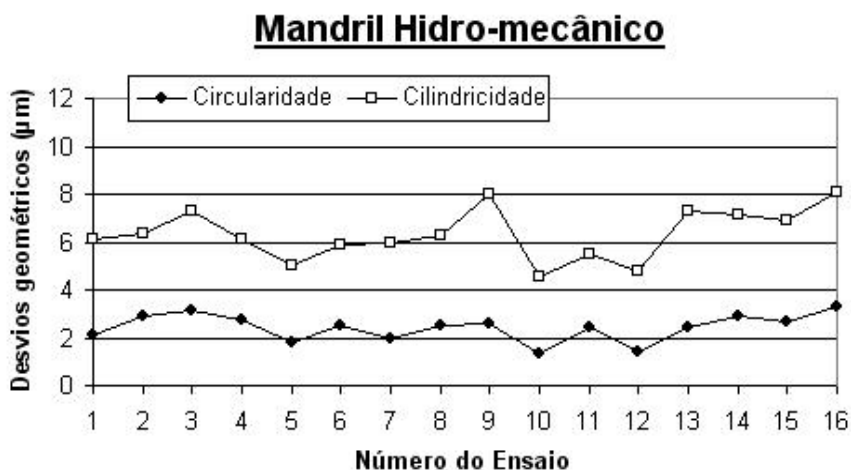


Figura 4.8 – Desvios de circularidade e cilindridade com mandril hidro-mecânico

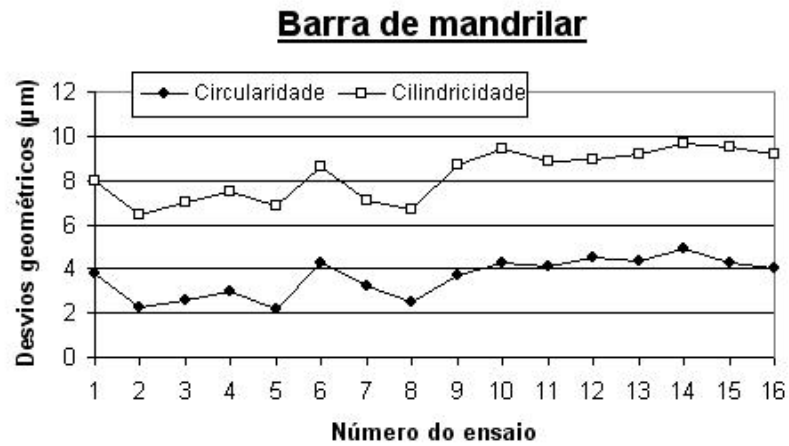


Figura 4.9 – Desvios de circularidade e cilindridade com a barra de mandrilar

Comparando os valores médios, os desvios de circularidade e cilindridade obtidos com a barra de mandrilar são de 48% e 30%, respectivamente, superiores aos obtidos com o mandril hidro-mecânico.

4.6 – Análise dos sinais adquiridos

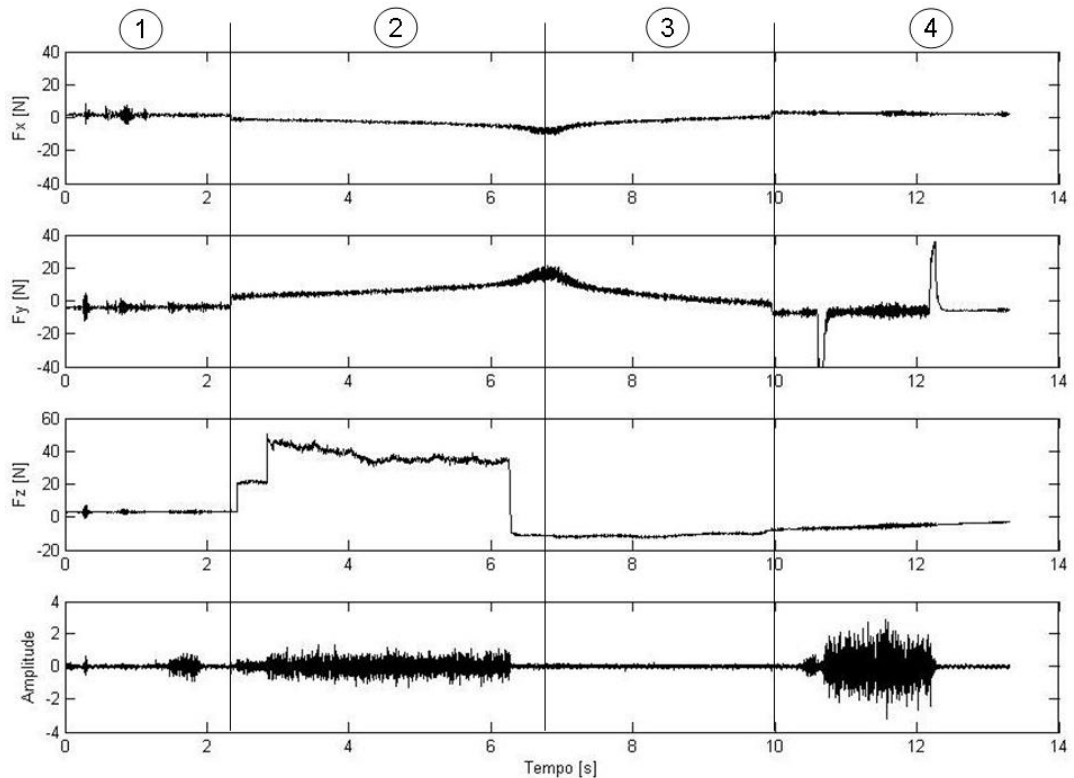


Figura 4.10 - Comportamento dos sinais adquiridos

Na Figura 4.10, pode-se observar o comportamento dos sinais de força e vibração adquiridos durante todo o processo de alargamento das guias de válvulas. Na região 1 do gráfico, a ferramenta de corte ainda não entrou em contato com a peça, somente movimentos da mesa do centro de usinagem. Na região 2 o alargador está usinando a guia. Na transição da região 2 para 3, o alargador pára de avançar, mas mantém sua rotação, e inicia o recuo (região 3) até sair da peça. Como o avanço de recuo foi deixado igual ao avanço de corte, as regiões 2 e 3 possuem o mesmo tamanho. Na região 4, somente a mesa da máquina se movimenta para a posição de troca da peça (guia de válvula).

As forças radiais X e Y teoricamente são nulas. Na prática alguns micrometros de desalinhamento entre a linha central do eixo-árvore e o eixo geométrico do alargador (batimento radial) produzem forças radiais, bem como erros de posicionamento. A tolerância para o batimento radial para esta operação é de 3 μm , erros maiores podem fazer com que o desvio de circularidade seja maior que 9 μm .

Weinert et al. (1998) destacam que uma pré-condição importante para o alargamento com elevada precisão de forma é que, com o primeiro contato do alargador com a borda da pré-furação, todas as arestas principais de corte estejam igualmente carregadas num corte contínuo. Na prática, porém, isto não pode ser totalmente obtido.

Observou-se que as forças nos eixos X e Y possuem formas bem semelhantes e com pequenas variações de amplitude. Em alguns ensaios as forças foram tão reduzidas que quase não se identifica o início e o fim do processo. Em todos os ensaios foi notada uma subida em degraus, independente do alargador e método de fixação utilizado. Nota-se que a queda na força Z não coincide com a transição da região 2 e 3. Isto ocorre porque foi definido que a ponta do alargador deveria passar 6 mm do comprimento da guia, para que a parte cônica, existente em algumas ferramentas, ficasse fora da peça após a usinagem.

4.6.1 – *Influência das forças nos eixos X e Y*

Conforme comentado anteriormente, as forças nos eixos X e Y (forças passivas) são causadas por desvios geométricos na guia ainda em bruto ou por falhas de posicionamento. Para verificar como os parâmetros de entrada interagem com as imperfeições foi realizada uma análise das forças de cada eixo, o que não produziu nenhum resultado satisfatório. Na tentativa de extrair algum resultado destas forças, foi calculada a força passiva resultante com base na somatória dos quadrados e extração da raiz.

Na análise de variância mostrada na Tabela 4.6 a variável de maior influência foi a geometria do alargador, com o valor de 75%. Este valor já é considerado baixo para os estatísticos que sempre recomendam o valor de 95%, porem para usinagem não existe um

consenso de qual seria o valor ideal. Para este trabalho, variáveis com significância inferior a 70% serão consideradas de baixa influência e portanto não são importantes nas análises.

De acordo com a Figura 4.11 a geometria de alargador que se mostrou menos sensível às variações do material em bruto, foi o de número 3 que possui 4 aresta e piloto (parte cônica). A velocidade de corte não possui um comportamento definido e a análise de variância indica que a faixa de velocidade testada não produz grandes interações com os desvios. O aumento do avanço faz com que sejam geradas maiores forças tangenciais no sistema.

Tabela 4.6 – Análise de variância para a força passiva resultante.

Fatores em estudo	P	Significância
Ferramenta (Tipo de Alargador)	0,243884	75,61%
Velocidade de corte	0,598223	40,18%
Avanço de corte	0,369658	63,03%

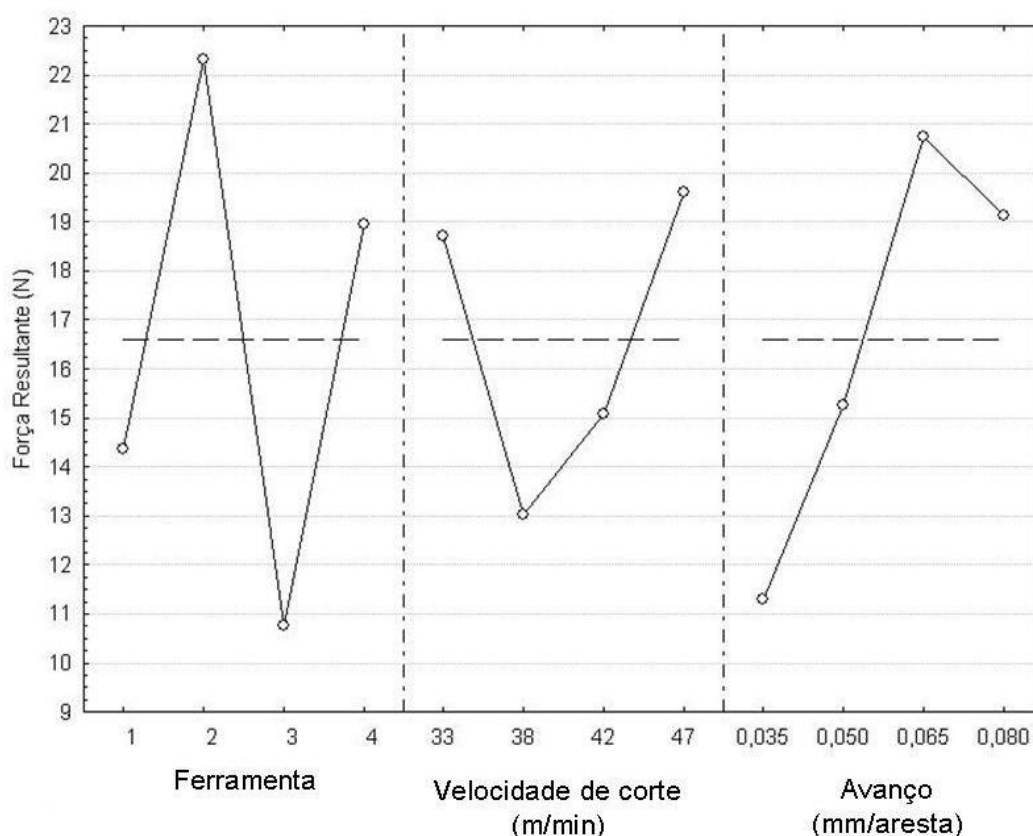


Figura 4.11 – Influência das variáveis sobre a força passiva resultante.

Schroeter (1989) e Eckhardt (1993) utilizaram alargadores de aresta única e não obtiveram resultados conclusivos sobre o a influência da velocidade de corte sobre as forças

de corte. O segundo autor observou que o aumento do avanço fez com que houvesse variações irregulares na força de avanço e aumento do torque.

No modelo mecânico baseado em falhas durante o processo de alargamento proposto por Bhattacharyya (2006), o aumento das forças radiais influenciam de forma direta os erros de forma do furo alargado.

4.6.2 – Influência da força no eixo Z

A força axial (F_z) é a mais importante no alargamento das guias. De acordo os valores da análise de variância contida na Tabela 4.7, existe uma boa correlação entre as variáveis independentes e a força axial.

Tabela 4.7 – Análise de variância para a força do eixo z.

Fatores em estudo	P	Significância
Ferramenta (Tipo de Alargador)	0,000003	100,00%
Velocidade de corte	0,30752	69,25%
Avanço de corte	0,000664	99,93%

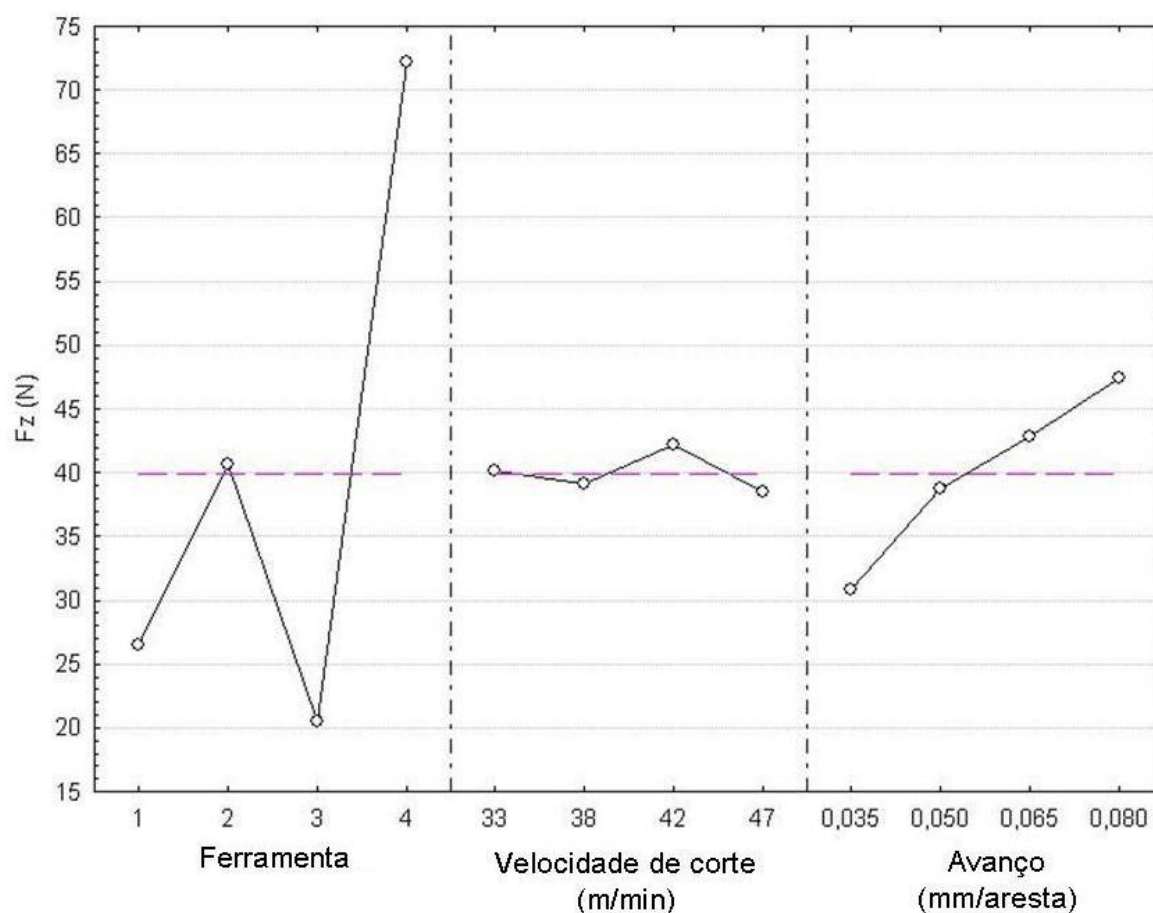


Figura 4.12 – Influência das variáveis sobre a força no eixo Z

Na Figura 4.12, é verificado como a mudança na geometria do alargador faz alterar a força axial. No primeiro gráfico, os alargadores com 4 arestas produziram menores valores de força axial. Devido a maior remoção de material, já era esperado que alargadores com 6 arestas de corte produzissem forças maiores, como ocorreu na segunda ferramenta, mas o piloto no início do quarto alargador fez a força axial fosse muito superior as demais. Os dados obtidos durante os ensaios e as imagens dos alargadores após o uso não foram suficientes para identificar este grande aumento de força.

Quanto à velocidade de corte, tanto a análise de variância como o gráfico mostram que seus efeitos sobre F_z são reduzidos. A terceira curva mostra claramente que a força F_z é diretamente proporcional ao avanço axial. O comportamento da força no eixo Z é reflexo do aumento de força necessária para se aumentar a remoção de material ou o avanço da ferramenta na peça.

4.6.3 – Influência das variáveis de corte sobre a vibração

Bezerra (1998) em seu trabalho, alargando furos de 12 mm de diâmetro em liga de alumínio silício, obteve grandes níveis de vibração. Além de serem audíveis durante o processo de alargamento, provocaram marcas nas superfícies usinadas. Entretanto, durante os ensaios necessários a este trabalho, foram observadas vibrações de pequena intensidade, ficando abaixo de $0,5 \text{ m/s}^2$. A Figura 4.13 mostra que as amplitudes de vibração são praticamente as mesmas para os dois métodos de fixação do alargador ao eixo-árvore.

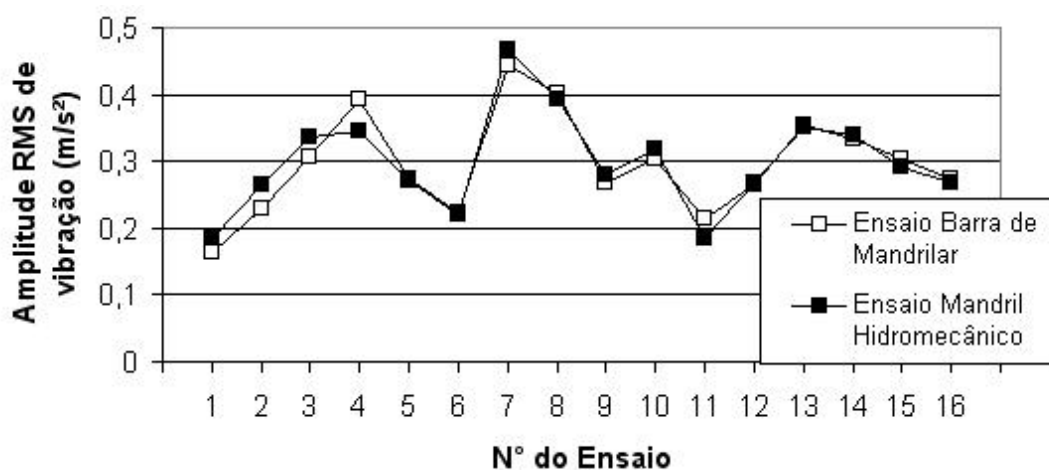


Figura 4.13 – Amplitude de vibração versus método de fixação.

De acordo com a análise de variância mostrada na Tabela 4.8, todas as variáveis independentes possuem grande valor de significância para o processo. Deste modo, todas estarão alterando os níveis de vibração do sistema.

Tabela 4.8 – Análise de variância para vibração

Fatores em estudo	P	Significância
Ferramenta (Tipo de Alargador)	0,021350	97,86%
Velocidade de corte	0,077662	92,23%
Avanço de corte	0,000278	99,97%

De acordo com a Figura 4.14, os alargadores 2 e 4 produziram maiores amplitudes de vibração. O fato de terem 6 arestas de corte fez com que possuísem mais pontos de contatos com o furo. Normalmente este fato é benéfico para o processo de alargamento, porem nas condições ensaiadas houve uma degradação da superfície usinada. Este evento pode ter ocorrido devido a maior interação do alargador (pontos de contatos) com as irregularidades (desvio de forma) da guia ainda em bruto. Observando os resultados das ferramentas 1 e 3, e depois 2 e 4, verifica-se que a presença do piloto na parte inicial do alargador diminui a amplitude de vibração do sistema em cerca de 8%.

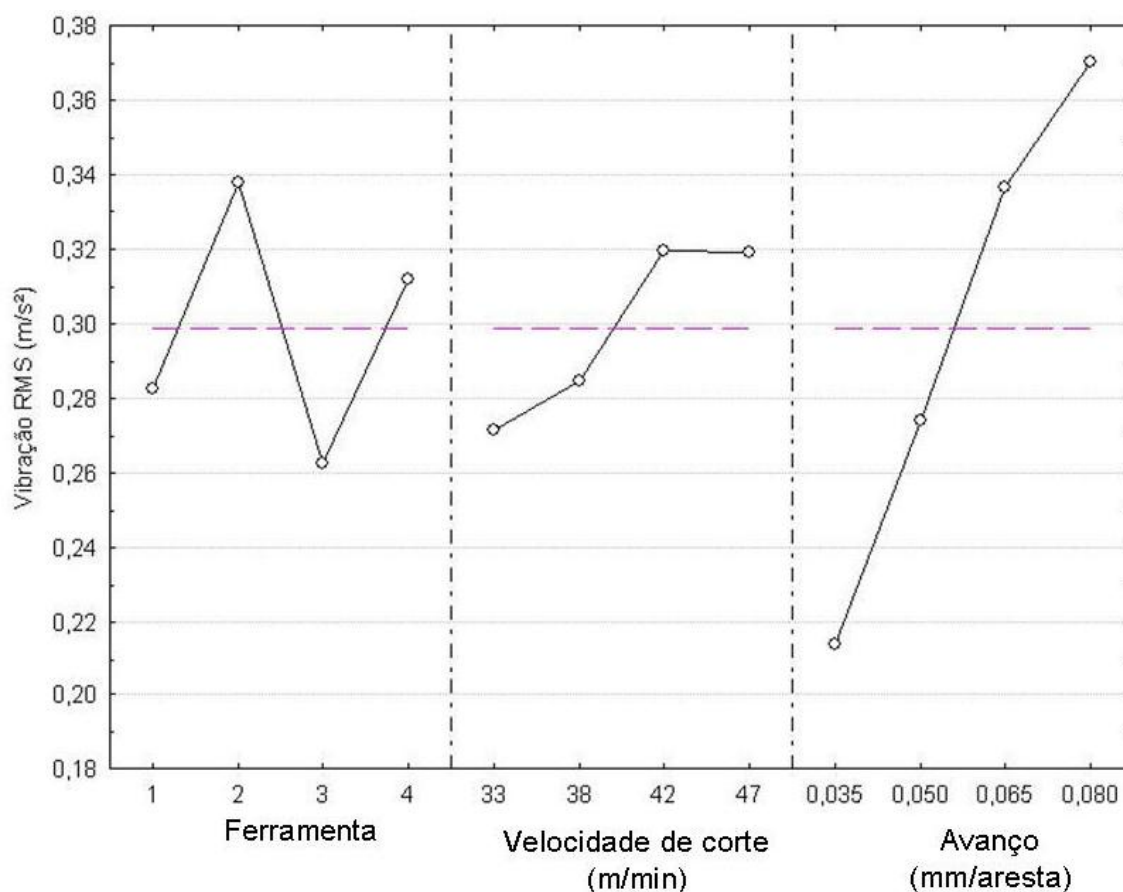


Figura 4.14 – Influência das variáveis de corte sobre a vibração usando mandril hidromecânico

O incremento da velocidade de corte fez aumentar a amplitude de vibração no processo. Bezerra (1998) observou que o aumento da velocidade de corte prejudicava a integridade superficial do furo. Ele esperava que o aumento da velocidade de corte até 80 m/min, fizesse reduzir ou desaparecer a APC. Mas o que ocorreu foi um aumento no diâmetro do furo, além do valor nominal, causado pelo aumento da vibração no sistema.

Quando o avanço foi incrementado de 0,035 para 0,080 mm/aresta, a força axial foi incrementada de 33 N para 49 N, fazendo com que a peça e todo conjunto de fixação fosse forçado contra a mesa da máquina-ferramenta. Pelo princípio da ação e reação, o alargador e o mandril de fixação também foram empurrados contra o eixo-árvore da máquina. Stemmer (1995) destaca que este aumento de força, em muitos casos, aumenta a estabilidade do processo. Porém, neste trabalho não foi observado este benefício. O aumento do avanço fez com que a força axial e a vibração fossem incrementadas.

4.7 - Influência das variáveis independentes sobre os desvios de circularidade e cilindricidade

4.7.1 – Desvio de circularidade utilizando mandril hidro-mecânico

De acordo com os valores apresentados na Tabela 4.9, a variável que apresentou maior influência sobre o desvio de circularidade foi a geometria do alargador, seguida pelo avanço. A velocidade de corte possui efeito desprezível.

Tabela 4.9 – Análise de variância para o desvio de circularidade com uso de mandril hidro-mecânico

Fatores em estudo	P	Significância
Ferramenta (Tipo de Alargador)	0,116941	88,31%
Velocidade de corte	0,861794	13,82%
Avanço de corte	0,260687	73,93%

Schroeter (1989) alargou furos de 12 mm em alumínio aeronáutico com ferramenta de aresta única e observou que a variável de maior influência sobre o desvio de circularidade foi o fluido de corte.

A Figura 4.15 mostra a influência das variáveis em estudo sobre o desvio de circularidade quando usou-se o mandril hidro-mecânico. A linha central representa o valor médio e as linhas tracejadas, representam duas vezes o desvio padrão. Vale alertar o leitor que a figura em questão foi tratada pela técnica de Taguchi, comentada nos capítulos anteriores e a presença de um sinal negativo antes do logaritmo fez com que o gráfico ficasse invertido. Assim os melhores valores estão próximos a zero, no topo do gráfico.

Foi verificado que a ferramenta 2 obteve melhor resultado que a ferramenta 1. Neste caso, o uso de 6 aresta de corte de corte reduziu o desvio de circularidade. Com a adição do piloto no início da aresta de corte é criada uma nova situação, onde o aumento do número de arestas de corte se torna prejudicial, como ocorrido na troca do alargador 3 pelo 4. Então, o alargador que não possui piloto tem seu desempenho melhorado com a adição de mais arestas de corte. Já os alargadores que possuem o piloto devem possuir 4 arestas de corte, que foi a melhor condição encontrada.

Os valores da análise de variância mostrados na Tabela 4.9 indicam que a variação proposta para a velocidade de corte não altera de forma significativa a resposta. Na Figura 4.15 é observada uma pequena tendência de aumento do desvio de circularidade com o aumento da velocidade de corte.

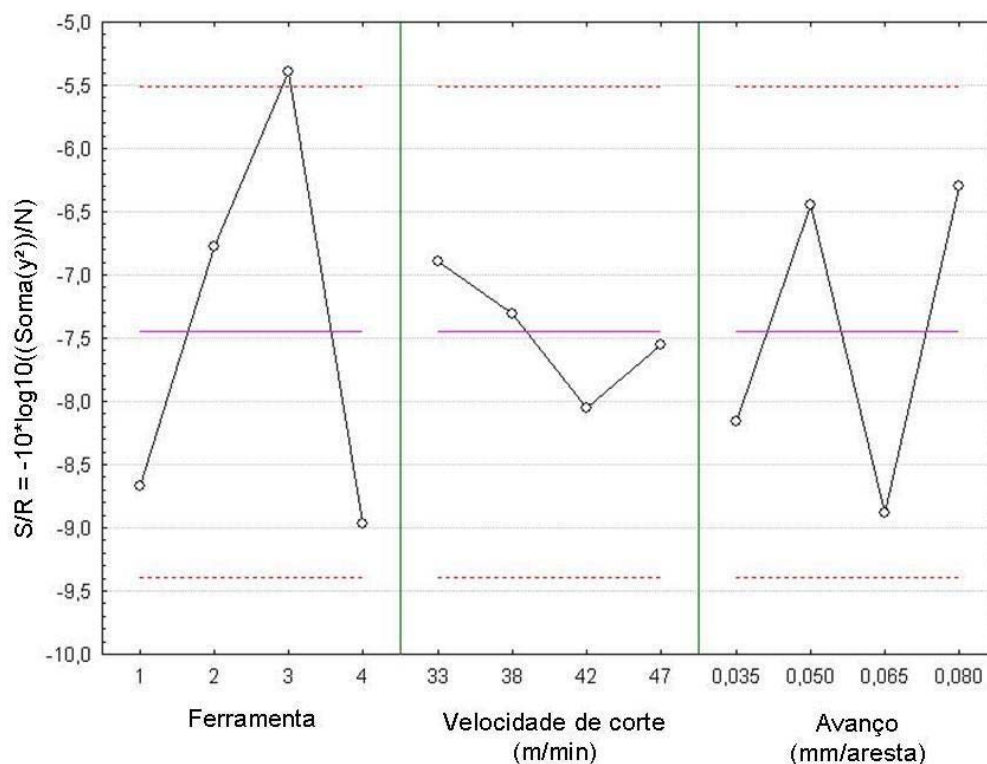


Figura 4.15 – Influência das variáveis sobre a circularidade utilizando o mandril hidro-mecânico.

Segundo Bezerra (1998), quando se tem um maior número de lâmina, para um mesmo guia cilíndrico, a área de contato entre o alargador e a parede do furo é maior, aumentando sua capacidade de acabamento. Porém, quando foram utilizados alargadores com maior quantidade de arestas de corte o avanço por volta foi mantido constante, fazendo com que a quantidade de material removido por cada aresta fosse reduzida. Portanto, a

melhora do acabamento é resultante da maior área de contado do alargador com o furo e a redução no volume de material que cada aresta remove em uma volta. O aumento do número de aresta de corte pode ser comparado com a redução do avanço neste trabalho.

Shunmugam e Somasundoram (1990) concluíram que baixas velocidades de corte resultam em menores desvios no diâmetro nominal, na circularidade e no acabamento superficial.

Almeida (2008), em sua investigação sobre o alargamento de ferro fundido com ferramenta revestida, comentou que o aumento da velocidade de corte realçava o batimento radial do alargador. A falta de tendência parece ser um bom resultado. Os níveis de vibrações são reduzidos, permitindo superfícies com menores desvios geométricos. O método de fixação parece ser bastante estável, não favorecendo o batimento radial do alargador. De qualquer forma, neste trabalho não há interesse em aumentar a velocidade de corte, pois o seu incremento resulta em redução no tempo de vida da ferramenta.

No último gráfico da Figura 4.15, tem-se uma grande deformação da curva de avanço quando foi utilizado 0,065 mm/aresta. Quando o avanço foi aumentado de 0,035 para 0,050 mm/aresta, houve uma boa redução no valor da circularidade, mas quando houve o segundo incremento o resultado foi o inverso, fazendo com que fosse obtido o maior erro de circularidade. Com o terceiro incremento foi obtido o menor desvio de circularidade, dentre todos os valores ensaiados. Este resultado é melhor comentado nos parágrafos seguintes, durante a análise dos desvios de cilindridade.

Bezerra (1998) constatou um pequeno valor de avanço faz com que o material seja esmagado contra a parede do furo, fazendo com que o desvio de circularidade seja incrementado. Avanços intermediários fazem com que o desvio seja diminuído, mas crescem novamente com altas taxas de avanço.

Passando para os desvios de cilindridade, a curva sofre uma pequena alteração, mas o resultado é praticamente o mesmo. Na Tabela 4.10 estão os dados da análise de variância para o desvio de cilindridade obtido com o uso do mandril hidro-mecânico. A ordem de significância das variáveis não foi alterada, mas os valores sim. A ferramenta obteve 90,59%, o avanço 79,98% e 24,61% para a velocidade de corte contra 88,31%, 73,93% e 13,82%, respectivamente, encontrado no desvio de circularidade, mostrando maior sensibilidade do desvio de cilindridade com relação às variáveis estudadas.

Tabela 4.10 – Análise de variância para a cilindridade com mandril hidro-mecânico

Fatores em estudo	P	Significância
Ferramenta (Tipo de Alargador)	0,094140	90,59%
Velocidade de corte	0,753915	24,61%
Avanço de corte	0,200237	79,98%

Na Figura 4.16, observa-se que as curvas são muito semelhantes às encontradas na Figura 4.15, com alteração apenas nos valores da relação sinal/ruído. Em ambas as figuras, o avanço de 0,065 mm/aresta fez com que houvesse um grande incremento nos desvios de circularidade e cilindridade, sendo um parâmetro de corte indesejável.

Para que se possa tentar entender a deformação que terceiro valor de avanço causou na curva do gráfico, deve-se primeiro olhar a Tabela 3.3. Nesta tabela, o valor de 0,065 mm/aresta aparece nos ensaios 3, 8, 9 e 14, o que elimina qualquer possibilidade de tendências do sistema. Outro fato interessante é que cada um dos ensaios citados foi realizado com uma ferramenta diferente, o que elimina uma possível falha no momento de fixar os alargadores, pois o efeito foi observado em todos alargadores.

Na Figura 4.17, os valores de desvios de circularidade obtidos nos ensaios da 1ª etapa são inferiores aos obtidos na 2ª etapa. Nos dados da 1ª etapa, o aumento do avanço faz reduzir o desvio circularidade. Na 2ª etapa o terceiro valor de avanço provocou uma deformação na curva. Caso este ponto seja desprezado, é observado que os desvios de cilindridade têm seu valor reduzido com o incremento do avanço. Esta tendência é encorajadora no sentido de que trabalhos futuros explorem maiores valores de avanço.

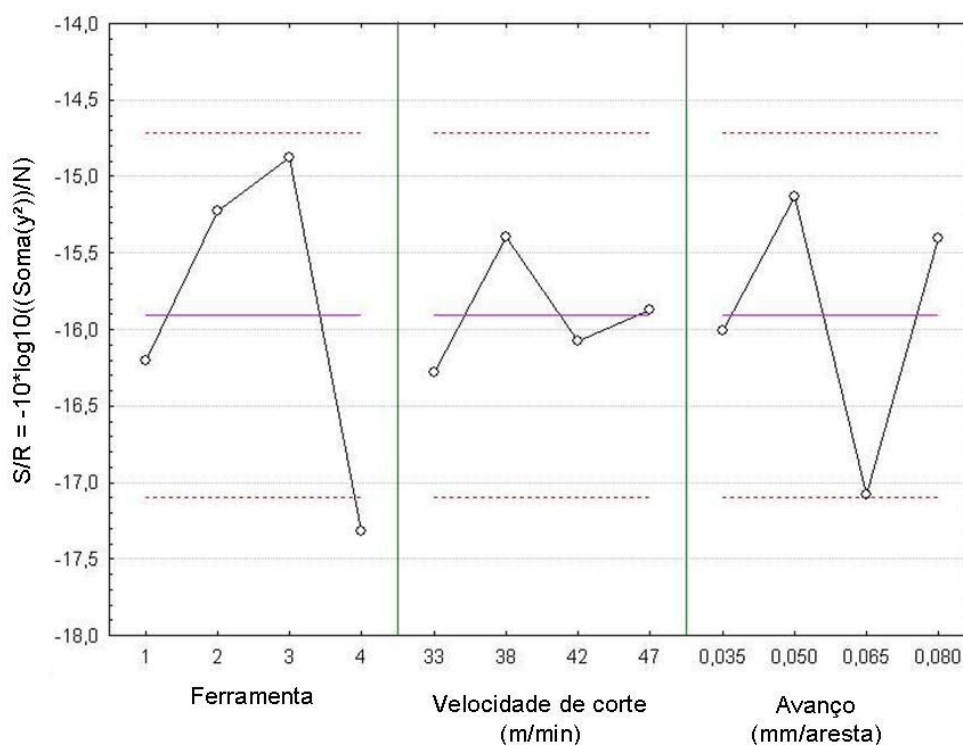


Figura 4.16 – Influência das variáveis sobre o desvio de cilindridade utilizando o mandril hidro-mecânico

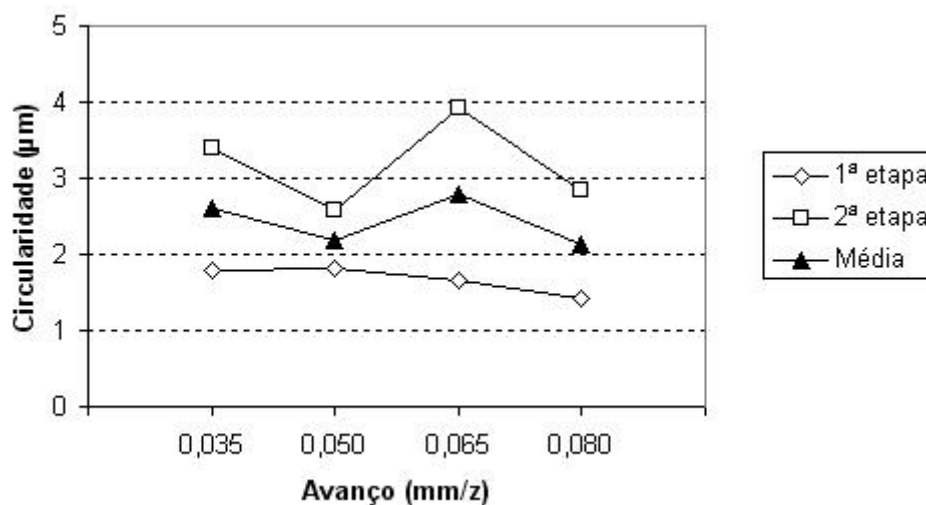


Figura 4.17 – Influência do avanço sobre a circularidade nos ensaios da 1ª e 2ª etapa

Após a conclusão dos ensaios os alargadores foram observados em um microscópio óptico com zoom de 45x. Não foram observados desgastes e nem lascamento, somente uma pequena região com material aderido. Diante disto, o avanço de 0,065 mm/aresta pode ter aumentado a adesão de material na aresta de corte, o que levou ao esmagamento do material no furo. Podendo ainda, ser reforçado com o sinal de material aderido na guia alisadora do segundo alargador. Outra possibilidade é o surgimento, de forma instável, de APC. Segundo Machado e Da Silva (2004) a APC surge na maioria dos aço em velocidades próximas a 40m/min. O seu surgimento explica o aumento no desvio de circularidade, mas como a velocidade de corte é próxima da necessária para seu surgimento em aço de baixo carbono, um pequeno incremento do avanço pode fazer com que a APC não se forme.

4.7.2 – Desvios de circularidade e cilindridade utilizando a barra de mandrilar

De acordo com os dados apresentados na Tabela 4.11, a ordem de influência das variáveis independentes não foi alterada, com o novo método de fixação. Com o uso da barra de mandrilar, a geometria do alargador obteve 95% de significância contra 88% do método anterior. Esta diferença mostra que a barra de mandrilar é mais sensível à geometria do alargador que o mandril hidro-mecânico, o que está de acordo com o maior valor de circularidade encontrado no segundo método de fixação.

Na Figura 4.18 foi notado um grande aumento nos desvios de circularidade, comparado ao primeiro método de fixação, para todas as condições ensaiadas. Os desvios praticamente dobraram seus valores. Os melhores resultados foram obtidos com os alargadores 1 e 2. O aumento do número de arestas de corte não produziu grande efeito na superfície resultante. Já a presença de piloto fez com que o alargador fosse guiado pelo furo

já existente na guia, o que diminuiu sua capacidade de gerar uma superfície de boa qualidade. Isto ajuda a reforçar a idéia de que os parafusos da barra de mandrilar não estão proporcionando a rigidez necessária ao processo.

Tabela 4.11 – Análise de variância para o desvio de circularidade com uso da barra de mandrilar.

Fatores em estudo	P	Significância
Ferramenta (Tipo de Alargador)	0,051186	94,88%
Velocidade de corte	0,876728	12,33%
Avanço de corte	0,363140	63,69%

Tanto a análise de variância como o comportamento da curva no gráfico, demonstra que a velocidade de corte foi pouco influente no desvio de circularidade.

Conforme a curva do terceiro gráfico, o avanço por aresta de corte deve estar na faixa de 0,050 a 0,065 mm/aresta, ficando de acordo com o valor de 0,060 mm/aresta recomendado pelo fabricante.

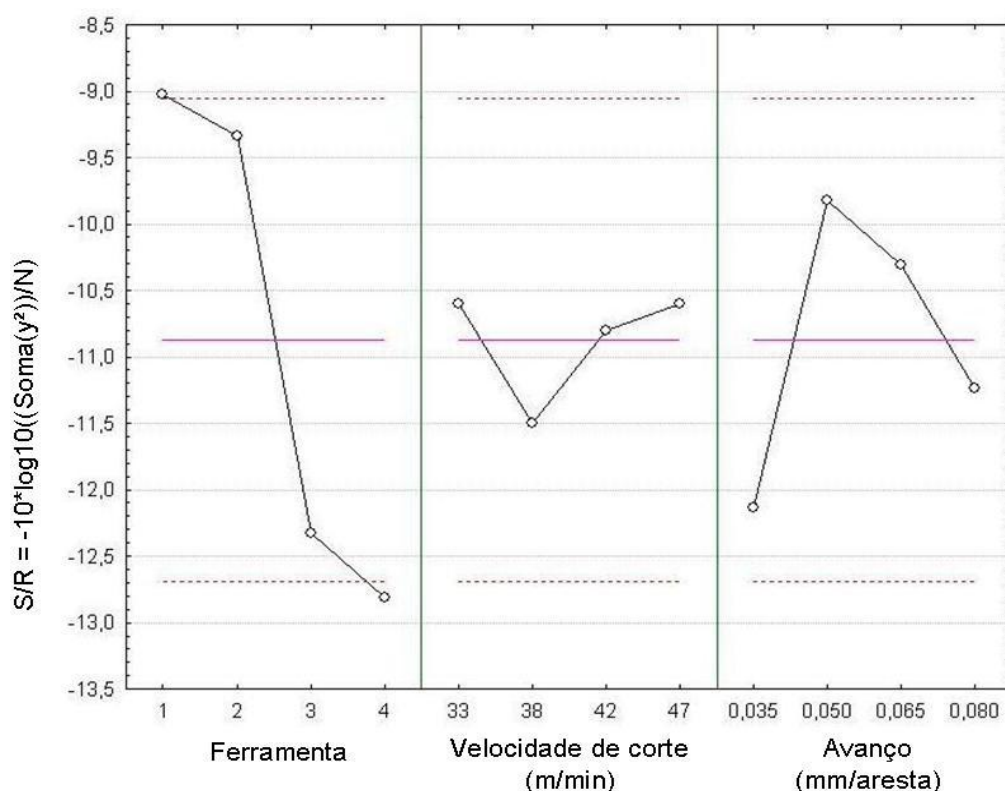


Figura 4.18 – Influência das variáveis sobre o desvio de circularidade, usando a barra de mandrilar

A análise de variância apresentada na Tabela 4.12 mostra que o desvio de cilindricidade foi, novamente, um pouco mais sensível às alterações nas variáveis independentes, com exceção apenas o avanço que teve sua influência reduzida. Na prática, as diferenças encontradas não são significantes.

Tabela 4.12 – Análise de variância para o desvio de cilindricidade com uso da barra de mandrilar.

Fatores em estudo	P	Significância
Ferramenta (Tipo de Alargador)	0,007001	99,30%
Velocidade de corte	0,819540	18,05%
Avanço de corte	0,371396	62,86%

Como já foi visto anteriormente, existe uma relação entre os desvios de circularidade e cilindricidade, onde o último sempre é maior. Analisando a Figura 4.19, verifica-se que os resultados apresentam as mesmas tendências encontradas na Fig. 4.18.

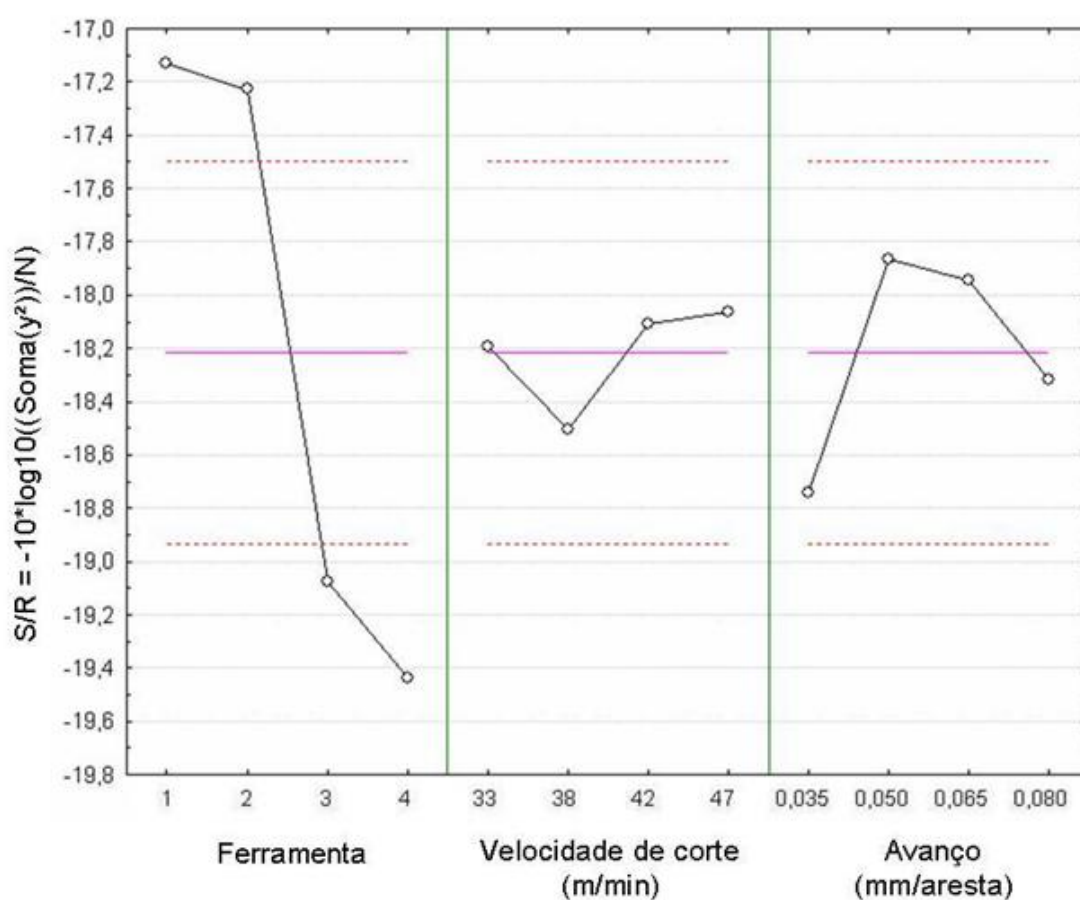


Figura 4.19 – Influência das variáveis sobre o desvio de cilindricidade, usando a barra de mandrilar

4.8 – Rugosidade

Para melhor caracterizar a rugosidade das amostras foram realizadas quatro medições em cada guia alargada. Dentre os parâmetros fornecidos pelo rugosímetro, o único apresentado neste trabalho é a rugosidade média. Os valores de Ra para os dois métodos de fixação são mostrados na Tabela 4.13.

Tabela 4.13 – Valores de Ra para os dois métodos de fixação (μm)

Ensaio	Mandril hidro-mecânico	Barra de mandrilar	Ensaio	Mandril hidro-mecânico	Barra de mandrilar
01	0,330	0,330	09	0,668	0,948
02	0,575	0,575	10	1,293	0,665
03	0,245	0,245	11	0,478	0,700
04	0,383	0,383	12	0,560	0,960
05	0,433	0,433	13	0,805	1,820
06	0,573	0,573	14	0,453	0,495
07	0,380	0,380	15	0,460	0,598
08	0,358	0,358	16	0,550	0,553

4.8.1 – Rugosidade com o uso do mandril hidro-mecânico

De acordo com a análise de variância apresentada na Tabela 4.14, a geometria do alargador é a variável independente de maior influência no processo, sendo seguida pela velocidade de corte e avanço. Todas as variáveis independentes apresentaram significância superior a 85% e a forma como influem o processo é mostrado na Figura 4.20.

Tabela 4.14 – Análise de variância para Ra com uso do mandril hidro-mecânico.

Fatores em estudo	P	Significância
Ferramenta (Tipo de Alargador)	0,057423	94,26%
Velocidade de corte	0,092153	90,78%
Avanço de corte	0,147274	85,27%

De acordo com a Figura 4.20, os alargadores 1 e 2 produziram os menores valores de rugosidade média. Os alargadores 3 e 4 possui um piloto ou cone no início da aresta de corte, fazendo com que profundidade de corte seja reduzida. De acordo com Metals Handbook (1989), pequenas profundidades de corte fazem com que o alargador promova o esmagamento do material ao invés de cortá-lo de forma adequada, o que provoca a degradação da superfície do furo.

Foi observado também que o alargador de número 4 (com 6 arestas e piloto) produziu menor valor de rugosidade que o alargador de número 3 (com 4 arestas).

Conforme foi dito por Bezerra (1998), maior número de arestas de corte aumentam a área de contato do alargador com o furo e melhora sua capacidade de acabamento.

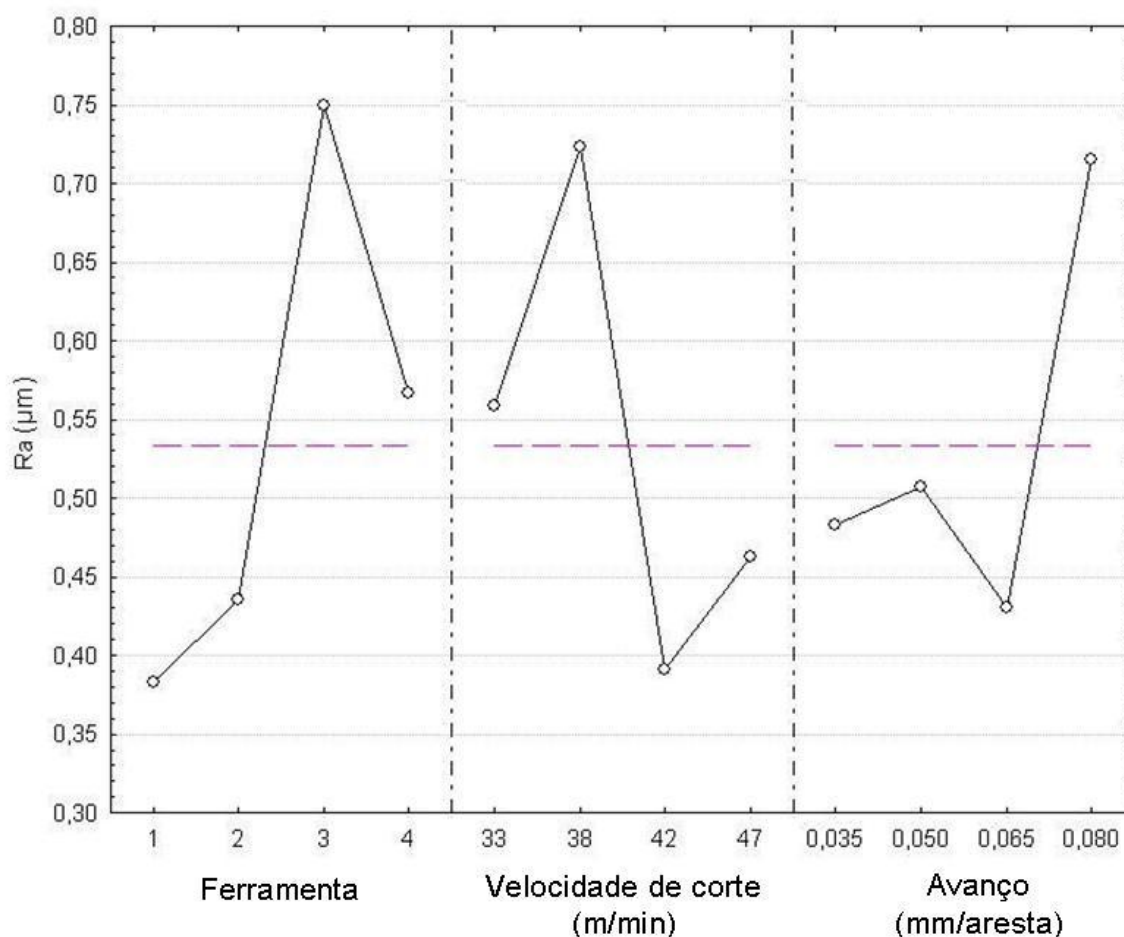


Figura 4.20 – Influência das variáveis independentes sobre Ra com mandril hidro-mecânico

Assim como ocorre em processos de torneamento e fresamento, o aumento da velocidade de corte melhora o acabamento da peça trabalhada. Schroeter (1989) verificou que a velocidade de corte não apresentou grande influência sobre a qualidade superficial do furo. Weinert et al (1998) alargou o aço 42 CrMo₄, com alargador de corte único com lâminas e guias de CERMET, com velocidades variando de 50 a 180 m/min e avanço de 0,1mm/rot. Os furos possuíam diâmetro de 10 mm e comprimento de 42 mm. Neste experimento, ele percebeu que o aumento da velocidade de corte gerava menores valores de Ra e Rz. Os maiores valores de rugosidade foram encontrados a 50 m/min, sendo justificado pela presença de APC.

O aumento da velocidade de corte aumenta a energia envolvida no processo de corte, boa parte desta é convertida em calor. Na usinagem de material com grande

quantidade de poros, o aumento da temperatura pode fazer com que o material se deforme com maior facilidade e que parte dele tape parte dos poros.

A rugosidade média observada neste trabalho é constituída de poros e marcas de usinagem, portanto, uma redução no valor de R_a pode significar que alguns poros foram tapados. Como a quantidade de poros resultante não faz parte da proposta deste trabalho, não será dada maior ênfase a esta discussão.

Assim como nos processos de usinagem, o aumento do avanço faz aumentar a rugosidade média. Resultados semelhantes foram encontrados em Schroeter (1989), Shunmugam e Somasundaram (1990) e Bezerra (1998). Novamente, o terceiro valor de avanço causou uma anomalia na curva do gráfico, reforçando as suposições sobre mudanças na interface cavaco-ferramenta e eliminando qualquer dúvida que possa surgir sobre a execução dos ensaios.

Santos (2004) alargou guias de válvulas automotivas e constatou que o aumento do avanço causava aumento nos parâmetros de rugosidade. Outra variável influente em seus resultados foi o tipo de fluido de corte, maior capacidade de lubrificação produz superfícies de melhor acabamento, já a variação de concentração não produziu efeitos consideráveis.

4.8.2 – Rugosidade com uso da barra de mandrilar

Na Figura 4.21 é mostrada a rugosidade média para os dois métodos de fixação. Nesta comparação, os valores produzidos pela barra de mandrilar normalmente são superiores aos obtidos com o mandril hidro-mecânico. A maior diferença foi encontrada no ensaio de número 13, onde a diferença foi de $1\mu\text{m}$.

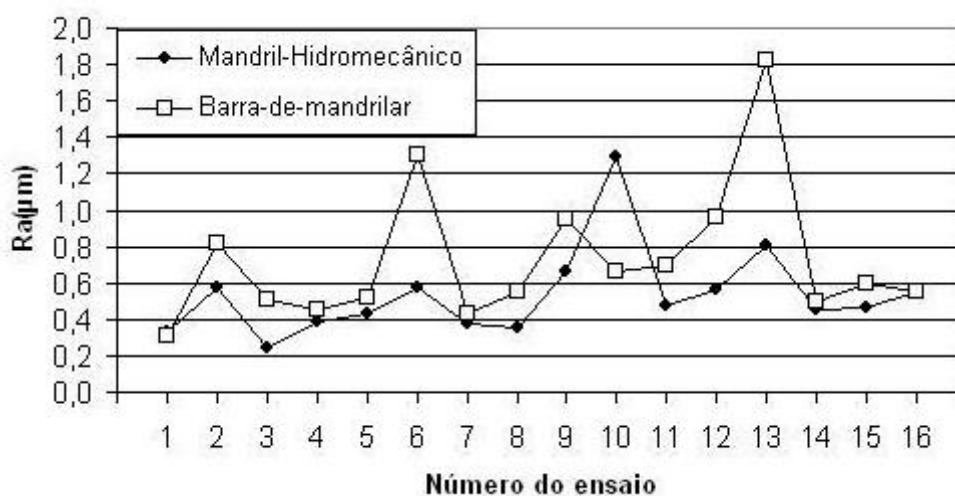


Figura 4.21 – Comparação dos valores de R_a para os dois métodos de fixação do alargador

Na Figura 4.22 é observado como as variáveis de entrada atuam sobre a rugosidade média resultante. Porém na análise de variância mostrada na Tabela 4.15, todas as variáveis apresentam pequenos valores de significância. Com isto, as variáveis de entrada possuem pequena influência na variável de saída (R_a), não sendo confiáveis as tendências observadas com o uso da barra de mandrilar, pois os efeitos das variáveis independentes foram alterados por uma variável fora de controle, anteriormente atribuída à falta de rigidez do método de fixação. Segundo a Técnica de Taguchi, a adoção da barra de mandrilar inseriu uma grande quantidade de ruído ou variáveis sem controle ao sistema.

Tabela 4.15 – Análise de variância para R_a com uso da barra de mandrilar.

Fatores em estudo	P	Significância
Ferramenta (Tipo de Alargador)	0,777584	22,24%
Velocidade de corte	0,755879	24,41%
Avanço de corte	0,944092	5,59%

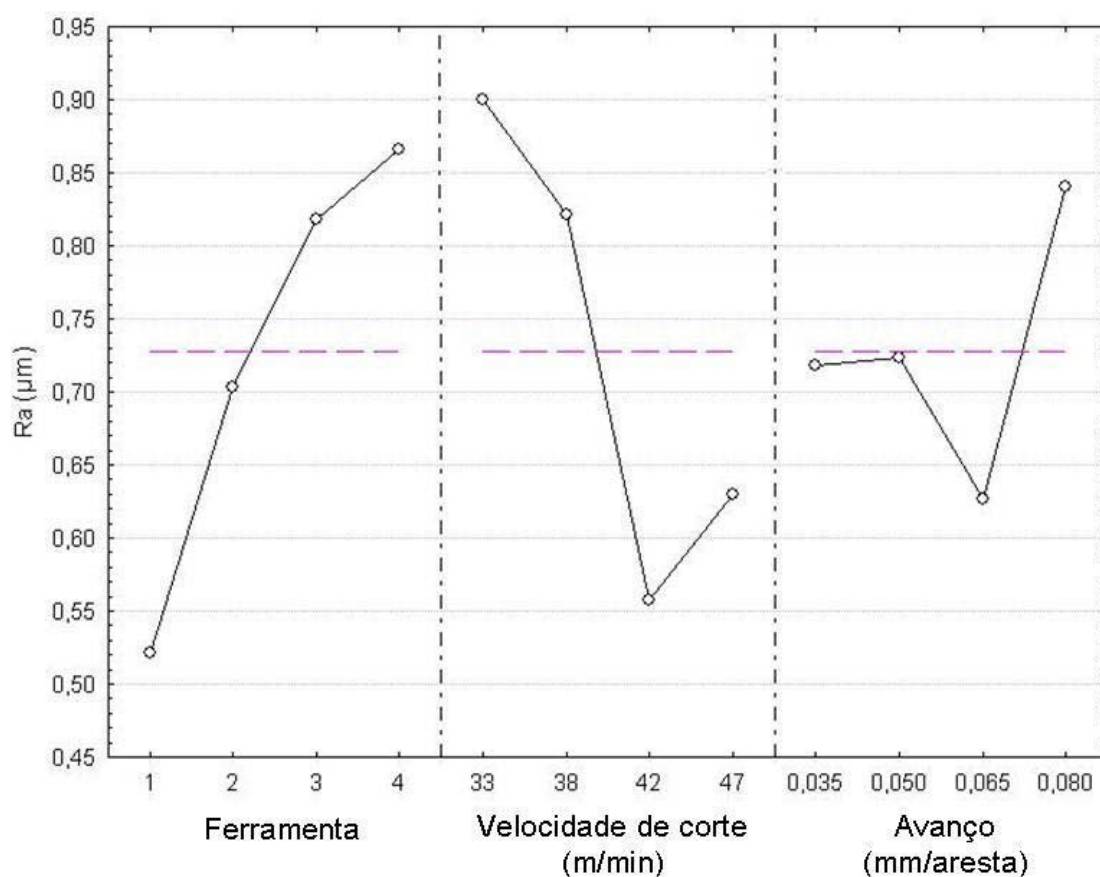


Figura 4.22 - Influência das variáveis independentes sobre R_a com o uso da barra de mandrilar.

CAPÍTULO V

CONCLUSÕES

Segundo Schroeter (1989), os alargadores tendem a seguir a linha de centro do furo já existente. Amostras do material em bruto mostraram um desvio de cilindridade que confere ao furo um perfil curvo em forma de “C”. Após a usinagem, foi observado que os furos com maior valor de cilindridade também apresentam perfil semelhante. Certamente os desvios do material em bruto estão aumentando o desvio de cilindridade no material usinado.

Fotos obtidas com o auxílio de Microscópio Eletrônico de Varredura foram utilizadas na quantificação de poros do material. As análises indicam que o material possui cerca de 38% da área observada ocupada por poros, com variação próxima a 5%. A porosidade influencia de forma direta a densidade do material sinterizado, que possui variações de densidade menores que o máximo admissível. O ensaio de dureza indicou que o material possui 74 HRB com desvio igual a 5% do valor médio, mostrando que não é grande a variação de dureza de uma amostra para outra.

O cavaco resultante da usinagem é do tipo descontínuo e possui a forma de lascas soltas, que diminuem problemas na usinagem como risco de acidente, facilitam a saída do cavaco de dentro do furo e diminuem a presença do cavaco entre o furo e a ferramenta, evitando danos à superfície usinada.

No estudo dos erros de forma, foi observado que os desvios de cilindridade são em média 4 μm superiores aos desvios de circularidade. A comparação dos valores médios mostra que os desvios de circularidade e cilindridade produzidos pela barra de mandrilar são cerca de 48% e 30%, respectivamente, superiores aos obtidos com o mandril hidro-mecânico.

Os valores das forças de corte nas direções radiais X e Y são resultados de desvios geométricos e diferenças entre as linhas de centro da guia de válvula e do alargador. Dos quatro alargadores avaliados, o que apresentou as menores forças de corte e, conseqüentemente, é o menos sensível aos desvios geométricos, foi o alargador de número 3, que possui 4 arestas e piloto no início da aresta de corte.

As amplitudes das vibrações observadas são bastante influenciadas pela geometria do alargador, velocidade de corte e avanço. Os valores obtidos ficaram abaixo de $0,5 \text{ m/s}^2$ e as menores amplitudes foram obtidas com alargadores de 4 arestas de corte e piloto (o de número 3), trabalhando com 33 m/min e avanço de $0,035 \text{ mm/aresta}$.

Os menores desvios de circularidade e cilindridade foram obtidos com o uso do mandril hidro-mecânico, alargador de 4 arestas, com piloto e avanço de $0,080 \text{ mm/aresta}$. A velocidade de corte apresentou valor baixo de significância, não permitindo conclusões sobre qual é o valor ideal. Foi notado que no avanço de $0,065 \text{ mm/aresta}$, ocorrem alterações na interface cavaco-ferramenta, tendo como causa provável a presença de uma aresta postiça de corte instável. De toda forma, não foi notada nenhum tipo de perturbação com avanço de $0,080 \text{ mm/aresta}$.

Comparando as tabelas de análise de variância (ANOVA) conclui-se que a barra de mandrilar é mais sensível às variáveis independentes ensaiadas. Os melhores resultados foram obtidos com o mandril hidro-mecânico, de maior robustez.

Com o uso da barra de mandrilar, o alargador que apresentou o melhor desempenho foi o número 1 que possui quatro arestas de corte, sem o piloto no início da ferramenta e com avanço de $0,050 \text{ mm/aresta}$. A velocidade de corte apresentou baixo valor de significância, impossibilitando conclusões sobre a sua influência. Apesar dos valores recomendados para os parâmetros de corte, a variável de maior influência, no caso da barra de mandrilar, é a geometria do alargador.

A análise de variância mostrou que todas as variáveis independentes utilizadas nos experimentos são altamente influentes na rugosidade média, quando se utiliza o mandril hidro-mecânico. Novamente, o melhor resultado foi obtido com o alargador de número 3 (com piloto e 4 arestas), velocidade de corte de 42 m/min e avanço de $0,065 \text{ mm/aresta}$.

Apesar dos valores de R_a obtidos com o uso da barra de mandrilar parecerem bem próximos dos encontrados com o mandril hidro-mecânico, a análise de variância mostrou que as variáveis de entrada têm pouca influência na rugosidade média das guias alargadas.

Concluiu-se que o método de fixação do alargador é altamente influente no processo de alargamento das guias de válvula. Os melhores resultados foram encontrados quando se utilizou o mandril hidro-mecânico. A causa do resultado inferior obtido com o uso da barra de mandrilar é a forma de fixação do alargador, através de dois parafusos, que não estão proporcionando a rigidez necessária ao processo. O projeto da ferramenta deve ser revisto, com a inclusão de mais dois parafusos, que darão maior rigidez. Outra sugestão é buscar melhorias no processo de sinterização das guias de válvulas, visando minimizar os desvios de cilindridade do furo, que não são eliminados no processo de alargamento.

CAPÍTULO VI

SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

6.1 – Sugestões

1. Estudar a usinabilidade entre alguns materiais utilizados na fabricação de guias de válvulas.
2. Estudar a formação e comportamento de aresta postiça de corte (APC) em materiais sinterizados.
3. Realizar ensaios em baixa, média e alta velocidade de corte para melhor entender a influência deste parâmetro na superfície resultante. É possível que altas velocidades de corte promovam o amolecimento do material, amolecendo o material e tapando os poros.
4. Experimentar uma ampla faixa de avanço e verificar qual o maior valor que pode ser usado sem ultrapassar a tolerância de projeto.
5. Realizar ensaios de longa duração para levantamento da vida da ferramenta, segundo a fórmula de Taylor.
6. Verificar com o fabricante das guias de válvula se é possível reduzir os desvios de forma existentes no furo central. Caso não seja possível, pode-se verificar até que ponto os alargadores conseguem reduzi-los, ou ainda verificar se é viável o uso de broca helicoidal ou alargador de desbaste para diminuir os desvios de forma do material antes do alargamento de acabamento.
7. Estudar como erros de posicionamento que criam falhas de concentricidade entre o alargador e a peça influenciam a integridade superficial das guias.
8. Avaliar como a variação do diâmetro do furo inicial da guia influi no processo de alargamento da mesma. Outros trabalhos já verificaram que a variação da profundidade de corte influi bastante no alargamento, como Schroeter (1989) e Bezerra (1998).
9. Realizar ensaios com alimentação de fluido de corte por meio de canais no interior do alargador, bem como, utilizar diversas composições de fluido de corte.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

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, 19p.

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

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, **NBR 6023**: Informação e documentação – Referências – Elaboração, Rio de Janeiro, 2002, 24p.

AGARICO, J., Alargadores do tipo modular para alta velocidade, **Máquinas e Metais**, Aranda editora, Ano XL ,n. 460 , p 138-149, mai. 2004.

AGOSTINHO, O. L.; RODRIGUES, A. C. S. e LIRANI, J., **Tolerâncias, ajustes, desvios e análise de dimensões**, 1.ed. Editora Edgard Blücher Ltda, 1977, São Paulo, 295p.

ALMEIDA, D. O., **Investigação de desvios geométricos no alargamento de ferro fundido com ferramentas revestidas**, 2008, 103p, Dissertação de mestrado – Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, MG,.

BARROS NETO, B; SCARMINIO, I. S.; BRUNS, R. E. **Como fazer experimentos**, 3.ed, Campinas, SP: Editora da Unicamp, 2007, 480p.

BAYLY, P. V.; YOUNG, K. A.; CALVERT, S. G.; HALLEY, J. E., Analysis of Tool Oscillation and Hole Roundness Error in a Quasi-Static Model of Reaming, **Journal of Manufacturing Science and Engineering**, v.123, n. 3, p. 387-396, Aug. 2001.

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

BHATTACHARYYA, O.; JUN M. B.; KAPOOR, S. G.; DEVOR, R. E., The effects of process faults and misalignments on the cutting force system and hole quality in reaming, Elsevier, **International Journal of Machine Tools & Manufacture**, v. 46, n. 46, p. 1281-1290, Dec. 2005.

BHATTACHARYYA, O.; KAPOOR, S. G.; DEVOR, R. E., Mechanistic model for the reaming process with emphasis on process faults, Elsevier, **International Journal of Machine Tool & Manufacture**, v. 46, p. 836-846, Jun. 2006.

BLACK, J. T. **Metals HandBook**: Introduction to Machining Processes, 9th ed, v.16, Machining, ASM International, 1989.

BOOTH, G.R., Bore reaming can beat finish boring, **Machinery and Production Engineering**, p. 28-30, Feb. 1989.

BRUNO, E. P.; RIBEIRO, R. B.; SILVA, M. B., Aplicação do método estatístico de Taguchi na usinagem de aço 1045, **Máquinas e Metais**, Aranda Editora, Ano XLI, n. 474, p. 138-149, jul. 2005.

CHAYERINI, V. – **Aços e ferros fundidos: Característicos gerais, tratamentos térmicos, principais tipos**, 7. ed. São Paulo: Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais, 1996.

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

DA SILVA, L. B. **Precisão científica no processo de pesquisa em engenharia de produção**, Apostila, Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa, 2005. Disponível em: <http://www.ct.ufpb.br/ceset/disc_metodos_quantitativos/>,. Acesso em: 27 jan. 2009.

DIAS, A. M.; VERNEY, J. C. K.; CÉZAR, J. L, GONÇALVES, L. E. S.; MACHADO, L. R. F., Como deve ser uma liga Fe-Ni-C para sede de válvula de admissão no automóvel. **Máquinas e Metais**, Aranda Editora, Ano XXXIV, n. 391, p. 102-106. Ago.1998.

DIAS, A. M.; DA ROCHA, M. C.; SHAEFFER, L., Sinter-Forjados de alto desempenho para utilização em autopeças. **Máquinas e Metais**, Aranda Editora, Ano XXXI, p. 74-84. fev. 1996.

DILLEY, D. N.; BAYLY, P. V.; WHITEHEAD, B. T., CALVERT, S.G, An analytical Study of the effect of process damping on reamer vibrations, Elsevier, **Journal of Sound and Vibration**, N. 280, p. 997-1015, Feb. 2005.

DORMER, **Catálogo de Metal Duro**, Catálogo do Fabricante, 2007, 780p. Disponível em: <<http://www.dormertools.com/SANDVIK/>>, acesso em: 20 nov. 2008.

DUNCAN, A. J., **Quality control and industrial statistics**, 3.ed, Homewood : R. D. Irwin, 1965, 992p.

ECKHARDT, M., **Utilização de alargadores de gume único regulável para obtenção de furos de precisão**, 1993, Dissertação de mestrado, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis.

FERRARESI, D. **Fundamentos da usinagem dos metais**. 1ª reimpressão. São Paulo: Edgar Blücher, 1977, v 1.

FIAT, **Guida valvole in materiale sinterizzato**, Norma interna da FIAT, data 10 mar. 2008, 8p.

GADELMAWLA, E. S, KOURA, T. M. A, ELEWA, I. M, SOLIMAN, H. H. Roughness parameters, **Journal of Materials Processing Technology**, n.123, p.133-145, Jan. 2002.

GARBOR, H. Como especificar brocas. **Máquinas e Metais** (Plásticos), MM Editora Ltda, Ano XIX, n. 215, 1983, p.28-34

GUEDES, J. B. P, **Uma contribuição ao estudo da soldabilidade de aços galvanizados pelo processo de ponto por resistência**, 2004, Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Uberlândia, MG.

GUEDES, L. F. M, **Processo de fabricação por usinagem/conformação**, Apostila, Porto Alegre, 2006. Disponível em:< www.ufrgs.br/gpfai/download/eng03343_10.pdf>, acesso em: 15 jul. 2008.

HANNA. **Alargadores – Reamers**, Catálogo do fabricante, 2003, 5p. Disponível em: <<http://www.hannatools.net/catalogos.htm>>, acesso em: 20 nov. 2008.

HUTCHINGS. I.M, **Tribology: Friction and Wear of Engineering Material**, Edward Arnald: USA, 1992, 273p.

KRESS, D., United States Patent number 5,328,304: **REAMER**, July 12, 1994. Disponível em: < <http://www.wikipatents.com/5328304.html>> ou <<http://www.patentstorm.us/patents/5328304/fulltext.html>> , acesso em: 29 jan. 2009;

KRESS. D, ERDEL, B. P. CNC-Tooling for finish-Machining high precision bores, **Carbide and tool journal**, v. 9, n. 5, p10-13, Sep/Oct, 1987.

LORENZEN, T. J. e ANDERSON V. L., **Design of experiments: a no-name approach**, New York : Marcel Dekker, 1993, 414p.

MACHADO, A. R. e DA SILVA, M. B., **Usinagem dos metais**, apostila, Universidade Federal de Uberlândia – EDUFU, 2004, 266p.

MAPAL, **Competência em alargamento e mandrilamento de precisão**, Catálogo do Fabricante, 2008a, 119p.

MAPAL, **A nova ferramenta Mapal – Twin-Blade**, Catálogo do Fabricante, 2008b, 11p.

MATHEWS, P. G., SHUNMUGAM, M. S., Condition monitoring in reaming through acoustic emission signals, **Journal of Materials Processing Technology**, v.86, p. 81-86, 1999a.

MATHEWS, P. G., SHUNMUGAM, M. S., Neural-network approach for predicting hole quality in reaming, **Journal of Machining Tools and Manufacture**, v.39, p. 723-730, 1999b.

METALS HANDBOOK, **Machining**, 9.ed, ASM International, 1989, v.16, 929p.

MONTGOMERY, D. C. **Design and analysis of experiments**, 4. ed. New York: Wiley, 1997, 796p.

PHADKE, M. S. **Quality engineering using robust design**. Englewood Cliffs, N.J.: Prentice Hall, 1993.

PANGRÁCIO, M. L. **Análise da qualidade de furos realizados por fresamento helicoidal interpolado**. 2003. 103p, Dissertação de mestrado, Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade Federal do Paraná, Curitiba.

POLLACK, H.W. **Tool design – Geometric control**, 2.ed, Englewood Cliffs: Prentice Hall International, p. 404-408, 1988.

PRATES, G. A., **Ecodesgin utilizando QFD, métodos Taguchi e DFE**, 1998, Tese de Doutorado, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, SC.

RANJIT, R. K., **Design of experiments using the Taguchi approach: 16 steps to product and process improvement**, New York : Wiley Interscience, 2001, 538p.

ROSA, L. C., **Acabamento de Superfícies – Rugosidade Superficial**, 2005, Oficina Mecânica para Automação, Unesp, Sorocaba. Disponível em: <<http://www.sorocaba.unesp.br/professor>>, acesso em: 20 mai. 2008

ROSS, P. J. **Aplicações das técnicas de Taguchi na engenharia da qualidade**. São Paulo: Makron Mac-Hill, 1993, 333p

SALGADO, L.; FILHO, F. A.; DE ARAUJO, E. G.; VATAVUK J.; ROSSI J. L.; HERMRMANN FILHO C. R. e COLOSIO, M. A., A metalurgia do pó e o setor automotivo, **Máquinas e Metais**, Aranda editora, Ano XXXVII, n. 426, p. 84-99, jul. 2001.

SALGADO, L. **Metalurgia do pó avança em novos nichos de mercado**. CIMM – Centro de Informação Metal Mecânica, 01 nov. 07. Disponível em: <http://www.cimm.com.br/portal/noticia/exibir_noticia/2264>. Acesso em: 29 jul. 2008.

SANTOS, R. G. **Avaliação do processo de alargamento de guias de válvulas**. 2004, 93p Dissertação de mestrado – Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade Federal do Paraná, Curitiba.

SCHROETER, R. B. **Alargamento de precisão em alumínio aeronáutico com ferramentas de gume único regulável**. 1989. Dissertação de mestrado – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Florianópolis, 113p.

SHUNMUGAM, M. S. & SOMASUNDARAM, G., Investigations into Reaming Processes Using a Frequency-Decomposition Technique, **International Journal of Production Research**, v. 28, p. 2065-2074, Nov. 1990.

SIQUEIRA, I. L.; LACERDA, H. B.; SOUSA JUNIOR, A. M.; PIACESI, R. A.; SEPPE JUNIOR, W., Estudo da usinagem das sedes de válvulas de admissão do motor FIAT Fire 1.4, **XVI Simpósio do Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica**, 2006, Uberlândia Universidade Federal de Uberlândia, Faculdade de Engenharia Mecânica.

STEMMER, C. E. 1995, **Ferramentas de corte II: brocas, alargadores, ferramentas de roscar, fresas, brochas, rebolos, abrasivos**, 2. Ed, Florianópolis-SC: Editora da UFSC, p. 33-43.

STOCKEL, M. W. **Auto Service and Repair**. The Goodheart – Willcox CO., Inc. South Holland, Illinois, 1969, volume único. 623p

TAYLOR ROBSON, **Basic Metrology Practices**, Slides de Treinamento, 2001, CD-ROM.

TOWFIGHIAN, S.; BEHDINAN, K.; PAPINI, M.; SAGHIR, Z.; ZALZAL, P.; DE BEER, J. Finite element modeling of low speed reaming vibrations with reamer geometry modifications, **Journal of Intelligent Manufacturing**, v. 18, n. 6, p. 647-661, Dec. 2007

VERNIER, N. Alargadores para usinagem a alta velocidade. **Máquinas e Metais**, Aranda Editora, Ano XLIII, p. 50-59. Jul. 2006.

WALKER, J. R, **Machining Fundamentals: from basic to advanced techniques**, The Goodheat – Willcox Company, Inc. Tinley Park, Illinois, 1998.

WEINERT, K.; ADAMS, F.; BIERMANN, D. & THAMKE, D., Alargadores de corte único: corte mais eficiente, além de vantagens econômicas, **Máquinas e Metais**, Aranda Editora, Ano XXXIV, n. 384, p. 38-57. Jan. 1998.

YANG, J. A., JAGANATHAN, V., Du, R., A new dynamic model for drilling and reaming processes, Pergamon, **International Journal of Machine Tools e Manufacture**, v.42, p. 299-311, Jan. 2002.

ZENG, Z. Influence of cutting depth on resolving power of cutting fluid efficiency in reaming test, **ICPCG - Inst. Conf. on the Progress of cutting grinding**, Osaka, Japan, ISPE, p. 296-300, Nov.1996.

Apêndice

Parâmetros resultantes das análises de superfícies

Tabela A1 – Valores de circularidade e cilindridade (μm) obtidos com mandril hidro-mecânico na primeira etapa.

Mandril hidro-mecânico	Ensaio	Circularidade								Cilindridade			Desvio Padrão
		1	2	3	4	5	6	7	8	Média	Desvio Padrão	Média	Desvio Padrão
Ferram. 01	PT01	2,89	2,47	3,23	2,67	2,68	2,36	1,77	2,01	2,51	0,44	6,30	0,49
	PT02	3,20	3,36	3,61	2,50	2,59	1,87	1,60	2,41	2,64	0,66	5,55	0,13
	PT03	2,00	2,14	1,29	2,78	1,81	1,96	2,19	1,23	1,93	0,47	6,97	1,27
	PT04	2,16	2,42	2,53	2,33	1,66	2,36	0,96	1,40	1,98	0,53	5,06	0,79
Ferram. 02	PT05	1,62	1,01	1,25	1,14	1,36	0,91	1,10	1,13	1,19	0,21	4,40	0,37
	PT06	2,03	2,35	1,27	1,84	1,50	1,26	1,38	1,57	1,65	0,37	5,48	0,33
	PT07	1,20	1,28	1,41	1,23	1,16	1,18	1,51	1,28	1,28	0,11	5,21	0,16
	PT08	1,58	1,36	0,89	0,96	1,12	1,45	1,10	1,70	1,27	0,28	4,72	0,43
Ferram. 03	PT09	2,12	1,28	1,37	1,36	1,81	2,10	2,39	2,86	1,91	0,53	7,94	0,22
	PT10	1,14	1,19	1,42	1,20	1,18	1,13	1,45	1,03	1,22	0,14	3,76	0,29
	PT11	1,59	0,90	1,43	0,81	0,98	0,84	0,97	0,69	1,03	0,30	3,40	0,39
	PT12	1,04	0,90	1,51	1,10	1,32	0,80	1,01	1,50	1,15	0,25	3,56	0,09
Ferram. 04	PT13	1,26	0,80	1,51	1,18	1,18	1,51	1,22	1,13	1,22	0,21	5,78	0,12
	PT14	1,02	1,28	1,05	1,14	1,40	1,70	2,30	2,48	1,55	0,53	6,36	0,57
	PT15	1,97	1,68	1,80	2,24	2,45	3,03	3,30	1,78	2,28	0,57	7,11	0,22
	PT16	2,18	2,14	1,97	1,71	1,86	1,81	1,99	1,88	1,94	0,15	7,02	0,04

Tabela A2 – Valores de circularidade e cilindridade (μm) obtidos com barra de mandrilar na primeira etapa

Ensaio	Circularidade								Média	Desvio Padrão	
	1	2	3	4	5	6	7	8			
Barra de Mandrilar	Ferramenta 01								3,78	0,69	
	T01-R01	4,48	4,73	4,31	4,07	3,94	4,26	4,25	4,79	8,23	0,85
	T01-R02	2,76	2,39	3,69	3,67	3,56	3,77	3,04	2,84		
	T02-R01	1,07	1,10	1,25	1,55	1,58	1,70	1,65	1,68	6,26	1,16
	T02-R02	4,78	2,98	2,49	3,36	3,66	2,61	1,81	2,51		
	T03-R01	2,87	2,42	3,23	3,77	3,37	3,07	1,96	2,06	7,68	0,64
	T03-R02	4,91	4,26	3,36	3,21	3,31	3,43	2,29	1,86		
	T04-R01	2,83	1,59	1,94	1,87	1,94	2,10	2,10	1,91	8,39	0,67
	T04-R02	3,87	3,75	3,37	3,47	3,77	3,42	2,67	2,27		
	T05-R01	2,97	2,82	3,50	3,96	3,43	3,31	2,85	2,67	6,84	1,31
	T05-R02	1,84	1,24	1,75	1,50	1,47	1,30	1,48	1,66		
	T06-R01	1,68	1,99	2,33	2,44	3,60	2,21	3,00	2,27	7,18	0,34
T06-R02	2,93	3,44	2,78	2,67	3,11	2,93	2,77	2,85			
T07-R01	4,20	3,50	3,21	3,37	1,97	3,00	2,79	2,22	7,76	1,04	
T07-R02	1,70	1,05	1,56	1,56	1,72	2,09	3,49	3,40			
T08-R01	3,71	3,31	4,12	4,41	4,24	4,32	4,38	4,14	7,82	1,07	
T08-R02	3,70	3,41	3,08	2,97	2,24	1,98	1,34	1,69			
T09-R01	4,70	3,94	4,44	3,05	2,41	3,23	3,02	2,73	8,89	0,35	
T09-R02	1,33	2,50	1,64	2,77	2,62	2,93	3,31	3,96			
T10-R01	3,10	2,25	2,65	1,84	2,54	2,15	2,89	3,72	9,47	0,65	
T10-R02	3,46	3,84	2,87	3,00	3,80	4,67	3,66	3,85			
T11-R01	4,27	3,21	3,47	4,62	4,66	4,99	4,61	4,52	8,67	0,92	
T11-R02	3,75	3,10	3,09	3,71	3,37	3,66	3,34	2,58			
T12-R01	3,53	3,51	3,79	4,06	4,09	3,77	4,51	4,53	9,31	0,09	
T12-R02	33,07	29,71	25,65	22,28	11,08	7,35	7,36	8,10			

Continuação da Tabela A2

Ferramenta 04	T13-R01	3,45	3,68	3,20	4,25	4,83	4,39	4,33	5,72	3,32	1,33	9,95	9,51	9,61	8,91	0,80
	T13-R02	1,35	0,99	1,08	2,35	2,48	3,18	3,52	4,32			8,05	8,31	8,00		
	T14-R01	3,59	3,59	4,11	3,79	3,80	3,18	3,47	3,71	4,15	0,58	8,47	8,70	8,91	8,90	0,25
	T14-R02	4,14	4,24	5,03	4,71	5,08	4,50	4,95	4,49			9,12	9,19	8,99		
	T15-R01	1,35	1,22	1,13	2,22	2,17	2,63	2,53	3,63	2,70	0,87	7,08	7,47	7,57	8,94	1,58
	T15-R02	2,83	2,83	3,17	3,17	3,26	3,54	3,35	4,23			10,29	10,92	10,29		
	T16-R01	2,39	2,48	1,92	1,73	2,03	2,17	2,58	3,16	3,10	0,97	7,7	7,89	8,23	9,25	1,37
	T16-R02	4,24	4,50	4,93	3,92	4,02	2,66	3,16	3,72			11,27	10,21	10,22		

Tabela A3 – Valores de circularidade e cilindridade obtidos com mandril hidro-mecânico na segunda etapa

	Ensaio	Circularidade								Média	Desvio Padrão	Cilindricidade			Média	Desvio Padrão	
		1	2	3	4	5	6	7	8			1	2	3			
Mandril Hidro-mecânico	Ferram. 01	S01-R01	3,18	1,89	1,95	1,73	1,42	1,24	1,31	0,99	1,71	0,64	5,88	6,11	5,91	5,97	0,10
		S02-R01	4,66	3,49	4,00	3,77	3,06	2,77	2,01	1,85	3,20	0,91	7,55	6,72	7,08	7,12	0,34
		S03-R01	5,03	4,21	3,96	4,02	4,23	4,49	4,72	4,69	4,42	0,35	7,37	7,97	7,50	7,61	0,26
		S04-R01	3,00	4,63	3,13	3,66	3,03	3,19	4,30	3,55	3,56	0,57	6,92	7,17	7,52	7,20	0,25
	Ferram. 02	S05-R01	3,43	2,87	2,91	2,83	2,62	1,96	1,22	1,36	2,40	0,75	5,52	5,63	5,96	5,70	0,19
		S06-R01	3,57	3,45	3,38	3,72	3,45	3,25	3,07	3,22	3,39	0,19	5,94	6,48	6,43	6,28	0,24
		S07-R01	3,34	2,91	2,79	2,35	2,45	2,50	2,27	2,57	2,65	0,33	6,22	6,86	6,92	6,67	0,32
		S08-R01	4,13	3,67	3,46	3,52	4,38	3,82	3,39	4,20	3,82	0,35	7,12	8,00	8,48	7,87	0,56
Ferram. 03	S09-R01	3,09	3,10	3,07	4,03	3,84	3,06	2,61	3,24	3,26	0,43	7,93	8,26	7,78	7,99	0,20	
	S10-R01	2,27	1,34	1,31	1,11	1,46	1,75	1,30	1,62	1,52	0,34	4,55	5,67	5,65	5,29	0,52	
	S11-R01	3,69	4,09	4,01	3,80	3,90	4,00	3,41	3,93	3,85	0,20	7,31	7,48	7,79	7,53	0,20	
	S12-R01	2,57	2,40	2,31	1,85	1,23	1,32	0,85	0,49	1,63	0,72	5,48	6,85	5,81	6,05	0,58	
Ferram. 04	S13-R01	5,18	4,26	3,67	2,95	3,37	3,35	2,99	3,59	3,67	0,69	8,26	8,86	9,42	8,85	0,47	
	S14-R01	3,54	3,16	3,85	4,42	4,48	4,68	4,48	4,95	4,20	0,57	7,61	8,40	7,66	7,89	0,36	
	S15-R01	3,24	2,55	2,18	2,67	3,19	3,44	3,69	3,66	3,08	0,52	6,83	6,72	6,69	6,75	0,06	
	S16-R01	4,07	4,08	3,58	4,79	4,93	4,77	5,74	5,41	4,67	0,68	8,93	9,20	9,15	9,09	0,12	

Tabela A4 – Valores de circularidade e cilindridade obtidos com barra de mandrilar na segunda etapa

	Ensaio	Circularidade								Média	Desvio Padrão	
		1	2	3	4	5	6	7	8			
Barra de Mandrilar	Feram. 01	M01-R01	2,71	2,74	3,42	3,01	3,83	4,15	4,89	5,39	3,77	0,93
		M02-R01	2,95	1,78	1,96	2,11	1,66	1,56	2,55	3,33	2,24	0,60
		M03-R01	3,2	2,75	2,04	1,41	1,13	0,96	1,66	3,12	2,03	0,83
		M04-R01	4,04	3,67	3,41	3,57	3,16	2,12	2,54	3,3	3,23	0,58
	Feram. 02	M05-R01	3,61	3,03	2,36	1,83	1,02	1,47	0,94	1,59	1,98	0,89
		M06-R01	5,86	6,06	6,34	5,95	6,06	5,67	5,33	5,34	5,83	0,33
		M07-R01	5,28	2,69	3,16	3,72	4,02	4,06	4,1	4,22	3,91	0,72
		M08-R01	2,17	1,78	1,79	1,96	1,57	1,38	1,21	1,19	1,63	0,33
Feram. 03	M09-R01	5,11	4,67	4,25	4,31	4,88	4,22	4	3,42	4,36	0,50	
	M10-R01	6,48	6,17	5,39	5,35	4,8	5,16	4,71	5,06	5,39	0,59	
	M11-R01	4,93	4,9	4,39	4,5	4,36	4,13	4,61	3,89	4,46	0,33	
	M12-R01	5,41	5,13	4,89	4,88	4,78	4,48	5,13	5,16	4,98	0,27	
Feram. 04	M13-R01	6,7	6,31	6,21	5,15	4,91	4,64	4,45	4,64	5,38	0,83	
	M14-R01	6,61	5,92	5,52	5,63	5,13	5,13	6,01	5,57	5,69	0,46	
	M15-R01	5,69	6,16	6,23	5,79	6,03	5,8	5,34	5,06	5,76	0,38	
	M16-R01	5,29	4,99	5,79	5,31	5,09	4,79	4,17	4,22	4,96	0,52	

	Ensaio	Cilindricidade				Média	Desvio Padrão
		1	2	3			
Barra de Mandrilar	Feram. 01	M01-R01	7,84	7,53	7,79	7,72	0,14
		M02-R01	6,35	6,65	6,65	6,55	0,14
		M03-R01	6,05	6,69	6,02	6,25	0,31
		M04-R01	6,28	6,29	7,26	6,61	0,46
		M05-R01	6,96	6,96	6,76	6,89	0,09
		M06-R01	9,63	10,10	10,39	10,04	0,31
		M07-R01	6,25	6,70	6,36	6,44	0,19
		M08-R01	5,48	5,69	5,26	5,48	0,18
	Feram. 03	M09-R01	8,61	8,59	8,26	8,49	0,16
		M10-R01	9,62	9,37	9,30	9,43	0,14
		M11-R01	8,88	9,49	8,95	9,11	0,27
		M12-R01	8,44	8,83	8,47	8,58	0,18
		M13-R01	8,96	9,48	9,79	9,41	0,34
		M14-R01	10,05	10,35	10,74	10,38	0,28
		M15-R01	9,87	10,18	10,21	10,09	0,15
		M16-R01	9,14	8,87	9,33	9,11	0,19

Tabela A5 – Valores de forças e aceleração com uso barra de mandrilar na primeira etapa

Ensaio	Intervalo		Médias dos sinais				RMS dos sinais			
	T0	T1	X	Y	Z	Aceleração	X	Y	Z	Aceleração
1	9,4	20,1	3,63	44,77	17,18	-0,013	6,88	52,6	20,88	0,2400
	5,5	16,7	-6,74	22,32	30,48	-0,016	7,78	26,56	33,18	0,2400
2	4,4	11,0	5,08	32,22	35,38	0,010	6,37	37,76	37,90	0,3117
	9,4	16,0	-0,57	33,97	31,31	-0,023	3,20	40,71	34,21	0,3215
3	11,0	15,6	-2,99	37,76	32,48	-0,014	5,28	45,02	36,94	0,0270
	10,1	14,6	2,74	40,15	42,16	-0,010	4,52	48,12	45,84	0,4098
4	0,7	3,9	1,70	31,37	41,79	-0,018	4,09	36,78	45,91	0,5056
	0,05	3,3	-4,27	42,62	39,36	-9E-04	6,75	50,63	43,74	0,4950
5	3,5	8,4	-1,29	51,43	46,88	-0,015	3,16	60,47	50,98	0,3685
	5,3	10,1	-15,23	31,28	33,56	-0,010	18,74	36,70	39,47	0,3971
6	3,2	9,3	-7,15	34,08	45,78	-0,013	9,60	39,84	49,93	0,3167
	2,3	8,4	-9,52	24,71	38,85	-0,012	11,36	28,62	43,37	0,3198
7	2,5	5,0	-2,30	48,15	51,57	-0,013	4,42	57,50	58,36	0,6077
	0,2	2,7	-20,51	70,08	47,98	-0,020	25,40	83,99	53,80	0,5360
8	2,7	5,5	-25,16	61,38	53,39	-0,024	31,48	74,16	59,31	0,5711
	2,7	5,5	-24,54	59,94	54,29	-0,023	30,72	72,39	59,85	0,5756
9	4,4	10,0	-6,32	61,78	21,86	-0,017	9,46	72,86	24,04	0,3543
	4,7	10,2	-14,70	57,92	24,32	-0,012	18,65	68,69	26,04	0,3626
10	3,0	7,0	18,18	59,62	25,98	-0,027	22,41	72,64	28,20	0,4245
	4,6	8,7	-15,18	55,54	27,72	-0,014	18,96	67,46	30,54	0,3970
11	5,0	13,0	-26,64	43,12	19,30	-0,024	31,84	50,50	20,79	0,2677
	4,7	12,8	-12,71	43,06	22,10	-0,020	15,70	50,05	23,41	0,2735
12	6,2	11,3	-11,38	53,87	17,52	-0,007	14,09	64,06	19,78	0,3575
	4,6	9,6	9,02	62,93	-0,50	-0,014	14,08	75,58	3,44	0,5998
13	1,5	4,7	3,2698	104,6	97,98	-0,018	4,92	127,85	105,75	0,4109
	3,1	6,3	-10,81	72,18	97,27	-0,022	13,77	89,08	104,19	0,4297
14	4,1	7,4	-9,75	65,61	86,52	-0,009	12,03	79,24	92,08	0,4091
	3,4	7,0	-18,22	90,32	80,30	-0,020	22,55	112,53	88,78	0,3900
15	5,5	9,4	-8,29	70,29	71,96	-0,012	10,35	85,19	78,15	0,3722
	4,1	8,0	-1,22	78,69	81,91	-0,020	2,91	95,00	87,77	0,3801
16	3,7	8,7	-31,13	49,27	67,51	-0,013	37,43	59,71	72,98	0,3333
	4,4	9,3	-19,82	29,80	61,61	-0,014	23,79	35,76	66,57	0,3229

Tabela A6 – Valores de forças e aceleração com uso do mandril hidro-mecânico na segunda etapa

Fnsaio	Intervalo		Médias dos sinais					RMS dos sinais				
	T0	T1	X	Y	Z	Aceleração	Resultante XY	X	Y	Z	Aceleração	Resultante XY
1	2,75	12,75	-3,506	8,798	14,486	-0,005	9,47	4,578	9,831	19,741	0,185	10,84
2	2,26	8,38	-2,695	8,515	20,280	-0,008	8,93	3,838	9,374	25,842	0,264	10,13
3	0,45	4,71	-8,065	2,558	24,950	-0,011	8,46	8,707	3,952	29,689	0,335	9,56
4	1,40	5,55	-18,845	12,924	18,883	-0,008	22,85	22,212	15,283	30,593	0,345	26,96
5	5,40	10,30	1,368	23,883	32,038	-0,007	23,92	2,761	27,741	37,722	0,271	27,88
6	0,40	6,60	-3,777	6,768	22,909	-0,005	7,75	4,230	7,123	28,907	0,219	8,28
7	5,58	8,00	-10,164	17,811	46,013	-0,010	20,51	12,368	20,705	52,464	0,467	24,12
8	5,00	7,80	-16,249	18,120	36,869	-0,002	24,34	19,699	21,326	43,490	0,394	29,03
9	4,00	9,70	-5,037	17,757	20,433	-0,009	18,46	6,064	19,730	22,741	0,279	20,64
10	3,80	8,20	-0,212	9,322	21,360	-0,008	9,32	1,957	9,740	26,100	0,317	9,93
11	0,75	9,25	-5,659	4,490	11,142	-0,009	7,22	6,234	4,993	14,027	0,185	7,99
12	4,30	9,50	-2,000	2,174	17,020	-0,006	2,95	3,382	2,879	19,061	0,269	4,44
13	2,70	6,00	-7,555	11,831	72,580	-0,011	14,04	8,298	13,072	80,422	0,351	15,48
14	3,90	7,40	-10,796	18,312	68,050	-0,007	21,26	12,201	20,325	75,571	0,339	23,71
15	4,35	8,35	-7,073	15,493	65,350	-0,004	17,03	7,745	16,905	72,430	0,291	18,59
16	4,49	9,52	-13,390	9,338	54,777	-0,004	16,32	14,800	10,259	60,587	0,268	18,01

Tabela A7 – Valores de forças e aceleração com uso da barra de mandrilar na segunda etapa

Ensaio	Intervalo		Médias dos sinais				RMS dos sinais			
	T0	T1	X	Y	Z	Acel	X	Y	Z	Acel
1	7,66	18,10	-5,042	6,388	15,079	-0,009	5,470	6,792	19,667	0,163
2	7,30	13,65	-0,312	11,601	21,189	-0,012	0,473	12,343	25,593	0,228
3	2,30	6,85	-3,144	6,812	28,790	-0,013	3,660	7,734	33,426	0,307
4	1,97	5,30	-1,715	12,828	29,673	-0,008	2,059	13,904	34,603	0,393
5	4,46	9,50	-11,293	23,247	29,768	-0,006	13,022	26,642	36,518	0,274
6	7,36	13,60	0,030	10,038	24,895	-0,008	0,984	10,807	30,798	0,222
7	12,30	14,85	-11,192	17,224	42,565	-0,002	13,247	19,364	49,924	0,442
8	5,32	8,10	-4,279	15,065	38,693	-0,012	5,153	17,268	45,011	0,402
9	4,20	9,70	-11,383	7,211	21,865	-0,010	11,908	8,826	24,396	0,268
10	5,75	9,75	-5,224	10,400	26,948	-0,003	5,706	11,064	30,021	0,303
11	5,70	13,80	-2,908	9,134	13,428	-0,006	3,488	9,664	15,961	0,214
12	6,20	11,20	-4,885	10,721	20,305	-0,007	5,471	11,563	22,576	0,265
13	9,12	12,20	-0,272	15,523	74,281	-0,012	1,931	16,492	82,610	0,353
14	6,50	9,70	-3,165	34,309	72,063	-0,008	3,926	39,385	78,814	0,335
15	5,60	9,30	-3,759	33,196	67,062	-0,013	4,783	37,630	72,329	0,303
16	5,80	9,16	0,911	4,953	63,021	-0,007	1,836	5,417	65,998	0,275

Tabela A8 – Parâmetros de rugosidade com o uso do mandril hidro-mecânico (µm)

	Ra				Ra Médio	Ry				Ry Médio	Rz				Rz Médio	Rq				Rq Médio
	1	2	3	4		1	2	3	4		1	2	3	4		1	2	3	4	
S1R1	0,22	0,20	0,44	0,46	0,33	1,82	1,75	2,17	3,67	2,35	1,82	1,75	2,17	3,67	2,35	0,32	0,30	0,55	0,68	0,46
S2R1	0,76	0,47	0,44	0,63	0,58	6,50	3,98	2,80	3,14	4,11	6,50	3,98	2,80	3,14	4,11	1,27	0,69	0,56	0,75	0,82
S3R1	0,25	0,22	0,31	0,20	0,25	1,84	2,26	1,65	1,77	1,88	1,84	2,26	1,65	1,77	1,88	0,36	0,35	0,38	0,31	0,35
S4R1	0,40	0,51	0,16	0,46	0,38	2,67	2,72	1,26	2,64	2,32	2,67	2,72	1,26	2,64	2,32	0,51	0,71	0,23	0,59	0,51
S5R1	0,49	0,28	0,27	0,69	0,43	4,08	2,45	1,59	4,84	3,24	4,08	2,45	1,59	4,84	3,24	0,63	0,39	0,34	0,92	0,57
S6R1	0,44	0,68	0,97	0,20	0,57	2,65	4,36	4,10	1,30	3,10	2,65	4,36	4,10	1,30	3,10	0,58	0,90	1,11	0,25	0,71
S7R1	0,38	0,40	0,41	0,33	0,38	2,17	2,37	2,33	1,67	2,14	2,17	2,37	2,33	1,67	2,14	0,48	0,53	0,52	0,38	0,48
S8R1	0,22	0,40	0,43	0,38	0,36	2,99	2,62	2,49	2,10	2,55	2,99	2,62	2,49	2,10	2,55	0,32	0,55	0,53	0,45	0,46
S9R1	0,38	0,97	0,46	0,86	0,67	2,63	4,56	3,42	4,82	3,86	2,63	4,56	3,42	4,82	3,86	0,52	1,25	0,69	1,08	0,89
S10R1	1,17	1,97	1,45	0,58	1,29	7,44	11,65	7,69	3,99	7,69	7,44	11,65	7,69	3,99	7,69	1,56	2,52	1,83	0,75	1,67
S11R1	0,57	0,41	0,60	0,33	0,48	4,41	2,12	4,38	1,89	3,20	4,41	2,12	4,38	1,89	3,20	0,83	0,48	0,81	0,42	0,64
S12R1	0,47	0,54	0,64	0,59	0,56	2,91	3,05	4,26	3,77	3,50	2,91	3,05	4,26	3,77	3,50	0,61	0,75	0,85	0,80	0,75
S13R1	1,21	0,40	1,05	0,56	0,81	6,87	2,23	8,25	3,18	5,13	6,87	2,23	8,25	3,18	5,13	1,69	0,48	1,61	0,70	1,12
S14R1	0,43	0,54	0,40	0,44	0,45	3,16	3,09	2,92	2,33	2,88	3,16	3,09	2,92	2,33	2,88	0,62	0,67	0,57	0,53	0,60
S15R1	0,31	0,38	0,81	0,34	0,46	2,13	3,16	6,12	2,07	3,37	2,13	3,16	6,12	2,07	3,37	0,41	0,52	1,02	0,45	0,60
S16R1	0,59	0,67	0,57	0,37	0,55	2,77	3,05	2,93	1,93	2,67	2,77	3,05	2,93	1,93	2,67	0,71	0,77	0,68	0,43	0,65

Continuação da Tabela A8

	Rt				Rt Médio	Rp				Rp Médio	Rs				Rs Médio	Rsm				Rsm Médio
	1	2	3	4		1	2	3	4		1	2	3	4		1	2	3	4	
S1R1	1,82	1,75	2,17	3,67	2,35	0,43	0,31	0,58	0,58	0,48	49,00	31,00	32,00	37,00	37,25	56,00	56,00	46,00	33,00	47,75
S2R1	6,50	3,98	2,80	3,14	4,11	0,80	1,65	0,96	0,96	1,09	35,00	51,00	23,00	31,00	35,00	50,00	70,00	37,00	38,00	48,75
S3R1	1,84	2,26	1,65	1,77	1,88	0,40	0,54	0,52	0,52	0,50	27,00	45,00	32,00	35,00	34,75	40,00	54,00	47,00	43,00	46,00
S4R1	2,67	2,72	1,26	2,64	2,32	0,66	0,70	0,28	0,28	0,48	23,00	23,00	25,00	26,00	24,25	34,00	70,00	41,00	38,00	45,75
S5R1	4,08	2,45	1,59	4,84	3,24	1,22	0,50	0,52	0,52	0,69	32,00	32,00	16,00	41,00	30,25	60,00	47,00	32,00	47,00	46,50
S6R1	2,65	4,36	4,10	1,30	3,10	0,77	1,52	1,54	1,54	1,34	19,00	26,00	38,00	18,00	25,25	31,00	46,00	55,00	45,00	44,25
S7R1	2,17	2,37	2,33	1,67	2,14	0,81	0,60	0,57	0,57	0,64	22,00	26,00	23,00	17,00	22,00	24,00	33,00	33,00	71,00	40,25
S8R1	2,99	2,62	2,49	2,10	2,55	0,37	0,84	0,80	0,80	0,70	49,00	28,00	21,00	22,00	30,00	48,00	50,00	58,00	28,00	46,00
S9R1	2,63	4,56	3,42	4,82	3,86	0,58	1,10	1,08	1,08	0,96	25,00	54,00	35,00	43,00	39,25	29,00	74,00	41,00	50,00	48,50
S10R1	7,44	11,6	7,69	3,99	7,69	1,42	2,74	2,78	2,78	2,43	44,00	62,00	149,0	30,00	71,25	73,00	102,0	104,0	37,00	79,00
S11R1	4,41	2,12	4,38	1,89	3,20	1,14	1,00	1,59	1,59	1,33	34,00	17,00	30,00	23,00	26,00	48,00	27,00	29,00	40,00	36,00
S12R1	2,91	3,05	4,26	3,77	3,50	0,63	0,87	0,91	0,91	0,83	31,00	29,00	23,00	26,00	27,25	93,00	56,00	54,00	49,00	63,00
S13R1	6,87	2,23	8,25	3,18	5,13	1,86	0,82	2,15	2,15	1,75	42,00	24,00	32,00	31,00	32,25	48,00	63,00	23,00	37,00	42,75
S14R1	3,16	3,09	2,92	2,33	2,88	0,84	1,25	1,00	1,00	1,02	25,00	40,00	28,00	26,00	29,75	39,00	192,0	33,00	67,00	82,75
S15R1	2,13	3,16	6,12	2,07	3,37	0,61	1,67	1,19	1,19	1,17	22,00	26,00	73,00	23,00	36,00	45,00	34,00	70,00	25,00	43,50
S16R1	2,77	3,05	2,93	1,93	2,67	0,95	1,10	0,99	0,99	1,01	27,00	39,00	28,00	22,00	29,00	61,00	52,00	41,00	99,00	63,25

Tabela A9 – Parâmetros de rugosidade com o uso da barra de mandrilar (µm)

	Ra				Ra Médio	Ry				Ry Médio	Rz				Rz Médio	Rq				Rq Médio
	1	2	3	4		1	2	3	4		1	2	3	4		1	2	3	4	
M1	0,29	0,31	0,19	0,46	0,313	3,83	2,15	1,77	3,24	2,748	3,83	2,15	1,77	3,24	2,748	0,39	0,44	0,28	0,61	0,430
M2	1,97	0,22	0,58	0,50	0,818	11,23	1,72	3,32	2,52	4,698	11,23	1,72	3,32	2,52	4,698	2,32	0,32	0,72	0,59	0,988
M3	0,53	0,39	0,66	0,44	0,505	4,61	2,81	4,71	2,51	3,660	4,61	2,81	4,71	2,51	3,660	0,71	0,56	0,85	0,54	0,665
M4	1,01	0,16	0,34	0,29	0,450	7,55	1,71	3,08	2,38	3,680	7,55	1,71	3,08	2,38	3,680	1,23	0,26	0,47	0,43	0,598
M5	0,66	0,38	0,44	0,60	0,520	8,06	2,29	2,34	3,59	4,070	8,06	2,29	2,34	3,59	4,070	0,90	0,48	0,53	0,74	0,663
M6	3,65	0,45	0,66	0,47	1,308	18,18	3,10	4,08	3,30	7,165	18,18	3,10	4,08	3,30	7,165	4,25	0,57	0,85	0,60	1,568
M7	0,78	0,45	0,25	0,23	0,428	6,87	2,91	1,62	1,33	3,183	6,87	2,91	1,62	1,33	3,183	0,98	0,58	0,31	0,29	0,540
M8	0,81	0,56	0,27	0,59	0,558	6,42	2,88	1,57	3,65	3,630	6,42	2,88	1,57	3,65	3,630	1,03	0,69	0,32	0,78	0,705
M9	1,77	1,30	0,24	0,48	0,948	16,94	7,19	1,70	2,70	7,133	16,94	7,19	1,70	2,70	7,133	2,34	1,78	0,32	0,61	1,263
M10	1,37	0,26	0,62	0,41	0,665	13,69	1,53	2,59	2,20	5,003	13,69	1,53	2,59	2,20	5,003	1,86	0,34	0,73	0,53	0,865
M11	1,70	0,35	0,31	0,44	0,700	12,41	3,55	2,02	2,62	5,150	12,41	3,55	2,02	2,62	5,150	2,01	0,49	0,39	0,55	0,860
M12	1,30	1,91	0,34	0,29	0,960	14,47	12,91	2,17	2,74	8,073	14,47	12,91	2,17	2,74	8,073	1,96	2,45	0,45	0,46	1,330
M13	5,23	0,57	0,55	0,93	1,820	30,61	3,23	2,66	5,70	10,550	30,61	3,23	2,66	5,70	10,550	6,56	0,72	0,65	1,25	2,295
M14	0,86	0,55	0,30	0,27	0,495	7,10	2,73	2,31	2,15	3,573	7,10	2,73	2,31	2,15	3,573	1,11	0,65	0,42	0,40	0,645
M15	1,04	0,10	0,63	0,62	0,598	5,92	0,81	3,90	3,67	3,575	5,92	0,81	3,90	3,67	3,575	1,28	0,13	0,77	0,77	0,738
M16	1,16	0,32	0,33	0,40	0,553	9,11	2,73	2,25	2,08	4,043	9,11	2,73	2,25	2,08	4,043	1,49	0,43	0,44	0,49	0,713

Continuação da Tabela A9

	Rt				Rt Médio	Rp				Rp Médio	Rs				Rs Médio	Rsm				Rsm Médio
	1	2	3	4		1	2	3	4		1	2	3	4		1	2	3	4	
M1	3,83	2,15	1,77	3,24	2,748	1,32	0,47	0,61	0,61	0,753	64,00	49,00	34,00	31,00	44,500	77,00	63,00	56,00	65,00	65,250
M2	11,23	1,72	3,32	2,52	4,698	6,64	0,48	1,01	1,01	2,285	161,00	28,00	30,00	64,00	70,750	585,00	53,00	53,00	62,00	188,250
M3	4,61	2,81	4,71	2,51	3,660	1,22	0,89	1,28	1,28	1,168	89,00	35,00	48,00	34,00	51,500	127,00	39,00	57,00	63,00	71,500
M4	7,55	1,71	3,08	2,38	3,680	3,19	0,36	1,05	1,05	1,413	120,00	37,00	43,00	24,00	56,000	164,00	32,00	53,00	135,00	96,000
M5	8,06	2,29	2,34	3,59	4,070	2,47	0,87	0,71	0,71	1,190	85,00	18,00	22,00	24,00	37,250	73,00	41,00	42,00	43,00	49,750
M6	18,18	3,10	4,08	3,30	7,165	9,05	0,76	0,96	0,96	2,933	226,00	24,00	25,00	26,00	75,250	764,00	27,00	27,00	28,00	211,500
M7	6,87	2,91	1,62	1,33	3,183	2,33	0,84	0,52	0,52	1,053	65,00	18,00	16,00	16,00	28,750	101,00	29,00	24,00	28,00	45,500
M8	6,42	2,88	1,57	3,65	3,630	2,59	0,99	0,62	0,62	1,205	72,00	37,00	25,00	26,00	40,000	110,00	52,00	43,00	36,00	60,250
M9	16,94	7,19	1,70	2,70	7,133	4,54	1,63	0,51	0,51	1,798	172,00	53,00	23,00	21,00	67,250	189,00	60,00	30,00	38,00	79,250
M10	13,69	1,53	2,59	2,20	5,003	3,94	0,61	0,79	0,79	1,533	115,00	21,00	27,00	30,00	48,250	115,00	59,00	160,00	37,00	92,750
M11	12,41	3,55	2,02	2,62	5,150	3,52	0,43	0,48	0,48	1,228	107,00	38,00	21,00	25,00	47,750	607,00	45,00	35,00	51,00	184,500
M12	14,47	12,91	2,17	2,74	8,073	2,56	4,62	0,60	0,60	2,095	141,00	39,00	26,00	57,00	65,750	107,00	64,00	48,00	57,00	69,000
M13	30,61	3,23	2,66	5,70	10,550	17,06	0,78	1,01	1,01	4,965	891,00	28,00	23,00	43,00	246,250	452,00	84,00	49,00	41,00	156,500
M14	7,10	2,73	2,31	2,15	3,573	2,60	0,72	0,38	0,38	1,020	96,00	36,00	47,00	44,00	55,750	115,00	67,00	72,00	87,00	85,250
M15	5,92	0,81	3,90	3,67	3,575	1,69	0,27	1,14	1,14	1,060	68,00	25,00	27,00	35,00	38,750	100,00	59,00	25,00	64,00	62,000
M16	9,11	2,73	2,25	2,08	4,043	4,25	1,38	0,80	0,80	1,808	86,00	24,00	36,00	24,00	42,500	130,00	48,00	78,00	37,00	73,250