

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA
MECÂNICA**

Autor: Maurício Climaco Ferreira

**ANÁLISE COMPARATIVA ENTRE ALARGAMENTO COM
FERRAMENTA DE GUME ÚNICO REGULÁVEL E
MANDRILAMENTO EM FERRO FUNDIDO NODULAR GGG40**

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

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

Florianópolis
2011

Maurício Climaco Ferreira

**ANÁLISE COMPARATIVA ENTRE ALARGAMENTO COM
FERRAMENTA DE GUME ÚNICO REGULÁVEL E
MANDRILAMENTO EM FERRO FUNDIDO NODULAR GGG40**

Esta Dissertação foi julgada adequada para obtenção do Título de Mestre em Engenharia Mecânica e aprovada em sua forma final pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica.

Florianópolis, 2 de Setembro de 2011.

Prof. Júlio César Passos, Dr.
Coordenador do Curso

Banca Examinadora:

Prof. Rolf Bertrand Schroeter, Dr. Eng.
Orientador

Prof. Walter Lindolfo Weingaertner, Dr.-Ing.

Prof. João Carlos Espíndola Ferreira, Ph.D.

Prof. Joel Martins Crichigno Filho, Dr.-Ing. (UDESC)

A minha esposa Nicole pelo apoio incondicional e aos meus pais, Climaco e Valda.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a DEUS

Ao professor Rolf Bertrand Schroeter, Dr. Eng., pela oportunidade e pelo profissionalismo como professor e orientador, cujo incentivo e motivação foram indispensáveis para realização deste trabalho.

Agradeço à Schulz S.A. divisão automotiva e compressores pelo fornecimento de materiais, ferramentas e recursos financeiros, em especial ao Eng. Cleber Medeiros Rodrigues pelo incentivo e motivação.

Aos amigos Edinelson Nascimento, Jonas Machado e Marcos Amâncio pelo companheirismo nas atividades diárias e apoio na realização dos ensaios.

Aos colegas Leandro Paulo de Azevedo e Diego Gabriel da Costa do laboratório dimensional pela ajuda para realização das medições.

A UFSC e ao LMP-Laboratório de Mecânica de Precisão por toda estrutura e suporte técnico.

“Mais que máquinas, precisamos de humanidade. Mais que inteligência, precisamos de afeição e doçura. Sem essas virtudes a vida será de violência e tudo estará perdido.”

(Charles Chaplin, 1940)

RESUMO

A fabricação de produtos com melhor desempenho e com custo competitivo se mostra premissa básica para a permanência das indústrias manufatureiras no mercado global. Desta forma a obtenção destas características começa desde o projeto do componente, com a correta especificação dos materiais, dimensionamentos e escolha de tolerâncias dimensionais e de forma adequada até sua fabricação. O desenvolvimento de novas máquinas com sistemas de controle cada vez mais precisos, ferramentas com características geométricas especiais e materiais com maior resistência ao desgaste, vêm contribuindo para o estreitamento das tolerâncias de projeto do produto provocando o aumento do desempenho e vida do mesmo. Uma característica encontrada neste tipo de produto é a presença de furos de precisão com tolerâncias dimensionais e geométricas estreitas, sendo que sua fabricação pode ser realizada por diversos tipos de processos, como por exemplo, o alargamento e de mandrilamento de precisão. Estes processos são amplamente empregados na fabricação de componentes de média e alta complexidade utilizando centros de usinagem com controle numérico computadorizado. Para melhor aproveitamento destes recursos é importante o conhecimento dos parâmetros envolvidos em todo o sistema, pois desta forma é possível obter processos estáveis e econômicos. O presente trabalho tem como objetivo avaliar e comparar a influência que os parâmetros de usinagem (velocidade de corte, profundidade de corte e velocidade de avanço) exercem sobre os resultados de trabalho (circularidade, cilíndricidade, rugosidade e variação dimensional) no processo de alargamento com ferramentas de gume único regulável e no processo de mandrilamento com cabeçote de excentricidade regulável na usinagem de ferro fundido nodular GGG40. Tal estudo visa contribuir na seleção do processo e parâmetros de usinagem mais adequados para obtenção de furos de precisão de acordo com as especificidades de cada método, permitindo desta forma obter produtos dentro das características técnicas e econômicas requeridas. Os resultados obtidos nos ensaios mostraram a influência dos parâmetros de entrada escolhidos sobre a qualidade dos furos, identificando as variáveis mais significativas para cada aspecto avaliado, bem como sua interdependência com a relação qualidade *versus* produtividade em ambos os processos.

Palavras-chave: Alargamento, mandrilamento, ferro fundido nodular, qualidade dimensional, desvios de forma.

ABSTRACT

Product's manufacturing with improved performance and competitive costs is a basic premise to successful permanence of manufacturing companies in today's global market. Therefore the obtainment of these characteristics starts right from the project of the component, with the correct specification of materials, good choice and specification of geometric and dimensioning tolerances up to the end of the manufacturing process. The development of new machinery with ever increasing precision control systems, tools with especial geometric characteristics and materials with higher wearing resistance are contributing to allow closer tolerances for the project's product, leading to increased performance and working life. A feature found in this type of products is the presence of precision bores with dimensional and geometric reduced tolerances, in this way the manufacturing process can be executed using a number of different process, for example reaming and precision boring. These processes are widely applied in the production of middle to high complexity products, using CNC machining centers. To take advantage of these resources, it's important to have knowledge of parameters involved in all the system, in this way, stable and economic processes are attainable. The goal of this work is to evaluate and compare the influence that the machining parameters (cutting speed, cutting depth and feed speed) exert on the work's final results (roundness, cylindricity, roughness and dimension quality) in the reaming processes using unique adjustable cutting edge tools and in the precision boring processes with adjustable eccentricity heads when machining nodular cast iron GGG40. Such a study aims to contribute in the selection of the most appropriate process and machining parameters to obtain precision bores matching with each method's specificities. This allows manufacturing products within the required technical and economical characteristics. The end results obtained in the tests showed the influence of the input parameters chosen over the quality of the bores, by identifying the most significant variables corresponding to each evaluated aspect and also, by its interdependence with the relation quality versus productivity in both processes.

Keywords: Reaming, boring, nodular cast iron, dimensional quality, form deviations

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Classificação das especificações geométricas de produto conforme as normas do sistema ISO – GPS (<i>Geométric Product Specification</i>) [4].	30
Figura 2: Desvio de circularidade [4].	31
Figura 3: Representação de cilíndricidade [5].	32
Figura 4: Representação convencional de um campo de tolerância [15].	33
Figura 5: Elementos que compõe a superfície [17].	34
Figura 6: Sistema E para avaliação da rugosidade de superfície [17].	35
Figura 7: Conceitos básicos na avaliação de superfícies [18].	35
Figura 8: Definição da rugosidade R_a [17].	36
Figura 9: Definição da média da rugosidade R_z [18].	36
Figura 10: Definição da rugosidade R_t [17].	37
Figura 11: Seção esquemática de uma superfície de aço usinada [19].	37
Figura 12: Cinemática do processo de alargamento [9].	39
Figura 13: Perfil de rugosidade nos processos de mandrilamento (a) e alargamento (b) [11].	39
Figura 14: Componentes de força em um alargador de gume único regulável.	40
Figura 15: Divisão desuniforme dos dentes [20].	41
Figura 16: Alargador de gume único regulável [11].	41
Figura 17: Componentes do alargador de gume único regulável [21].	42
Figura 18: Sistema hidrodinâmico de um alargador de gume único regulável.	43
Figura 19: Nomenclatura do alargador [7].	44
Figura 20: Tipos de entradas [20].	45
Figura 21: Geometria das lâminas [11].	46
Figura 22: Tipos de hélices [7].	47
Figura 23: Tipos de mandrilamento [3].	48
Figura 24: Componentes da força de usinagem no mandrilamento [2].	49
Figura 25: Exemplo de barra de mandrilar com insertos de metal-duro.	50
Figura 26: Tipos de barra de mandrilar (a) com ajuste na cápsula (b) com sistema excêntrico na ferramenta [25].	51
Figura 27: Característica de mandrilador com guia (a) e sem guia (b).	51
Figura 28: Ajuste por mudança de plano de movimento [3].	52
Figura 29: Cabeçote mandrilador com sistema para balanceamento [3].	53

Figura 30: Componentes de um cabeçote mandrilador micrométrico [25].....	54
Figura 31: Comportamento do custo de fabricação e comportamento das parcelas isoladas de custos em dependência da velocidade [18].....	55
Figura 32: Efeito da velocidade de corte sobre a rugosidade [26].	56
Figura 33: Efeito da velocidade de corte sobre a dimensão do diâmetro [26].....	56
Figura 34: Rugosidade em função da velocidade de corte e do tempo de usinagem segundo Böttger <i>apud</i> Polli [2].....	57
Figura 35: Efeito da velocidade de corte sobre a força de corte para diferentes tipos de aços [28].	58
Figura 36: Rugosidade em função do avanço e do tempo de usinagem [3].....	59
Figura 37: Efeito do avanço sobre a potência consumida [26].	60
Figura 38: Influência da profundidade de corte sobre a cilindricidade [26].....	61
Figura 39: Rugosidade em função da profundidade de corte para diferentes tempos de usinagem [3].	62
Figura 40: Efeito da profundidade de corte sobre as componentes de força [18].	62
Figura 41: Aspecto micrográfico de ferro nodular [33].	67
Figura 42: Micrografia do corpo de prova após polimento (100x).	71
Figura 43: Micrografia do corpo de prova após ataque químico (100x).	71
Figura 44: Alargador utilizado nos ensaios.....	72
Figura 45: Geometria da lâmina do alargador.....	73
Figura 46: Ferramenta de mandrilar utilizada nos ensaios.....	74
Figura 47: Representação esquemática do inserto utilizado no mandrilamento.	74
Figura 48: Máquina utilizada nos ensaios.....	75
Figura 49: Equipamento para verificação da regulagem de alargados de lâminas ajustáveis.	76
Figura 50: <i>Presester</i> utilizado para regulagem do mandrilador.	76
Figura 51: Máquina de medir por coordenadas utilizada nos ensaios... ..	77
Figura 52: Rugosímetro utilizado nos ensaios.	77
Figura 53: Fixação das amostras	78
Figura 54: Detalhe das furações na amostra.	79
Figura 55: Comparação entre rugosidade R_a e R_z para o processo de alargamento.....	85

Figura 56: Comparação entre rugosidade R_a e R_z para o processo de mandrilamento	86
Figura 57: Influência do avanço no alargamento sobre o erro de circularidade.....	88
Figura 58: Influência da velocidade de corte no alargamento sobre o erro de circularidade.....	89
Figura 59: Influência da profundidade de corte sobre o erro de circularidade.....	90
Figura 60: Influência do avanço no alargamento sobre o erro de cilindricidade.....	91
Figura 61: Influência da velocidade de corte no alargamento sobre o erro de cilindricidade.....	92
Figura 62: Influência da profundidade de corte sobre o erro de cilindricidade.....	93
Figura 63: Influência do avanço no processo de alargamento sobre a rugosidade.....	94
Figura 64: Influência da velocidade de corte no alargamento sobre a rugosidade.....	95
Figura 65: Influência da profundidade de corte sobre a rugosidade.....	95
Figura 66: Influência do avanço no alargamento sobre a variação dimensional.....	96
Figura 67: Influência da velocidade de corte no alargamento sobre a variação dimensional.....	97
Figura 68: Influência da profundidade de corte no alargamento sobre a variação dimensional.....	98
Figura 69: Influência do avanço no mandrilamento sobre o erro de circularidade.....	99
Figura 70: Influência da velocidade de corte no mandrilamento sobre o erro de circularidade.....	100
Figura 71: Influência da profundidade de corte no mandrilamento sobre o erro de circularidade.....	101
Figura 72: Influência do avanço no mandrilamento sobre o erro de cilindricidade.....	102
Figura 73: Influência da velocidade de corte no mandrilamento sobre o erro de cilindricidade.....	103
Figura 74: Influência da profundidade de corte sobre o erro de cilindricidade.....	104
Figura 75: Influência do avanço no mandrilamento sobre a rugosidade.....	105
Figura 76: Influência da velocidade de corte sobre a rugosidade.....	106
Figura 77: Influência da profundidade de corte no mandrilamento sobre a rugosidade.....	107

Figura 78: Influência do avanço sobre a dimensão do furo.	108
Figura 79: Influência da velocidade de corte sobre a dimensão do furo.	109
Figura 80: Influência da profundidade de corte no mandrilamento sobre a dimensão do furo.....	110
Figura 81: Análise comparativa para circularidade em função do avanço.	111
Figura 82: Análise comparativa para circularidade em função da velocidade de corte.	112
Figura 83: Análise comparativa para circularidade em função da profundidade de corte.	113
Figura 84: Análise comparativa da cilindricidade em função do avanço.	114
Figura 85: Análise comparativa da cilindricidade em função da velocidade de corte.	115
Figura 86: Análise comparativa da cilindricidade em função da profundidade de corte.	116
Figura 87: Análise comparativa da rugosidade em função do avanço.	117
Figura 88: Análise comparativa da rugosidade em função da velocidade de corte.....	118
Figura 89: Análise comparativa da rugosidade em função da profundidade de corte.	119
Figura 90: Análise comparativa da variação dimensional em função do avanço.	120
Figura 91: Análise comparativa da variação dimensional em função da velocidade de corte.	121
Figura 92: Análise comparativa da variação dimensional em função da profundidade de corte.	122

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Propriedades mecânicas e físicas dos ferros fundidos [34]. ...	66
Tabela 2: Propriedades dos ferros fundidos nodulares conforme a DIN1693 [33].	67
Tabela 3: Composição química do ferro fundido nodular [33].	68
Tabela 4: Composição química (% em massa) do corpo de prova utilizado nos ensaios GGG40.	70
Tabela 5: Caracterização das amostras.	71
Tabela 6: Ensaio de dureza do corpo de prova.	72
Tabela 7: Propriedades mecânicas do corpo de prova.	72
Tabela 8: Características do meio lubri-refrigerante utilizado nos ensaios [35].	75
Tabela 9: Parâmetros de corte utilizados nos ensaios.	81
Tabela 10: Divisão dos grupos de ensaios 1.	82
Tabela 11: Divisão dos grupos de ensaios 2.	82
Tabela 12: Divisão dos grupos de ensaios 3.	83
Tabela 13: Tempos de usinagem para o processo de alargamento e mandrilamento.	123
Tabela 14: Resultados x tempo de usinagem para o alargamento.	124
Tabela 15: Resultados x tempo de usinagem para o mandrilamento.	125

LISTA DE ABREVIATURAS E SÍMBOLOS

A	[mm ²]	Seção de usinagem
A'_α		Flanco secundário
A_α		Flanco principal
<i>ABNT</i>		Associação Brasileira de Normas Técnicas
A_γ		Face
a_p	[mm]	Profundidade de corte
B	[mm]	Espessura do cavaco
D	[mm]	Diâmetro da broca
<i>DIN</i>		<i>Deutsches Institut für Normung</i>
F	[N]	Força de usinagem
F	[mm]	Avanço
F_c	[N]	Força de corte
F_{cGP}	[N]	Força de corte do gume principal
F_{cGS}	[N]	Força de corte do gume secundário
F_f	[N]	Força de avanço
F_p	[N]	Força passiva
f_z	[mm]	Avanço por gume
H	[mm]	Largura do cavaco
<i>HB</i>	[HB]	Dureza Brinell
<i>HV</i>	[HV]	Dureza Vickers
<i>ISO</i>		<i>International Organization for Standardization</i>
<i>IT</i>		Qualidade de trabalho
K_F		Custo de fabricação

K_{Fmin}	unid.	Custo mínimo de fabricação
LSD		<i>Least Square difference</i>
MNR		Martensita não revenida
PCD		Diamante policristalino
P_f		Plano de trabalho
R	[N]	Força resultante
R_a	[μm]	Rugosidade média
R_m	[N/mm^2]	Limite de resistência
$R_{p\ 0,2}$	[N/mm^2]	Limite de escoamento
RQ	[mm]	Raio de quina
$R_{t.th}$	[μm]	Rugosidade teórica
S		Gume principal
S'		Gume secundário
v_c	[m/min]	Velocidade de corte
v_f	[mm/min]	Velocidade de avanço
χ	[$^\circ$]	Ângulo de direção do gume
\emptyset	[mm]	Diâmetro

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	27
2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	30
2.1 QUALIDADE EM FUROS DE PRECISÃO	30
2.1.1 Erros de circularidade	31
2.1.2 Erros de cilindridade.....	32
2.1.3 Tolerância dimensional.....	32
2.1.5 Integridade da superfície	37
2.2 PROCESSO DE ALARGAMENTO.....	38
2.2.1 Características do processo de alargamento.....	38
2.2.1 Tipos de alargadores	40
2.2.2 Geometria dos alargadores.....	44
2.3 PROCESSO DE MANDRILAMENTO.....	47
2.3.1 O processo de corte no mandrilamento	48
2.3.1 Ferramentas de mandrilar	50
2.3.2 Cabeçotes mandriladores de precisão	52
2.4 PARÂMETROS DE PROCESSOS	54
2.4.1 Velocidade de corte	54
2.4.2 Avanço.....	58
2.4.3 Profundidade de corte.....	60
2.5 VIBRAÇÕES NA USINAGEM	63
2.5.1 Vibrações Forçadas	63
2.5.2 Vibrações auto-excitadas	64
2.6 FERROS FUNDIDOS.....	65
2.6.1 Tipos de ferros fundidos	65
2.6.2 Ferro fundido nodular	66

2.6.3 Usinabilidade do ferro fundido nodular	68
3 MATERIAIS, EQUIPAMENTOS E MÉTODOS.....	70
3.1 MATERIAIS.....	70
3.1.1 Caracterização do material utilizado	70
3.1.2 Ferramentas para alargar	72
3.1.3 Ferramenta para mandrilar.....	73
3.1.4 Meios lubri-refrigerantes	74
3.2 EQUIPAMENTOS	75
3.2.1 Máquina-ferramenta	75
3.2.2 Regulagem das ferramentas.....	76
3.2.3 Sistemas de medição.....	77
3.3 MÉTODOS	78
3.3.1 Preparação e fixação das amostras.....	78
3.3.2 Planejamento experimental.....	79
3.3.3 Procedimento experimental	83
3.3.4 Procedimento de medição de erro de forma e dimensional....	84
3.3.5 Procedimento para medição de rugosidade.....	85
3.3.6 Análise estatística.....	86
4 RESULTADOS E DISCUSSÕES	87
4.1 ANÁLISE DOS RESULTADOS NO PROCESSO DE ALARGAMENTO.....	87
4.1.1 Análise da circularidade.....	87
4.1.2 Análise da cilindricidade	90
4.1.3 Análise da rugosidade.....	93
4.1.4 Análise da variação dimensional	96
4.2 ANÁLISES DOS RESULTADOS NO PROCESSO DE MANDRILAMENTO.....	98

4.2.1	Análise da circularidade	98
4.2.2	Análise da cilindridade.....	101
4.2.3	Análise da rugosidade	104
4.2.4	Análise da variação dimensional.....	107
4.3	ANÁLISE COMPARATIVA ENTRE OS PROCESSOS DE ALARGAMENTO E MANDRILAMENTO	110
4.3.1	Análise da circularidade	110
4.3.2	Análise da cilindridade.....	113
4.3.3	Análise da rugosidade	116
4.3.4	Análise da variação dimensional.....	119
4.3.5	Análise de produtividade x qualidade	122
5	CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	127
5.1	CONCLUSÕES.....	127
5.2	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	131
	REFERÊNCIAS	132

1 INTRODUÇÃO

Globalização é uma palavra bastante conhecida que remete a competitividade em nível mundial, busca pela excelência e produto de qualidade. Desta forma, os processos de fabricação vêm se desenvolvendo tecnologicamente de maneira muito rápida, permitindo, com o passar dos anos, produzir mais com menos recursos, se comparados a décadas passadas.

O mercado automotivo é um exemplo clássico dessa situação, pois exige das indústrias de usinagem peças com extrema exatidão e processos de fabricação robustos, que sejam capazes de produzir as peças de forma econômica e estável.

Uma operação crítica e presente nestes tipos de peças é a usinagem de furos de precisão, que apresentam como função principal o ajuste de rolamentos, passagem de pinos-guias e ajustes deslizantes de componentes que garantem o bom funcionamento e rendimento do conjunto como um todo e asseguram sua funcionalidade com segurança dentro do prazo esperado [1]. Existem diversos processos de fabricação para obtenção de furos de precisão dentre os quais podem ser citados o mandrilamento de precisão, alargamento, retificação interna, brochamento, brunimento e outros. Entretanto, podem-se destacar dois deles, o processo de alargamento e o processo de mandrilamento de precisão. Estes processos apresentam características de maior produtividade, facilidade de operação e de não necessitarem de máquinas com funções específicas [2, 3].

O processo de mandrilamento consiste em uma ferramenta rotativa que se desloca segundo uma trajetória determinada, a fim de obter superfícies de revolução, sendo utilizado para operações de desbaste e acabamento. A ferramenta utilizada neste processo é chamada de mandrilador e, para operações de acabamento, a mesma possui regulagem que permitem que sua parte cortante se desloque em relação ao centro de rotação, fazendo com que seu diâmetro se ajuste conforme necessidade ou desgaste do inserto [3]. Entretanto, é necessário que o conjunto da ferramenta seja balanceado, devido à diferente distribuição de massa, fator este que acaba interferindo de forma negativa na qualidade da superfície usinada. Uma vantagem desse processo é que o mesmo permite corrigir pequenos desvios de forma e posição decorrentes da operação de desbaste [4, 2, 3].

A utilização de cabeçotes de mandrilar possibilita uma melhor otimização dos recursos disponíveis em ferramental, uma vez que, por

meio de sua versatilidade e disponibilidade de componentes intercambiáveis (suportes de ferramentas, prolongadores, cápsulas etc.) é possível a sua utilização em uma faixa de diâmetros mais abrangente, em vez de um diâmetro fixo, fazendo com que os respectivos custos provenientes de compra de ferramentas e estoque sejam diminuídos [6].

No processo de alargamento com ferramentas de gume único regulável o elemento cortante também permite o ajuste de posicionamento, porém com valores de diâmetros pré-estabelecidos e conceito de geometria diferente. Os elementos de guias são separados, permitindo assim, um melhor apoio durante a usinagem, todavia com pouca ação corretiva nos desvios ocorridos na operação do acabamento [7, 8, 9, 10].

Uma vantagem desse tipo de ferramenta é o seu efeito “auto-centrante” ocasionado pelas forças de reação nas guias, que anulam as forças passivas do gume permitindo, assim, a usinagem de furos muito profundos e de pequenos diâmetros, que seriam difíceis de serem obtidos por outros processos como, por exemplo, o mandrilamento [7, 11]. Para utilização desse tipo de ferramenta é importante o emprego de um sistema de refrigeração eficiente, pois com o contato das guias na parede do furo favorece o desgaste e a adesão do material da peça nas réguas de guia da ferramenta [12, 9].

O objetivo deste trabalho é o de investigar, com foco em qualidade, o comportamento entre os dois processos citados anteriormente, quais sejam, o mandrilamento e o alargamento com ferramenta de gume único, uma vez que ambos apresentam resultados positivos e negativos em várias aplicações industriais, sendo que os motivos das falhas em suas aplicações muitas vezes não são conhecidos, vindo, desta forma, a ser substituídos sem conhecimento das reais causas.

A motivação para comparação entre ambos os processos é o melhor aproveitamento dos recursos de ferramentais disponíveis na empresa parceira em virtude da significativa parcela de custos que estes tipos de ferramentas representam na empresa. Também objetiva-se a otimização dos processos de usinagem para obtenção de furos de diâmetros menores, visto que este tipo de usinagem se destaca por apresentar um maior índice de problemas de falta de qualidade.

A aplicação deste estudo visa a contribuir nos processos de usinagem de peças automotivas fabricadas em ferro fundido nodular, utilizadas em sistemas de suspensão e transmissão de veículos pesados, onde o principal foco é a obtenção de estabilidade dimensional e de

forma, dos furos com qualidade IT7 e com valores máximos de rugosidade média de $1,6\mu\text{m}$.

O material utilizado nos ensaios foi o ferro fundido nodular GGG40, sendo que a escolha deste material foi motivada pela sua grande aplicação industrial e pela maior dificuldade de obtenção de resultados satisfatórios no que se refere à qualidade e produtividade nos processos da empresa parceira. Outro fator importante é a pouca disponibilidade de pesquisas sobre o tema mandrilamento de precisão ou alargamento com ferramenta de gume único regulável neste material.

Os ensaios foram realizados em um centro de usinagem horizontal na empresa parceira, bem como as medições das variáveis analisadas. Apesar de apresentar importante influência sobre a qualidade da peça, não foi objetivo deste trabalho a verificação da influência do meio lubri-refrigerante sobre os resultados, uma vez que o sistema de alimentação para as máquinas é centralizado e não permite tal variação.

Neste contexto, foi verificada a influência das variáveis de entrada: velocidade de corte, profundidade de corte e avanço para ambos os processos sobre a qualidade do furo, observados a partir da avaliação da rugosidade da superfície, variação do diâmetro dos furos, desvios de cilindricidade e circularidade.

Com os resultados obtidos neste trabalho, foi possível aumentar o entendimento sobre os mecanismos dos processos estudados e identificar as melhores práticas para obtenção de resultados desejados.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 Qualidade em furos de precisão

A qualidade de um produto final depende fortemente de seu projeto e a correta especificação de materiais e características técnicas. Na indústria metal-mecânica estas características são bastante evidenciadas, principalmente em segmentos automobilísticos, automotivos e de máquinas, pois apresentam produtos com alto valor agregado, exigência elevada e com produção em alta escala.

Na grande maioria dos casos, uma característica de um produto não é realizada apenas com a informação de sua dimensão. É necessário prever também o máximo desvio de forma e posição admitido dentro das características do projeto [13].

Uma operação crítica e presente nestes tipos de peças é a usinagem de furos de precisão, que apresentam como função principal o ajuste de rolamentos, passagem de pinos-guias e ajustes deslizantes de componentes que garantem o bom funcionamento e rendimento do conjunto como um todo e asseguram sua funcionalidade com segurança dentro do prazo esperado [1].

A tolerância geométrica de um produto pode ser subdividida em cinco grandes grupos, cada qual com a sua família de característica, conforme pode ser observado na Figura 1. Entretanto este trabalho aborda as características dos desvios de forma e de rugosidade, porém a especificação e abrangência das demais características devem adotadas de acordo com a criticidade e aplicação de cada componente [4].

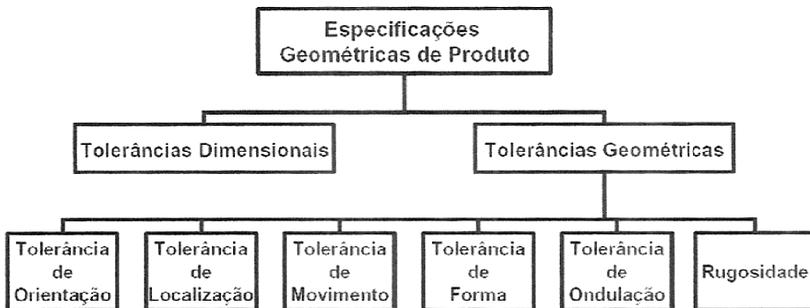


Figura 1: Classificação das especificações geométricas de produto conforme as normas do sistema ISO – GPS (*Geométric Product Specification*) [4].

Os desvios de forma são definidos como o grau de variação da superfície usinada em relação aos sólidos geométricos que os definem e são classificados em retitude, planicidade, cilindricidade, circularidade, forma de uma linha qualquer e forma de uma superfície qualquer [14].

As superfícies sempre apresentam a combinação de erros de forma e posição, porém cada aplicação de um produto define quais destes erros apresentam maior influência sobre o desempenho do produto e quais destes erros devem ser controlados [13].

Na fabricação de peças, não é possível a produção de superfícies ideais. Mesmo que a olho nu possam parecer perfeitas, quando submetidas a uma ampliação, nota-se a presença de sulcos chamados de rugosidade. A rugosidade é inerente ao processo de usinagem e sua intensidade é fortemente influenciada pelo tipo de processo, tipo de ferramenta e parâmetros de usinagem escolhidos.

2.1.1 Erros de circularidade

De acordo com a norma ABNT NBR 6409, tolerância de circularidade é o desvio máximo que uma seção transversal de um cilindro pode apresentar, e é delimitado por dois círculos concêntricos afastados a uma distância “ t ”, que compreende a diferença entre o maior raio R e o menor raio r , conforme mostra a Figura 2.

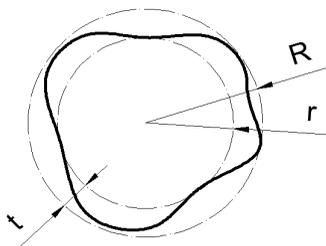


Figura 2: Desvio de circularidade [4].

A medição de circularidade é realizada através de um equipamento chamado circularímetro ou por meio de máquinas de medir

por coordenadas, porém estes equipamentos normalmente encontram-se em ambientes protegidos contra umidade, poeira e em temperatura controlada.

2.1.2 Erros de cilindridade

De acordo com a norma ABNT 6409, entende-se como desvio de cilindridade, um campo de tolerância delimitado por dois cilindros concêntricos de maior e menor diâmetro, que respectivamente tangenciam o maior e menor erro da superfície real em relação à superfície ideal. A diferença radial entre ambos, representada pela letra “ t ”, é o valor da cilindridade, Figura 3.

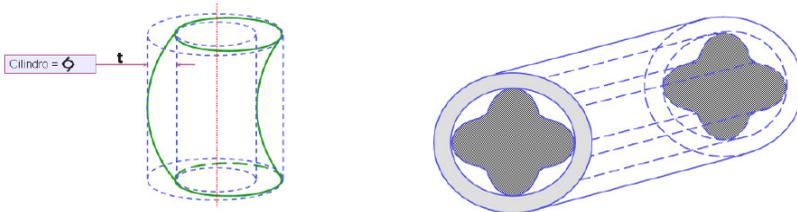


Figura 3: Representação de cilindridade [5].

2.1.3 Tolerância dimensional

Tolerância dimensional é a diferença entre o limite do afastamento superior e o afastamento inferior de uma dimensão em relação ao seu valor nominal. O grau da tolerância define quão estreita será a diferença entre os afastamentos. Esta característica é denominada pelas letras “IT”, que podem ser classificadas de IT01 a IT18, e a sua correspondência em mm é proporcional ao valor nominal da dimensão.

O posicionamento deste grau de tolerância em relação ao valor nominal é representado através de letras e pode ser observado na Figura 4 [15].

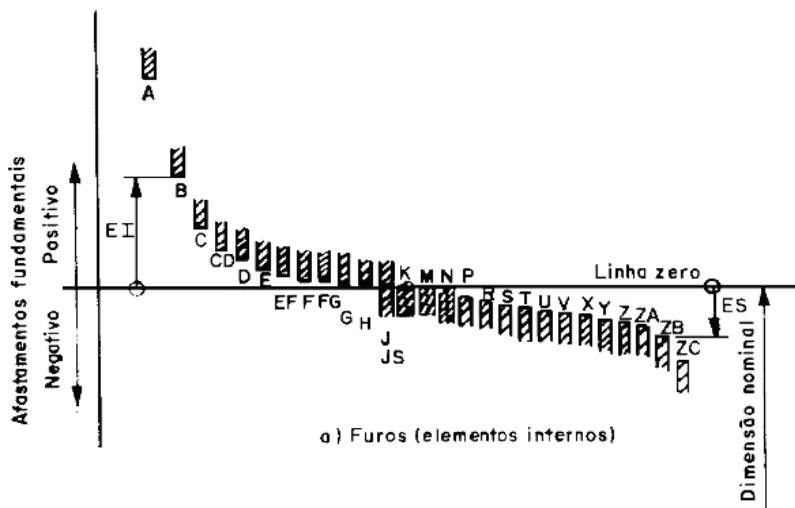


Figura 4: Representação convencional de um campo de tolerância [15].

Furos de precisão para aplicação em componentes de máquinas, automóveis e equipamentos, frequentemente utilizam grau de tolerância IT6 ou IT7 e afastamentos H, J, K, ou M.

2.1.4 Rugosidade

Rugosidade ou também conhecida como textura primária, é um conjunto de irregularidades presente em uma superfície real em relação a uma superfície técnica ou de referência [16].

Em um processo de usinagem, devido a sua característica tecnológica, é inevitável a presença de marcas causadas pelo movimento da ferramenta de corte sobre a peça. Esses erros microgeométricos, denominados de rugosidade, se apresentam em conjunto com outros erros classificados como macrogeométricos, também conhecidos como ondulações e desvios de forma.

Estas ondulações são provocadas por vibrações, instabilidade da máquina-ferramenta, ou deflexões do sistema como um todo [1]. A Figura 5 mostra a secção de uma peça onde apresenta-se a combinação de três elementos de erro em uma superfície, a rugosidade (a), ondulação (b) e o erro de forma (c) após a filtragem de cada elemento por meio de equipamentos apropriados.

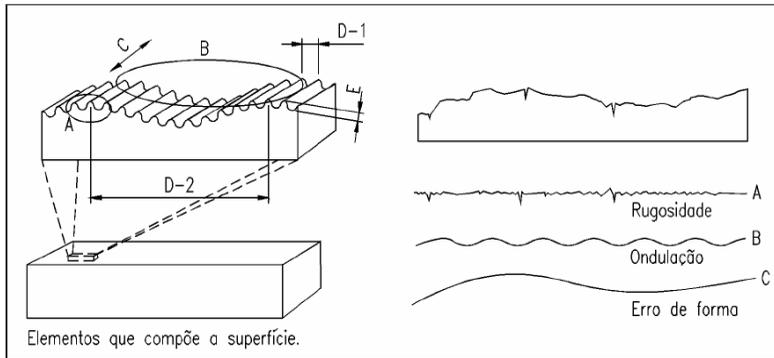


Figura 5: Elementos que compõe a superfície [17].

a) Sistemas de medição: é o sistema padrão utilizado para medição da rugosidade. Existem dois sistemas de medições: o sistema de linha média M e o sistema envolvente E.

O sistema M é o mais difundido mundialmente e utiliza como referência de medição uma linha média disposta paralelamente à direção geral do perfil, onde a soma da área superior a esta linha é igual à soma da área inferior à mesma.

O sistema E é utilizado em poucos países e baseia-se no deslocamento de dois círculos de raios diferentes R e r sobre a superfície da peça, os percursos gerados pelo centro destes dois círculos dentro de um comprimento de medição, formam duas curvas, que são referências para as medições neste sistema, conforme pode ser observado na Figura 6 [17].

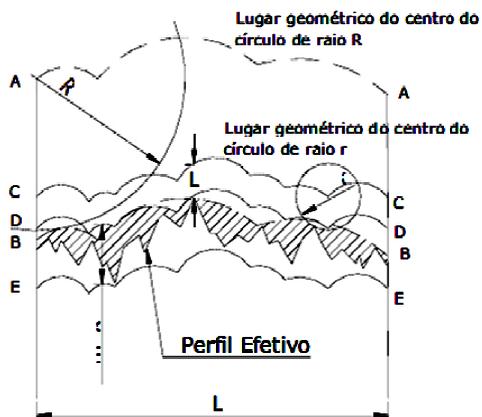


Figura 6: Sistema E para avaliação da rugosidade de superfície [17].

b) Parâmetros de rugosidade: a especificação da rugosidade permitida em uma superfície está fortemente ligada à aplicação funcional da mesma, de tal forma que existem diversos parâmetros e conceitos acerca deste assunto e seu conhecimento é de fundamental importância em todas as etapas do processo de um produto, desde seu projeto até sua fabricação. Estes conceitos podem ser observados na Figura 7.

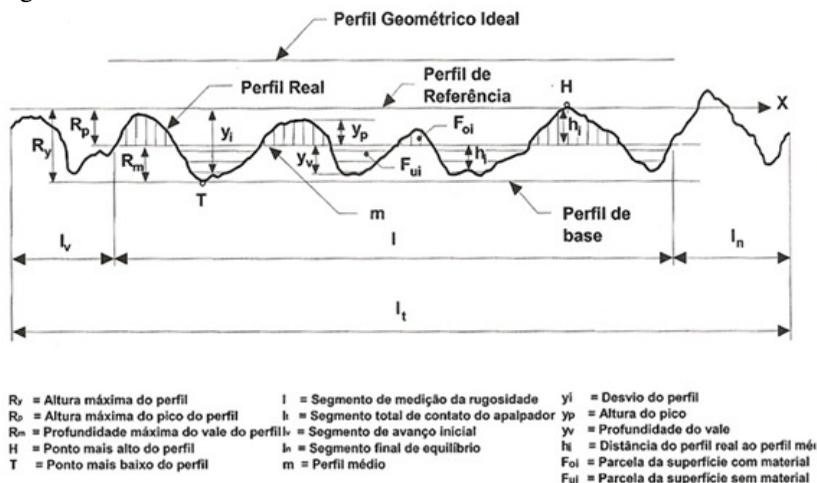


Figura 7: Conceitos básicos na avaliação de superfícies [18].

c) Rugosidade R_a : é a média aritmética dos valores absolutos das variações do perfil real y_1 a y_n em relação à linha média, dentro do

segmento de medição da rugosidade l_m (Figura 8). Este parâmetro ainda é muito utilizado devido à sua facilidade de cálculo mesmo com equipamentos simples, porém não esclarece a ordem de grandezas dos diferentes valores locais da rugosidade sobre o perfil analisado [1, 17, 18].

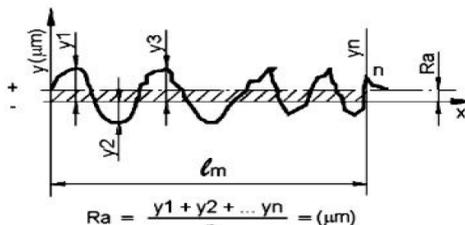


Figura 8: Definição da rugosidade R_a [17].

d) Rugosidade R_z : é definida como sendo a média aritmética das rugosidades singulares Z_i dos cinco trechos de medição. As rugosidades singulares são definidas como a soma dos valores absolutos do maior afastamento superior e inferior em relação à linha média dentro de um comprimento de amostragem l_e , conforme Figura 9.

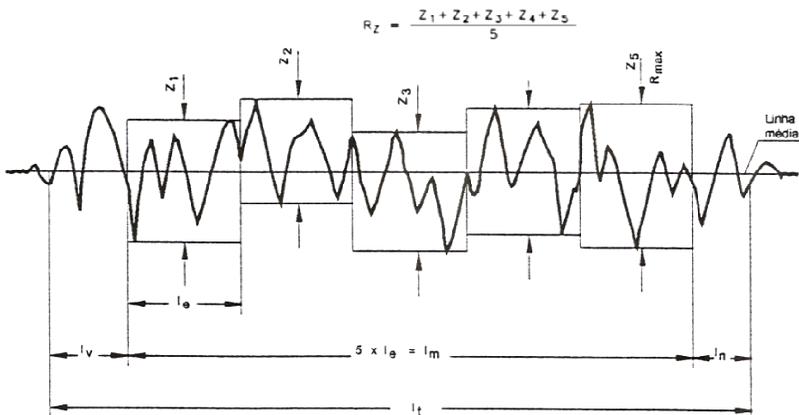


Figura 9: Definição da média da rugosidade R_z [18].

e) Rugosidade R_t : é definida como sendo a distância entre o pico mais alto h e o vale mais profundo t dentro do segmento total de

medição da rugosidade, independente de qual comprimento de amostragem os mesmos estejam, Figura 10.

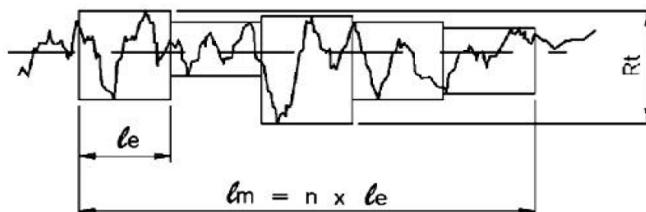


Figura 10: Definição da rugosidade R_t [17].

2.1.5 Integridade da superfície

Durante o processo de usinagem de um material, a região de corte é submetida a altas pressões e temperaturas. Nesta condição é comum o aparecimento de alterações nas camadas dispostas ligeiramente abaixo da superfície. Estas alterações afetam o que se chama de integridade da superfície e se apresentam na forma de transformações microestruturais, tensões residuais, alteração na dureza e a presença de zona afetada termicamente [19]. A Figura 11 mostra as camadas das superfícies de um componente e seus possíveis defeitos de integridade e textura.

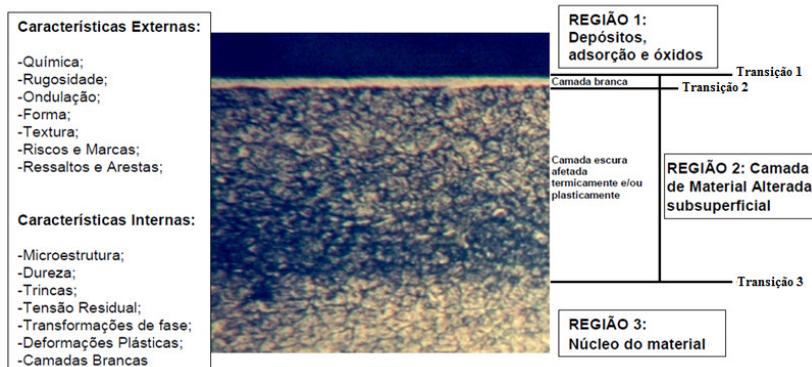


Figura 11: Seção esquemática de uma superfície de aço usinada [19].

O processo de usinagem e as condições de usinagem favorecem significativamente o surgimento de alterações na integridade da

superfície e fazem com que a resistência à fadiga do componente seja inversamente proporcional à taxa de remoção de material utilizada e a energia empregada para a usinagem do mesmo [19].

A camada branca é um termo utilizado para caracterizar uma região da superfície altamente endurecida e frágil quando comparada à dureza original do material, e tem este nome em decorrência de seu aspecto branco e da presença de martensita não revenida *MNR*. A camada branca está associada ao processo de retificação há muito tempo, pois este processo tem como característica o emprego de muita energia para remoção do material e o fluxo de calor para a peça é de maior intensidade, se comparado a processos como torneamento e fresamento [18, 19].

2.2 Processo de alargamento

O processo de alargamento é um processo de usinagem fina, no qual através de uma ferramenta de geometria definida após uma prévia operação de desbaste, é possível obter diâmetros com alta qualidade de superfície, precisão dimensional e de forma, desde que fatores como condições iniciais do furo, fixação da peça e estabilidade da máquina-ferramenta sejam considerados.

2.2.1 Características do processo de alargamento

A operação de alargamento se caracteriza pela pequena quantidade de material removida, o que exige uma ferramenta com geometria bem peculiar, tendo em vista que este processo segue a linha de centro da operação de desbaste, após o emprego de processos como furação, mandrilamento e outros [7, 8].

A obtenção de furo cônico também é possível com a aplicação de alargadores, que neste caso dispõe de geometrias exclusivas para desbaste e para acabamento. A Figura 12 apresenta o tipo conceitual de alargador onde pode ser observado que a retirada de material é realizada com os chanfros presentes na entrada do alargador.

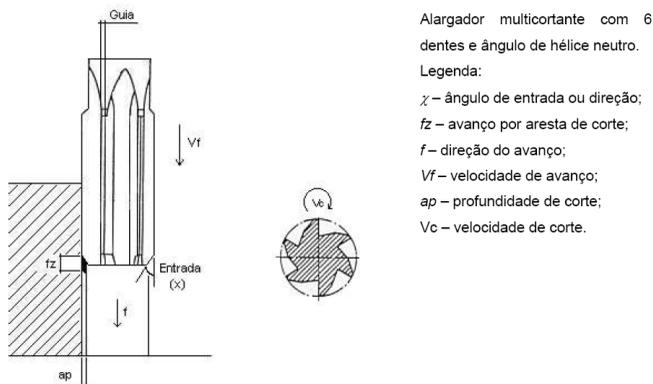


Figura 12: Cinemática do processo de alargamento [9].

Os alargadores possuem uma ou mais arestas de corte, sendo os multicortantes inteiriços ou com lâminas brasadas no corpo da ferramenta e os mono cortantes com corpo separado permitindo assim ajustes com relação ao seu diâmetro.

A Figura 13 mostra um perfil de superfície gerada pelo processo de mandrilamento (a) e outra no processo de alargamento (b). É possível observar que no mandrilamento o perfil teórico deixado na superfície é uma relação entre o raio do inserto e o avanço utilizado. Se comparado ao processo de alargamento observa-se que neste a superfície do furo é ligeiramente alisada em virtude da pequena inclinação entre a aresta de corte secundária e a parede do furo. Este mecanismo é encontrado tanto em alargadores convencionais quanto em alargadores com gume regulável, entretanto, neste último, o efeito é mais acentuado em decorrência dos elementos de guia [11].

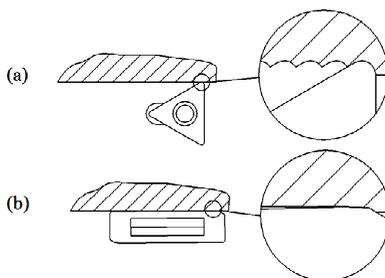


Figura 13: Perfil de rugosidade nos processos de mandrilamento (a) e alargamento (b) [11].

De acordo com a norma DIN6584 *apud* Schroeter [7], a força de usinagem em um dente é denominada F_1 , onde o índice 1 está para o número de gumes da ferramenta. A decomposição desta força em outras componentes individuais é realizada de acordo com cada processo de usinagem e pode ser agrupada em três grupos de vetores: força de corte F_c (atua na mesma direção da velocidade de corte); força de avanço F_f (atua no sentido do avanço da ferramenta) e força passiva F_p (perpendicular à força de avanço).

Para o processo de alargamento com ferramentas de gume único regulável a decomposição destas forças pode ser observada na Figura 14. É possível verificar que a força passiva e a força de corte aplicada no gume provocam forças de reação F_{r1} , F_{r2} e F_{r3} nos elementos de apoio da ferramenta, denominados guia [11].

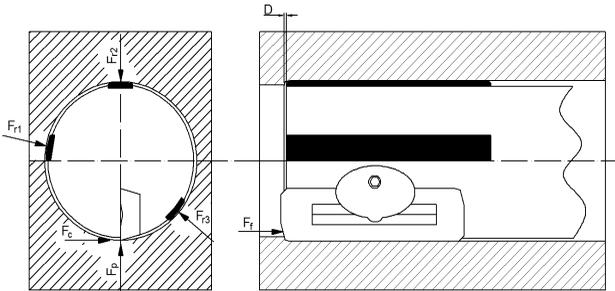


Figura 14: Componentes de força em um alargador de gume único regulável.

2.2.1 Tipos de alargadores

a) Alargadores multicortantes

Compreende as ferramentas que possuem mais de um gume de corte e que estão simultaneamente retirando material à medida que ocorre o avanço. Estas ferramentas normalmente são fabricadas inteiriças no material de corte ou com as lâminas brasadas no corpo da ferramenta, de forma que para estes casos são empregados lâminas de metal duro ou *PCD* [11].

Este tipo de alargador apresenta um número maior de gumes, o que permite trabalhar com maiores velocidades de avanço. A distribuição do gume é realizada de forma irregular, a fim de evitar o

aparecimento de vibrações durante a usinagem, conforme pode ser observado na Figura 15.

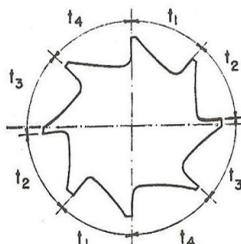


Figura 15: Divisão desuniforme dos dentes [20].

As lâminas possuem um gume principal de corte e um gume secundário. O gume principal é responsável pela maior remoção de material e apresenta um ângulo de entrada conforme o material, sobre-metal e acabamento necessário. Já o gume secundário é responsável pelo acabamento e suas características apresentam forte influência sobre a qualidade do furo, uma vez que este possui em sua superfície de incidência uma ligeira parte cilíndrica que serve como guia para o alargador no momento do corte, fazendo com que a ferramenta siga o eixo existente no pré-furo. Pelo fato desta guia se manter em contato com a parede do furo, a mesma provoca um efeito de alisamento na superfície, de tal forma que reduz os valores encontrados de rugosidade [9].

b) Alargadores de gume único regulável

Este tipo de alargador tem como diferencial a presença de um elemento de guia separado do gume, conforme mostra Figura 16.

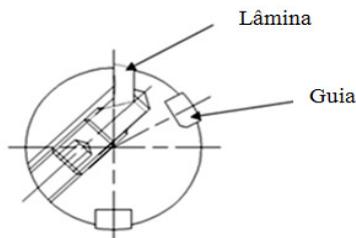


Figura 16: Alargador de gume único regulável [11].

As guias são soldadas no corpo da ferramenta e sua disposição normalmente ocorre com uma situada próxima à lâmina e outra a 180° da mesma. É comum encontrar ferramenta com três e até mais guias, principalmente para diâmetros maiores.

O diâmetro formado pelas guias é conhecido e confeccionado ligeiramente menor do que o furo nominal, pois a mesma servirá como referência para a regulagem da lâmina. Hanna [11] recomenda que as lâminas fiquem de 8 μ m a 15 μ m acima das guias e com uma inclinação de 1 μ m para cada milímetro de comprimento da lâmina.

As lâminas são reguladas por meio de dois parafusos que as deslocam para a extremidade do diâmetro e são fixadas por um grampo conforme mostra a Figura 17. Este mecanismo permite a regulagem da inclinação do gume conforme a necessidade. Schroeter [7] encontrou em seus ensaios de alargamento valores menores de rugosidade para menores inclinações do gume, valores previsíveis, pois com a diminuição da inclinação diminui-se a rugosidade cinemática, fenômeno encontrado também quando aumenta-se o raio da ferramenta nas operações de torneamento e mandrilamento.

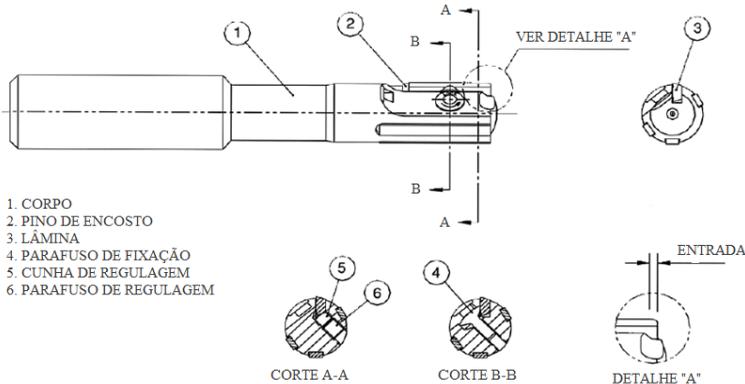


Figura 17: Componentes do alargador de gume único regulável [21].

No processo de alargamento com ferramenta de gume único regulável, o sistema lubri-refrigerante tem uma importância fundamental para obtenção do máximo desempenho deste tipo de ferramenta, pois além de realizar a refrigeração do sistema peça/cavaco/ferramenta, o mesmo é responsável por promover a formação de um mancal hidrodinâmico entre as guias do alargador e a superfície do furo. Desta

forma a vazão, pressão e a viscosidade do fluido empregado podem ter uma contribuição positiva nos resultados.

Santos [9], no alargamento de latão com este tipo de ferramenta, encontrou valores de rugosidade e desvios de forma pequenos utilizando fluidos de corte com alto poder de lubrificação se comparado a fluidos de corte com maior poder de refrigeração. Desta forma a lubrificação das guias das ferramentas interfere na obtenção de furos de precisão, pois o atrito demasiado das guias com a superfície dos furos provoca uma piora considerável na qualidade do furo usinado.

Para garantir a boa lubrificação e manutenção da película de fluido entre a ferramenta e a superfície da peça, algumas ferramentas dispõem de canais de lubrificação desenhados estrategicamente para conduzir o meio lubri-refrigerante do canal central da ferramenta até próximo as guias observando o sentido da velocidade de corte (Figura 18: detalhe a).

Estes canais são estrangulados na sua saída, de forma que uma maior pressão de lubrificação se desenvolva na região, garantindo assim um menor atrito entre as guias e a parede do furo.

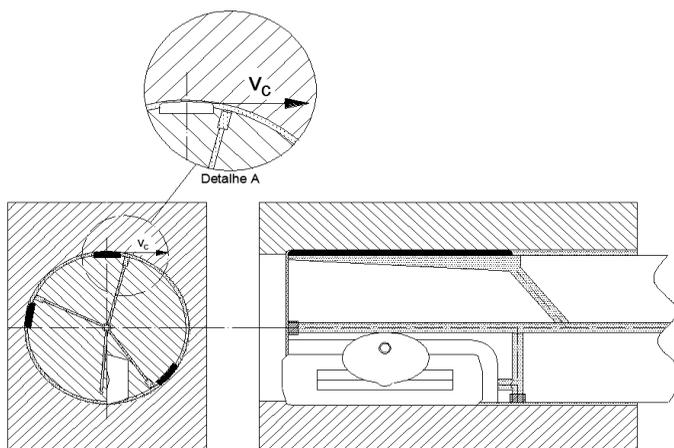
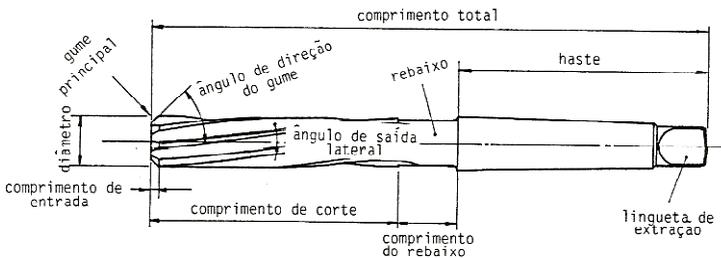


Figura 18: Sistema hidrodinâmico de um alargador de gume único regulável.

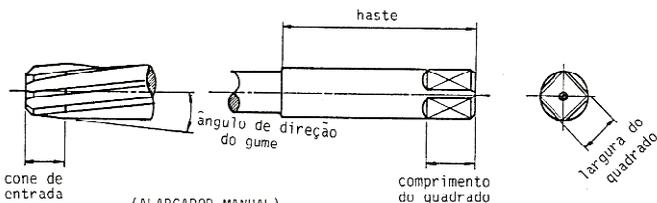
2.2.2 Geometria dos alargadores

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

A Figura 19 mostra de forma genérica a nomenclatura dos alargadores, onde é possível observar o gume principal que apresenta um ou mais chanfros que executam o corte, o comprimento e o ângulo deste chanfro é o que caracteriza a entrada do alargador e sua aplicação. O gume secundário de corte, responsável também pela guia e remoção de cavaco e pode-se apresentar em forma de hélice ou reta. A haste, região onde é fixada a ferramenta pode ser encontrada em forma cilíndrica para fixação em pinças ou adaptadores e cônica para fixação direta no fuso da máquina.



(ALARGADOR PARA MÁQUINA)



(ALARGADOR MANUAL)

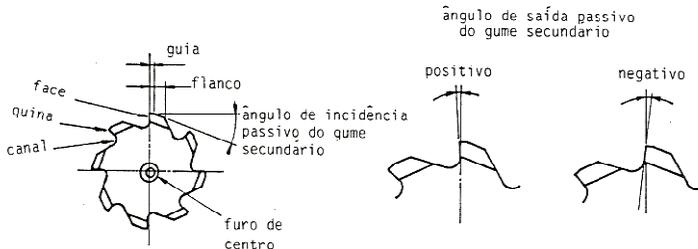


Figura 19: Nomenclatura do alargador [7].

a) Ângulo de entrada

A entrada do alargador define sua aplicação e seus resultados, a Figura 20 mostra diversas configurações de entradas usualmente aplicadas. A Figura 20a possui entrada de 45° , um alargador pode combinar mais de um ângulo de entrada sendo o primeiro para maior retirada de material e o segundo com maior função de acabamento e calibração do furo (Figura 20b e 20c). Santos [9] observou que com o aumento do ângulo de entrada ou de direção (χ) melhora a relação entre espessura e largura do cavaco gerado, que reduz a vibração. Porém para ângulos muito grandes ocorre a piora do acabamento, pois a espessura do cavaco aumenta. É possível também encontrar o tipo de entrada escalonada, onde possui dois diâmetros, o primeiro para guiar o alargador no pré-furo e o segundo para realizar a usinagem (Figura 20d).

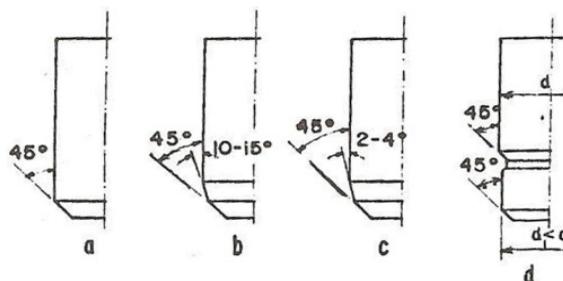


Figura 20: Tipos de entradas [20].

Em alargadores com lâminas reguláveis também é possível observar as configurações de entradas, na Figura 21a e 21b encontram-se lâminas com ângulo de entrada principal pequeno de 15 a 30° e um secundário para acabamento. Estes tipos de lâminas provocam um melhor acabamento devido à maior comprimento de corte em contato com a peça, provocando assim um maior alisamento, porém este tipo de lâmina deve ser utilizado com menor sobre-metal por conta do seu comprimento de corte no gume principal.

A Figura 21c e 21d mostra um maior ângulo de entrada, normalmente aplicado quando existe um maior sobre-metal, sendo que no segundo caso apresenta um gume secundário para o efeito de acabamento. A Figura 21e mostra lâminas com entrada de 90° normalmente empregados quando há a necessidade de faceamento do fundo do furo, onde não é permitida a presença de raio ou com superfície em ângulo.

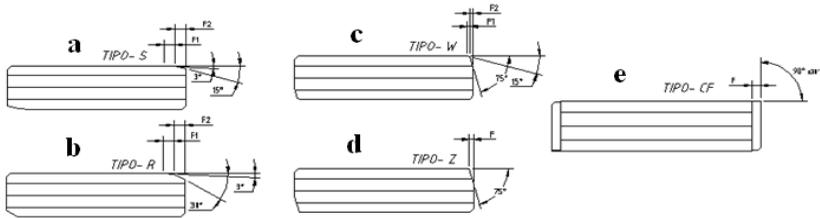


Figura 21: Geometria das lâminas [11].

b) Ângulo de hélice

A superfície de saída de cavaco pode se apresentar de duas formas, reta ou helicoidal. Os alargadores de canais retos (Figura 22a e 22b) são de menor custo e indicados para trabalhos mais precisos. Já para usinagem de furos onde ocorre a presença de corte interrompido os canais helicoidais são mais indicados por apresentarem maior comprimento de contato simultâneo entre as guias e a parede dos furos ocorrendo uma suavização na passagem destes com a superfície interrompida [7, 8, 20].

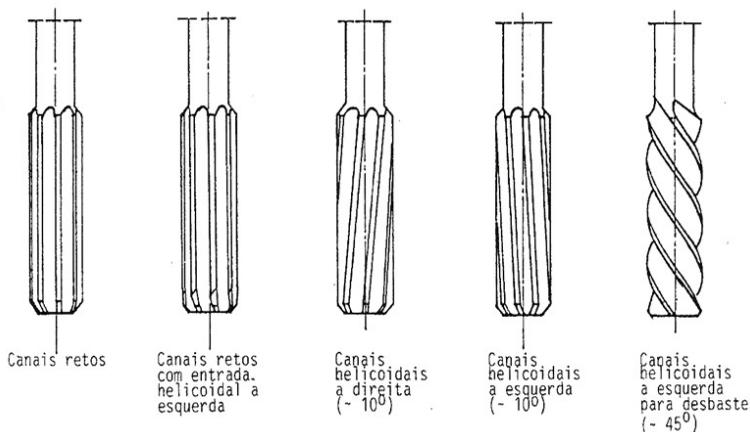


Figura 22: Tipos de hlices [7].

Os canais helicoidais se classificam em direita (Figura 22c) e esquerda (Figura 22d). Alargadores com corte à direita e hlice à direita são indicados para furos cegos, pois devido à sua inclinação mais positiva favorecem que o cavaco seja retirado para fora do furo. Em contrapartida, fica sujeito desta forma a riscos e esmagamento na superfície já usinada, provocado pelo escorregamento do cavaco nesta direção. Outra característica deste tipo de alargador é que o esforço de corte é direcionado no sentido do avanço fazendo com que a folga axial existente no eixo da máquina e na fixação tenha influência sobre o movimento suave de deslocamento, fazendo com que a ferramenta seja puxada para dentro do furo.

A hlice esquerda empurra o cavaco para frente evitando o contato do mesmo com a superfície já usinada e fazendo com que os esforços axiais sejam promovidos contra a fixação da ferramenta eliminando assim possíveis folgas existentes, por conta destas vantagens a hlice esquerda é mais indicada para utilização em casos normais [7].

2.3 Processo de Mandrilamento

Utilizado em operações de desbaste e acabamento, o processo de mandrilamento consiste em usinar um furo já existente utilizando uma ferramenta chamada mandrilador, dotada de movimento de rotação e avanço linear. O processo gera superfícies cilíndricas de revolução e em casos especiais superfícies cônicas ou esféricas de revolução conforme Figura 23 [3].

A concepção inicial para ferramentas de mandrilar foi dada através de uma haste que em sua extremidade alojava apenas um inserto para a usinagem do material, porém apresentando uma série de limitações como, por exemplo, velocidade de avanço, variação do diâmetro com o desgaste e rigidez do sistema ferramenta.

Entretanto, com o desenvolvimento tecnológico, novos conceitos foram atribuídos a este processo a fim de torná-lo viável e mais produtivo. Desta forma foram adicionados mais insertos para o corte, aumentando assim a taxa de remoção de material, ocorreu também o escalonamento dos mesmos com o intuito de permitir a operação de pré-desbaste, desbaste e acabamento em uma mesma ferramenta diminuindo tempos improdutivos do processo pela necessidade de excessivas trocas de ferramentas, foram incluídos sistemas de regulagens, o que permitiu compensar o desgaste dos insertos mantendo a tolerância dimensional com até μm de precisão, entre outros desenvolvimentos [4].

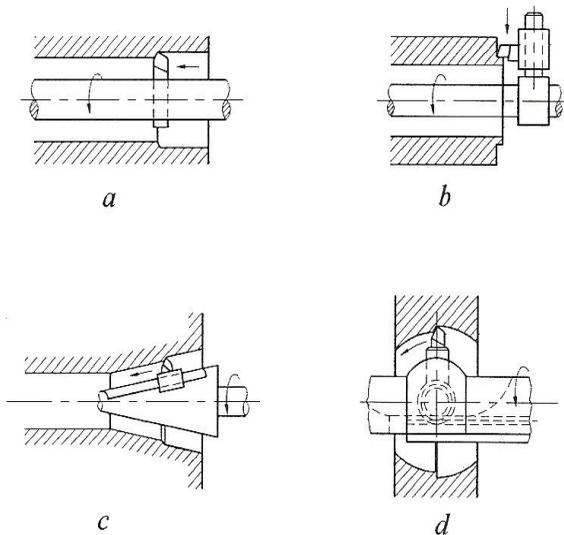


Figura 23: Tipos de mandrilamento [3].

2.3.1 O processo de corte no mandrilamento

No processo de mandrilamento a cinemática é semelhante à que ocorre no processo de torneamento, porém no mandrilamento o movimento de rotação é dado pela ferramenta. Desta forma é possível identificar as forças envolvidas no processo e decompô-las em força de

corde, força passiva e força de avanço. A Figura 24 representa o esquema de forças no mandrilamento.

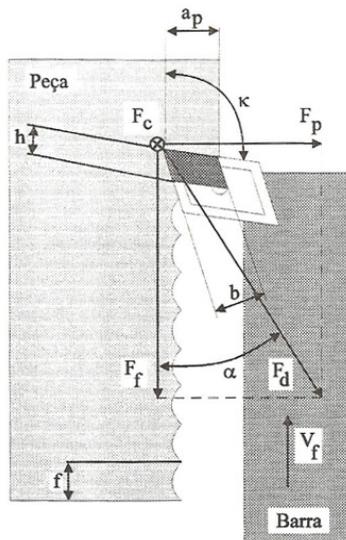


Figura 24: Componentes da força de usinagem no mandrilamento [2].

Estas componentes de força no processo de mandrilamento de precisão devem ser cautelosamente analisadas, uma vez que este processo compreende em uma ferramenta engastada num corpo, sob a ação de forças em sua extremidade, onde se as mesmas estiverem além do que a rigidez corpo-haste possa suportar, pode produzir resultados indesejados provocados pela deflexão da haste e por conseqüência o aparecimento de vibrações durante a usinagem [22]. Por este motivo a correta escolha da ferramenta e principalmente a correta aplicação dos parâmetros de corte devem ser considerados, visto que se trata de um processo bastante preciso, porém muito sensível no que se refere à variação de parâmetros [23].

As variações dos componentes de entrada influenciam uma série de fatores. Com o aumento do ângulo de saída diminui-se a força de corte em decorrência da menor deformação do cavaco. Com um menor ângulo de direção ocorre a diminuição da espessura do cavaco, distribuindo a força de corte sobre uma parcela maior da ferramenta, fazendo com que a força específica de corte diminua, aumentando a vida da ferramenta devido ao menor desgaste da mesma, porém com menor inclinação do gume ocorre o aumento da força passiva, que para o

mandrilamento com único gume pode provocar o aparecimento de vibrações na ferramenta em virtude da sua rigidez [18, 24].

2.3.1 Ferramentas de mandrilar

As ferramentas de mandrilar em uma concepção mais simples constituem de uma barra onde se aloja um inserto com posição, diâmetro e comprimento determinados, no qual não é possível nenhuma regulagem, como mostra a Figura 25. Esta ferramenta, classificada de especial por ser utilizada para uma determinada aplicação, não permite regulagens de altura e de diâmetro, porém por ser desenhada de forma especial, muitas vezes apresentam grande eficiência na taxa de remoção de material, de tal forma que são bastante empregadas no desbaste, operação onde a variação no diâmetro ocasionada pelo desgaste do inserto provoca menos influência na qualidade da peça.

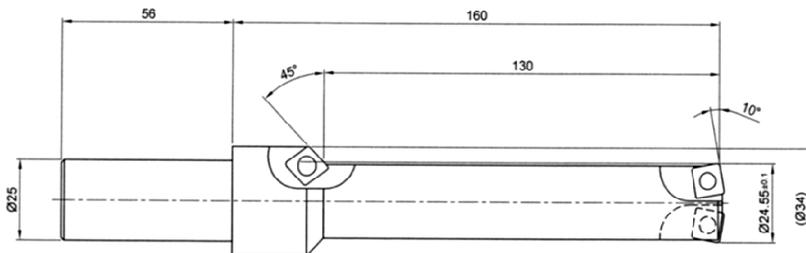


Figura 25: Exemplo de barra de mandrilar com insertos de metal-duro.

Para operações de acabamento é necessária a compensação do desgaste da ferramenta por meio de regulagens, onde são empregados sistemas de excentricidades que apresentam versatilidade e precisão. Estes sistemas podem ser divididos em dois tipos (Figura 26), os que apresentam regulagem apenas pelo movimento da cápsula da ferramenta ou suporte (a) e os que apresentam movimento em seu conjunto (b).

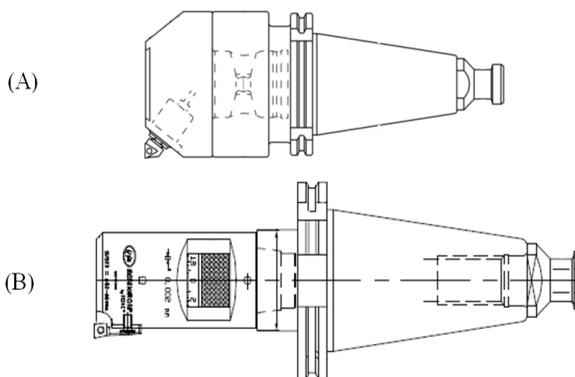


Figura 26: Tipos de barra de mandrilar (a) com ajuste na cápsula (b) com sistema excêntrico na ferramenta [25].

Como nos casos dos alargadores, os mandriladores também podem possuir elementos de guia na sua concepção. Estas guias apresentam a função de direcionar a ferramenta no mesmo eixo da operação anterior, fazendo com que, caso haja erros de posicionamento ou desvio no pré-furo, os mesmos não sejam corrigidos (Figura 27a). Este tipo de ferramenta é normalmente utilizada para operações de pré-acabamento ou acabamento. Pelo fato dos elementos de guia promover o alisamento da parede do furo pela deformação plástica do material, o mesmo confere às peças menores valores de rugosidade e melhores resultados de tolerâncias dimensionais [4].

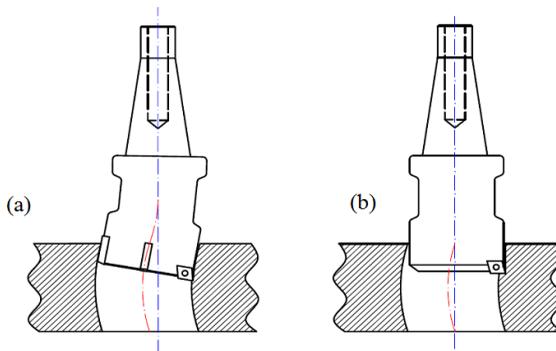


Figura 27: Característica de mandrilador com guia (a) e sem guia (b).

Para mandriladores sem elementos de guia (Figura 27b), é possível a usinagem de furos que apresentem erros de posição ou desvios do eixo da furação sem que a ferramenta siga o desvio da usinagem anterior. Esta característica é positiva, pois evita que a ferramenta seja forçada no alinhamento do pré-furo, porém é observado um aumento da rugosidade, piora dos desvios geométricos de circularidade e cilindricidade e uma maior dificuldade para obtenção de furos com tolerâncias dimensionais mais estreitas se comparada a barras de mandrilar com a presença dos elementos de guias [4].

2.3.2 Cabeçotes mandriladores de precisão

Estes tipos de ferramentas permitem a regulagem da excentricidade de forma rápida e precisa através de diversos tipos de mecanismos de movimentação, podendo ser desde o mais simples por meio de parafuso direto, até com regulagem utilizando de cerâmica piezométrica, como pode ser visto de forma mais detalhada em estudos realizados por Mühle [3].

A Figura 28 mostra o princípio utilizado no ajuste de excentricidade realizado por engaste oblíquo em cabeçotes comumente encontrado na indústria para usinagem de furos de precisão. Esta ferramenta utiliza o conceito de plano inclinado para efetuar a movimentação. Neste sistema com a rotação da bucha *b*, o parafuso *a*, provoca o deslizamento do suporte *c*, que devido ao contato entre as superfícies inclinadas, move a haste *d*, realizando assim o deslocamento excêntrico da ferramenta de corte.

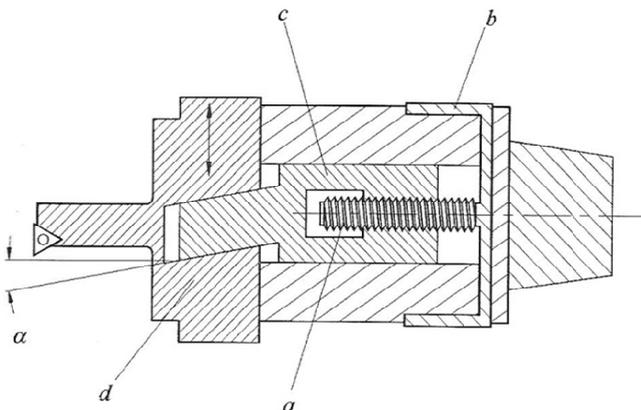


Figura 28: Ajuste por mudança de plano de movimento [3].

Em virtude de haver um deslocamento de massas em relação a um eixo de rotação, o conjunto fica sujeito a vibrações quando este é submetido a movimento de rotação. Desta forma é preciso compensar este desbalanceamento.

Para ferramentas que possuem uma faixa maior de regulação de diâmetro e aplicações mais precisas são necessários sistemas de balanceamento no próprio cabeçote. De acordo com o fabricante, o desbalanceamento ocasiona erros no diâmetro do furo, diminuição da precisão de forma e aumento da rugosidade, que são agravados quando o balanço da ferramenta e a rotação são maiores [3].

A Figura 29 mostra um cabeçote mandrilador com sistema de balanceamento composto por dois contrapesos, onde à medida que aumenta a excentricidade, os mesmos são deslocados em direção oposta. Para o correto posicionamento dos contrapesos o cabeçote mandrilador apresenta divisões angulares em seus anéis que devem ser regulados de acordo com as tabelas dos fabricantes, onde são considerados o tipo de haste utilizada e a excentricidade desejada.

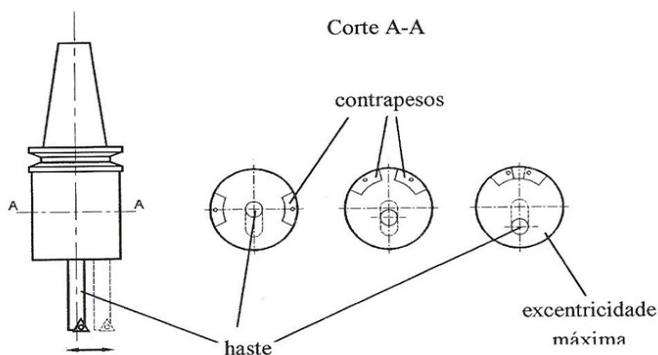


Figura 29: Cabeçote mandrilador com sistema para balanceamento [3].

Como pode ser observado na Figura 30, um cabeçote mandrilador é constituído de: fixação modular *a*, utilizado diretamente no cone ou em adaptadores para o prolongamento do cabeçote, anel de regulação *b*, para ajuste do diâmetro com resolução variando de 0,002 a 0,05mm e curso de 2,5 a 5mm, anéis para balanceamento *c*, que são regulados de acordo com a excentricidade e o tipo de haste *d* utilizada. Esta haste deve ser trocada em função da faixa de diâmetro desejado [3, 25].

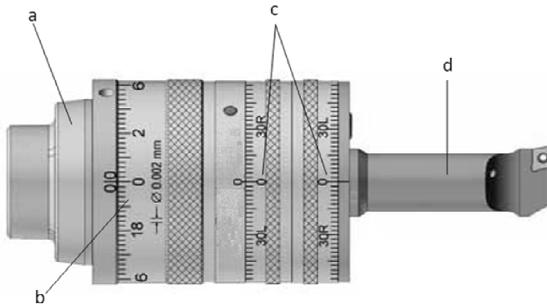


Figura 30: Componentes de um cabeçote mandrilador micrométrico [25].

2.4 Parâmetros de processo

2.4.1 Velocidade de corte

Segundo König [18], velocidade de corte é a velocidade do ponto de referência do gume da ferramenta segundo a direção e o sentido de corte e é definida em função de alguns fatores, sendo eles: material da ferramenta, material da peça, condições da máquina-ferramenta, entre outros.

A velocidade de corte apresenta uma grande importância dentro do processo de usinagem, pois o custo de fabricação e o comportamento dos custos são fortemente influenciados pela mesma, juntamente com o avanço e profundidade de corte.

Como pode ser observado na Figura 31, com o aumento da velocidade de corte até o ponto referente ao custo mínimo de fabricação K_{Fmin} , tem-se uma minimização entre custo principal e custo de ferramenta. Velocidades de corte superiores a este valor provocam um aumento dos custos de fabricação decorrente da diminuição da vida das ferramentas ocasionado pelo excessivo desgaste das mesmas [18].

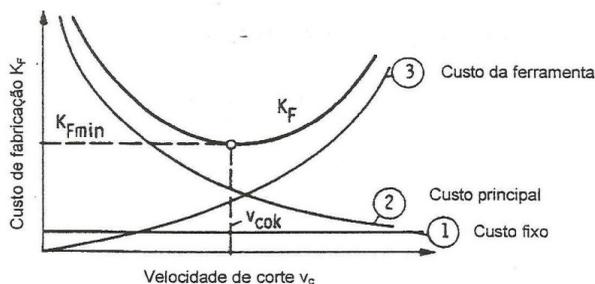


Figura 31: Comportamento do custo de fabricação e comportamento das parcelas isoladas de custos em dependência da velocidade [18].

Com relação à qualidade dos furos, Schroeter [7], no alargamento de liga de alumínio com ferramenta de gume único regulável, não observou diferença significativa nos valores de rugosidade com a alteração da velocidade de corte na faixa de 12 a 37m/min. Borille [8], com alargadores multicortantes na usinagem de ferro fundido cinzento, também obteve resultados semelhantes para velocidades de corte até 27m/min. Já Bezerra [26], no alargamento de liga de alumínio, com velocidades de corte acima de 50m/min, encontrou valores de rugosidade progressivamente maiores com o aumento da velocidade de corte. Tal resultado foi justificado pelo aparecimento de vibração com a utilização de velocidades de corte acima de 50m/min (Figura 32).

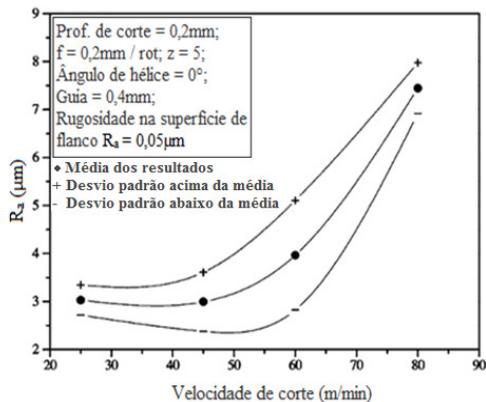


Figura 32: Efeito da velocidade de corte sobre a rugosidade [26].

A Figura 33 mostra o efeito do aumento da velocidade de corte sobre a precisão dimensional no processo de alargamento. O melhor resultado foi encontrado para velocidades menores, de 25 a 45m/min. Acima destes valores ocorre uma tendência de aumento do diâmetro que pode ser explicada pelo surgimento de vibrações e diminuição da estabilidade do conjunto da ferramenta [26].

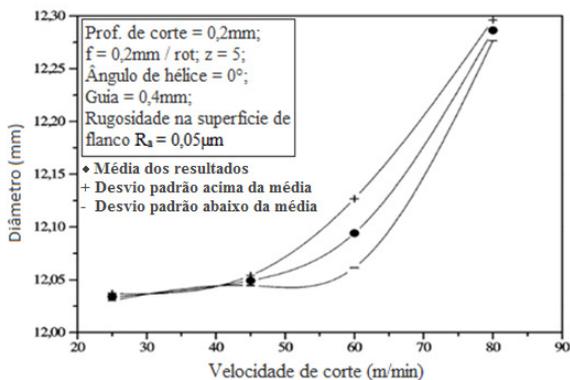


Figura 33: Efeito da velocidade de corte sobre a dimensão do diâmetro [26].

A Figura 34 mostra os valores de rugosidade obtidos para ensaios de mandrilamento em diversas condições de velocidades de corte. De acordo com Böttger *apud* Mühle [3], velocidades de corte acima da

ideal provocam um desgaste prematuro da ferramenta gerando instabilidade no processo e diminuição da qualidade da superfície usinada por conta do surgimento prematuro de sulcos no flanco secundário da ferramenta. Para velocidades de corte menores que 250m/min a rugosidade sofre um aumento em decorrência de um maior recalque. Este fato ocorre em virtude de menores velocidades de corte provocarem uma maior deformação no material e consequentemente um aumento da retirada de grupos de grão isolados [2, 3].

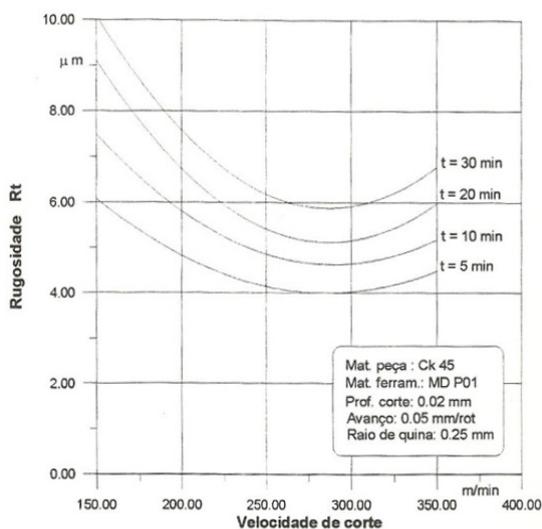


Figura 34: Rugosidade em função da velocidade de corte e do tempo de usinagem segundo Böttger *apud* Polli [2].

Durante o mecanismo de formação de cavaco a cunha da ferramenta de corte penetra no material da peça provocando deformações plásticas e elásticas até que a tensão de cisalhamento atinja seu valor máximo e ocorra o escoamento do material sobre a face da ferramenta [18, 24]. O trabalho mecânico empregado durante este processo é praticamente totalmente transformado em energia térmica, gerada a partir da região de cisalhamento e do atrito nas regiões da ferramenta. A velocidade de corte apresenta forte influência sobre a temperatura gerada na região de usinagem.

Tang [27], em ensaios de mandrilamento, observou que para velocidades de corte maiores, a força de corte encontrada apresentava um considerável decréscimo, fato este justificado pela diminuição da resistência do material usinado, provocada pelo aumento da temperatura na região de corte quando a mesma está submetida a maiores velocidades. Ebrahimi *et al* [28], em seus ensaios de mandrilamento também verificaram o mesmo comportamento da força de corte com o aumento da velocidade de corte para diferentes tipos de aços (Figura 35).

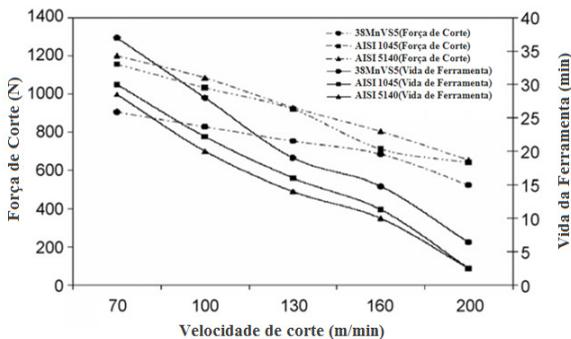


Figura 35: Efeito da velocidade de corte sobre a força de corte para diferentes tipos de aços [28].

2.4.2 Avanço

O avanço tem impacto direto no desgaste do gume e nos componentes da força, de tal forma que com o incremento do mesmo ocorre um aumento significativo das componentes da força de usinagem. A escolha do avanço depende do tipo de ferramenta, do sobre-metal e do acabamento desejado [8].

O avanço apresenta um papel importante no acabamento da superfície da peça, pois em grande parte determina a rugosidade a ser atingida. A rugosidade teórica se apresenta inversamente proporcional ao raio de ponta da ferramenta e diretamente proporcional ao avanço utilizado (Equação 1). Entretanto, no alargamento com ferramentas de gume único regulável, Schroeter [7] e Kress [29] observaram que outros fatores, tais como diminuições da inclinação da lâmina e do ângulo de entrada, se mostraram bastantes importantes para obtenção de menores valores de rugosidade.

$$R_{t.th} = \frac{f^2}{8r_e} \quad (1)$$

Brammertz *apud* Mühle [3] e Polli [2], em ensaios de mandrilamento, observou que para valores de avanços muito baixos a rugosidade apresentava uma tendência de crescimento (Figura 36), resultado que foi explicado com a teoria do cume do cavaco. Segundo tal teoria, a usinagem com avanço e espessuras de corte muito pequenas não permite a formação do cavaco, uma vez que com espessuras de corte menores que a espessura mínima h_{\min} , o material é deformado plasticamente ao invés de cisalhado. Desta forma, esta porção de material não removido forma os picos de rugosidade, que são os responsáveis pela piora na qualidade da superfície obtida [3].

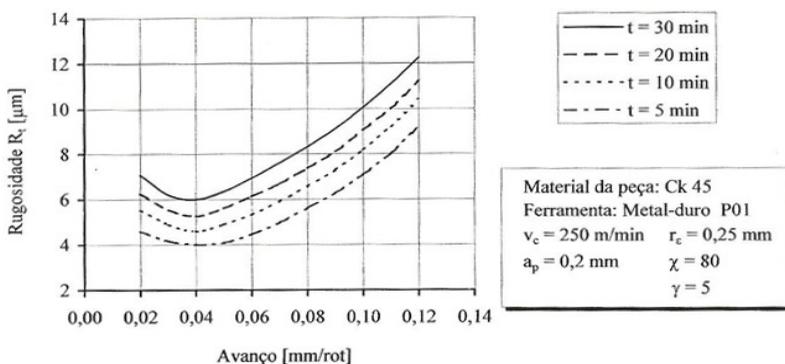


Figura 36: Rugosidade em função do avanço e do tempo de usinagem [3].

Com o aumento do avanço ocorre o aumento das forças de corte, força passiva e força de avanço, efeito ocasionado pelo aumento da seção do cavaco provocando um maior consumo de potência da máquina, como pode ser observado na Figura 37 através de ensaios de alargamento em liga de alumínio realizado por Bezerra [18, 26].

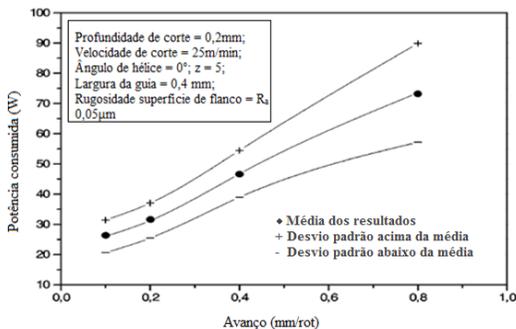


Figura 37: Efeito do avanço sobre a potência consumida [26].

No que se refere à dimensão do diâmetro alargado, Santos [9], na comparação de alargamento com ferramenta de gume único regulável e ferramenta multicortante, observou que para maiores avanços a dimensão do furo se mostra mais próxima à dimensão nominal do alargador, apresentando uma tendência de diminuição no diâmetro à medida que aumenta o avanço para ambas as ferramentas.

Schroeter [7] também encontrou esta tendência para ensaios de alargamento em liga de alumínio, fenômeno que ocorre devido ao maior tempo de contato entre a peça e ferramenta quando a mesma se movimenta com baixos valores de avanço, tendendo desta forma a um aumento do diâmetro.

2.4.3 Profundidade de corte

A profundidade de corte para operações de desbaste deve ser a maior possível, visando obter uma maior taxa de remoção de material, reduzindo desta forma o tempo principal e secundário de usinagem. Porém alguns fatores são limitantes no processo, como a máquina-ferramenta, a ferramenta e a rigidez no sistema peça-ferramenta [24].

Na usinagem de acabamento a profundidade de corte não tem interferência significativa na produtividade, uma vez que este tipo de usinagem se dá em apenas um passe da ferramenta sobre a peça. Entretanto, sob o ponto de vista da qualidade da peça, a profundidade de corte se mostra bastante importante.

Bezerra [26], no alargamento de liga de alumínio, observou que para profundidades de corte menores que 0,2mm os resultados obtidos de rugosidade, cilindricidade e circularidade apresentaram valores insatisfatórios. Tal efeito foi atribuído ao fato de que para pequenas

profundidades de corte a ferramenta em vez de cisalhar o material, a mesma provoca uma deformação plástica, fazendo com que a superfície gerada seja irregular e interfira significativamente nos resultados.

Para valores de profundidade de corte maiores que 0,3mm, como pode ser observado na Figura 38, os resultados de cilindridade também foram insatisfatórios. O motivo para tal, segundo o autor, foi a presença de vibrações provocadas pelo maior esforço de corte.

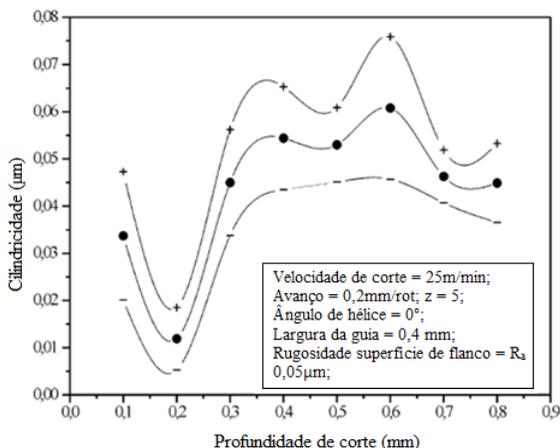


Figura 38: Influência da profundidade de corte sobre a cilindridade [26].

A profundidade de corte, quando em valores relativamente baixos, de acordo com estudos realizados por Bezerra [26], provocam um aumento da cilindridade do furo devido à pequena quantidade de material a ser removida. Desta forma, ocorre a formação de marcas e deformações na superfície do furo.

A profundidade de corte não apresenta influência significativa sobre a rugosidade da peça, salvo quando esta for excessivamente pequena, onde a quantidade de material a ser removida não for suficiente para promover o corte. Assim, o material é deformado plasticamente pelo atrito da ferramenta e gerando uma superfície com maior rugosidade e desvios de forma [18].

Mühle [3] observou, em ensaios de mandrilamento, que para profundidades de corte menores que 0,3mm a rugosidade apresenta uma tendência crescente, e para valores maiores que 0,3mm a rugosidade se

apresenta de forma estável dentro da faixa utilizada, como mostra a Figura 39.

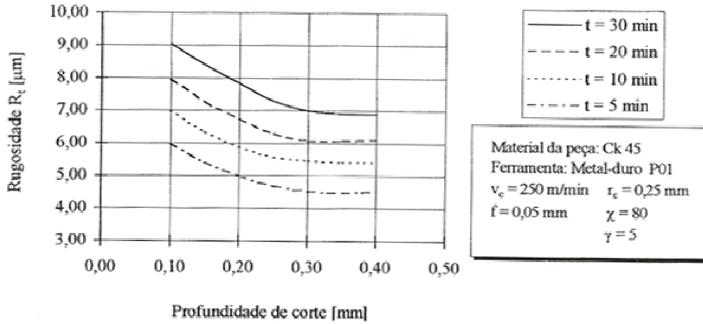


Figura 39: Rugosidade em função da profundidade de corte para diferentes tempos de usinagem [3].

Pelo fato de a força de corte ser diretamente proporcional à largura do cavaco b , ocorre um aumento da força de corte à medida que aumenta a profundidade de corte, de tal forma que suas componentes como força passiva e força de avanço também são influenciadas, conforme mostra a Figura 40.

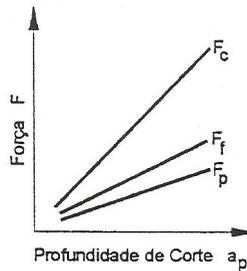


Figura 40: Efeito da profundidade de corte sobre as componentes de força [18].

2.5 Vibrações na Usinagem

A presença de vibrações durante o processo de usinagem implica em uma diminuição da qualidade da superfície bem como na vida da ferramenta. A vibração entre a peça e a ferramenta está invariavelmente presente na usinagem de qualquer material e pode classificar-se em dois grupos: vibrações forçadas e vibrações auto-excitadas [3, 24, 30, 31].

2.5.1 Vibrações Forçadas

Vibrações Forçadas são provenientes da aplicação de forças externas e fazem com que a peça ou ferramenta vibrem com frequência igual à destas forças [24]. As vibrações forçadas podem ser do tipo randômica ou periódica. Entende-se por vibrações randômicas as vibrações cuja força de excitação não apresenta regularidade, ao passo que vibrações periódicas apresentam aplicação de força de excitação em intervalos regulares de tempo [3]. A amplitude de vibração depende em grande parte da relação entre a frequência da força perturbadora e a frequência própria da peça ou da ferramenta [24]. Quando a frequência de excitação externa se aproxima da frequência natural do sistema ferramenta-máquina ocorre o fenômeno conhecido ressonância [32].

Como exemplo de causadores de vibração forçada tem:

a) A usinagem com formação de cavaco tipo cisalhado ou arrancado. Nesta condição a força de corte aumenta no decorrer do tempo até que a tensão de cisalhamento do material seja atingida e este cisalha e rompe. Neste momento a força de corte diminui subitamente para em seguida iniciar um novo ciclo de corte.

b) Realização de usinagem com gume postiço. O fenômeno de crescimento do gume postiço com posterior arrancamento e deslizamento do mesmo na direção do cavaco ou ao longo do flanco da ferramenta é acompanhado por flutuações na força de corte que por sua vez podem gerar o início do processo vibratório [24].

c) Usinagem com corte interrompido ou de superfícies vibradas. No caso do corte interrompido a ferramenta sofre impactos consideráveis que podem levar a vibrações indesejadas. Já no caso na usinagem de superfície vibrada a variação periódica da profundidade de

corte provoca variação da força de corte na mesma frequência que os das ondulações já existente [3, 24].

2.5.2 Vibrações auto-excitadas

De acordo com Steidel *apud* Mühle [3], vibrações auto-excitadas são aquelas que se manifestam sem a presença de uma força externa. Este tipo de vibração surge normalmente quando um sistema elástico sofre um deslocamento, ou lhe é imprimida uma velocidade que pode ser resultante de um impacto.

As vibrações auto-excitadas, ou também conhecidas como vibrações regenerativas, apresentam forte efeito sobre a qualidade da superfície usinada e a vida da ferramenta, além de apresentarem a característica de alto ruído no momento da usinagem. As vibrações regenerativas afetam a produtividade do processo, uma vez que para eliminá-las deve-se reduzir a taxa de remoção de material [3, 30].

Um exemplo causador deste tipo de vibração é a inclusão dura em um material qualquer, onde o contato da ferramenta com esta inclusão pode provocar uma deformação elástica na ferramenta abaixo da sua posição de equilíbrio, e assim se dará início ao processo vibratório. A ferramenta ao descer diminui a velocidade relativa entre a peça-ferramenta, o que conseqüentemente provoca um aumento na força de deflexão. Ao iniciar o retorno elástico a velocidade relativa aumenta e a força de corte diminui, facilitando assim o movimento de subida da mesma ocorrendo o início do movimento de vibração, até que se estabeleça um equilíbrio entre a energia entregue ao sistema a cada ciclo e a energia destruída por amortecimento [24].

Algumas regras práticas podem ser adotadas para a redução da vibração no processo de usinagem, sendo elas:

- Aumento do ângulo de saída γ ;
- Redução do comprimento do gume ativo;
- Aumento da rigidez da ferramenta (maior secção e menor balanço);
- Aumento da rigidez da peça (melhorar fixação da peça).

Atualmente a maior parte das medidas para evitar vibrações se concentra no sentido de aumentar a rigidez dinâmica da ferramenta, tendo como recursos a escolha de material com maior módulo de elasticidade, combinação de material e forma geométrica mais

otimizada, ferramentas com sistema de amortecimentos de vibração, disposição adequada dos insertos e outros [2, 30].

2.6 Ferros Fundidos

De acordo com Chiaverini [33], ferro fundido é uma liga ternária de ferro-carbono-silício, onde os teores de carbono geralmente situam-se acima de 2,0%, em quantidade superior à que pode ser retida em solução sólida na austenita, de modo a resultar carbono parcialmente livre, na forma de veios ou lamelas de grafita.

Dentre as ligas de ferro e carbono, os ferros fundidos constituem um grupo de ligas de fundamental importância para as indústrias, não só pelas características do material, mas também pela sua capacidade de alterar suas propriedades em função da presença de outros elementos de liga e por meio de tratamentos térmicos. Esta característica fez com que o ferro fundido seja utilizado em aplicações que outrora eram exclusivamente aos aços [8].

2.6.1 Tipos de ferros fundidos

De acordo com sua denominação, os ferros fundidos são classificados da seguinte forma:

a) Ferro fundido Cinzento: é o tipo mais utilizado na indústria, pois apresenta a melhor fundibilidade e umas das menores temperaturas de fusão entre as ligas ferrosas. Sua coloração é escura e possui carbono no estado livre em formato de grafita lamelar e também outra parcela no formato combinado, denominado perlita (Fe_3C) [8, 33, 34].

b) Ferro fundido branco: material que apresenta fratura clara e elementos de liga fundamentais como carbono e silício, porém em decorrência das condições do seu processo de fabricação e o seu menor teor de silício, apresenta o carbono praticamente todo na forma combinada (Fe_3C).

c) Ferro fundido maleável: obtido a partir do ferro fundido branco quando submetido a um tratamento térmico denominado maleabilização. Este tratamento coalesce praticamente todo o ferro combinado em grafita na forma de nódulos.

d) Ferro fundido nodular: material cuja estrutura apresenta carbono livre na forma de esferas (nódulos), o que confere ao material elevada ductilidade. Outra denominação para este tipo de material é ferro fundido dúctil.

e) Ferro fundido de grafita compactada: material no qual a estrutura apresenta grafita em forma de plaquetas ou estrias, também conhecido pela denominação “quasi-escama”.

f) Ferro fundido vermicular: material empregado recentemente em grande escala para fabricação de motores a combustão devido à sua grande resistência mecânica se comparado aos ferros fundidos tradicionais. Apresenta grafitas em forma de “vermes”, ou seja, corpo com característica lamelar com as extremidades arredondadas [34].

A Tabela 1 mostra as propriedades mecânicas e físicas dos ferros fundidos cinzento, grafita compacta e nodular.

Tabela 1: Propriedades mecânicas e físicas dos ferros fundidos [34].

Propriedades	Cinzento	Grafita Compacta	Nodular
Resistência a tração (Mpa)	235	500	650
Módulo de elasticidade (Gpa)	110	140	165
Resistência a Fadiga (Mpa)	100	205	265
condutividade Térmica [W/(mK)]	48	38	28
Dureza [HB]	200	225	270
Limite de escoamento 0,2%	160	380	425
capacidade de amortecimento	13,2x10 ⁻⁴	4 a 6 x10 ⁻⁴	2 a 5 x 10 ⁻⁴

2.6.2 Ferro fundido nodular

O ferro fundido nodular caracteriza-se por sua elevada ductilidade, tenacidade e resistência mecânica. O ferro fundido nodular tem como principal diferencial seu elevado limite de escoamento que é maior do que os ferros fundidos cinzentos, maleável e até dos aços comuns, ou seja, os aços sem adição de elementos de ligas.

Com estas características o ferro fundido nodular é utilizado geralmente em componentes de máquinas e peças de veículos onde estão sujeitos a cargas de choque e fadiga.

A Tabela 2 mostra as propriedades dos ferros fundidos nodulares segundo a norma DIN1693.

Tabela 2: Propriedades dos ferros fundidos nodulares conforme a DIN1693 [33].

Classe	Limite de resistência à tração kgf/mm ² (MPa)	Limite de escoamento kgf/mm ² (MPa)	Alongamento (%)	Dureza Brinell	Módulo de elastic. kgf/mm ²	R2sist. ao choque kgf/mm ²	Resistência à flexão kgf/mm ² (MPa)
GGG-45	45 (440)	35 (340)	5	160/240	17.000	2	80/95 (780/930)
GGG-38	38 (370)	25 (250)	17	140/180	↑	10	75/90 (740/880)
GGG-42	42 (410)	28 (270)	12	150/200	16.500	8	80/90 (780/880)
GGG-50	50 (490)	35 (340)	7	170/240	a	6	85/100 (830/980)
GGG-60	60 (590)	42 (410)	2	210/300	18.500	4	90/110 (880/1080)
GGG-70	70 (690)	50 (490)	2	230/320		2	100/120 (1080/1180)

Durante o processo de fabricação deste material, a adição de alguns elementos no metal fundido proporciona a formação de grafitas na forma esferoidal. O principal destes elementos, também chamado de elemento nodularizante, é o magnésio. O magnésio atua como uma espécie de inibidor de curta duração, que retarda a formação inicial de grafita. No processo de solidificação com adição de magnésio, o material solidifica inicialmente na forma de cementita. Na sequência, após o termino do efeito do agente nodularizante, a cementita decompõe-se, produzindo a grafita que se desenvolve por igual em todas as direções, resultando assim numa forma sensivelmente esférica [33].

Na Figura 41 é possível observar a microestrutura de um ferro fundido nodular.

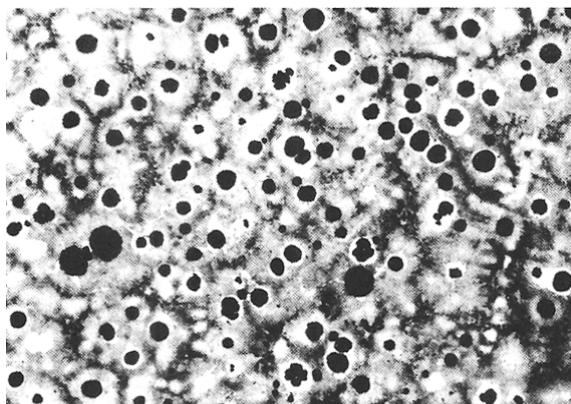


Figura 41: Aspecto micrográfico de ferro nodular [33].

A composição química do ferro fundido nodular é mostrada na Tabela 3:

Tabela 3: Composição química do ferro fundido nodular [33].

Composição do química ferro fundido nodular (%)									
C	Si	Mn	P	S	Ni	Cu	Cr	Mo	Sn
4 máx	1,7-2,8	0,1-0,50	0,10máx	0,01máx	1,0-3,0máx	0,15-1,5	0,3	0,3	0,1

2.6.3 Usinabilidade do ferro fundido nodular

A usinabilidade dos ferros fundidos está fortemente ligada à quantidade e a forma de apresentação da grafita e também à estrutura básica metálica presente.

A grafita presente nos ferros fundidos proporciona uma melhor usinabilidade do material, uma vez que a grafita reduz o atrito entre a ferramenta e a peça e diminui a estrutura metálica básica, o que favorece a formação de cavacos quebradiços, menores força de corte e um maior tempo de vida de ferramenta [18].

Na usinagem do ferro fundido cinzento, a grafita em forma de lamelas favorece o cisalhamento do material. Este fato ocorre em decorrência de suas extremidades pontiagudas permitirem a clivagem no material e a propagação de trincas, fazendo com que o cavaco saia quebradiço e de forma facilitada.

Na usinagem do ferro fundido nodular, tal fenômeno é prejudicado, uma vez que a morfologia da grafita interage de melhor forma com a matriz básica metálica, fazendo com que sua ruptura tenha uma característica mais dúctil em decorrência da menor propagação de trinca ocasionada pela grafita em forma de nódulos [34].

Os elementos de liga podem ser utilizados para obtenção de características desejadas nos ferros fundidos, sendo que a adição de um ou mais elementos contribui de forma positiva ou negativa no ponto de vista da usinabilidade conforme descrito a seguir:

a) Silício: o silício nos ferros fundidos favorece a decomposição dos carbonetos de ferro, funcionando como elemento grafitizante e melhorando a usinabilidade. Em baixa quantidade, aumenta a tendência ao coquilhamento e pode causar a formação de carbonetos em pequenas

secções, piorando a usinabilidade em função da dureza destes elementos [18, 33]. Ferros fundidos com alto teor de silício apresentam dificuldade de fundição e usinagem [18].

b) Enxofre e manganês: a presença de enxofre combinado com manganês melhora consideravelmente a usinabilidade do material em virtude da formação de uma camada lubrificante sobre a superfície de saída de cavaco da ferramenta. Entretanto, no caso do ferro fundido nodular, a presença de enxofre deve ser mantida em níveis baixos, visto que o enxofre dificulta o processo de nodularização na fabricação do ferro fundido nodular quando utilizado magnésio.

c) Fósforo: elemento adicionado nos ferros fundidos em baixos teores, pois acima de 0,3% aumenta o aparecimento de esteatita (ferro e fosfeto de ferro) onde o fosfeto de ferro, por apresentar elevada dureza e fragilidade, acaba prejudicando a usinabilidade do material [18].

3 MATERIAIS, EQUIPAMENTOS E MÉTODOS

Neste capítulo serão descritos os materiais, equipamentos, ferramentas e métodos aplicados na realização dos ensaios, bem como a sistemática utilizada na execução dos mesmos. Os ensaios foram realizados em uma indústria metalúrgica fabricante de peças automotivas.

3.1 Materiais

3.1.1 Caracterização do material utilizado

O material utilizado nos corpos de prova é o ferro fundido nodular GGG40 fundido em forma de placas nas dimensões 420mm x 300mm x 35mm. Este material foi escolhido por sua menor usinabilidade se comparado ao ferro fundido cinzento e por sua grande aplicação em componentes onde características como resistência ao impacto e resistência a fadiga são exigidas, como por exemplo, caixa de direção, virabrequins, bielas e peças do sistema de suspensão de veículos automotivos.

A composição química encontrada no corpo de prova está mostrada na Tabela 4.

Tabela 4: Composição química (% em massa) do corpo de prova utilizado nos ensaios GGG40

Composição do química das amostras (%)									
Carbono	Silício	Manganês	Fósforo	Enxofre	Alumínio	Cobre	Magnésio	Estanho	Chumbo
3,608	2,412	0,193	0,049	0,011	0,014	0,015	0,041	0,016	0,002

A composição química encontrada nos corpos de prova atende às especificações definidas pela norma NBR6589.

A avaliação microestrutural do material foi realizada em seções retiradas do corpo de prova. O equipamento utilizado para ampliação foi um microscópio óptico da marca Olympus modelo BX51. O procedimento para caracterização do material foi executado na seguinte seqüência: corte, lixamento e polimento das amostras, e posteriormente foi realizado ataque químico. O resultado obtido na análise é mostrado na Tabela 5.

Tabela 5: Caracterização das amostras

Metalografia	
Forma da grafita	VI
% de nódulos	90-100
% de Ferrita	90
% de Perlita	10

As Figuras 42 e 43 mostram as imagens obtidas na análise microestrutural realizadas no núcleo das amostras com ampliação de 100x. O material é caracterizado por uma matriz ferrítica e uma nodularização de 95%.



Figura 42: Micrografia do corpo de prova após polimento (100x).

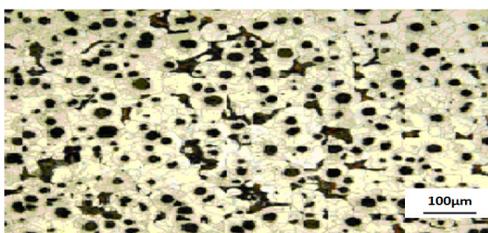


Figura 43: Micrografia do corpo de prova após ataque químico (100x).

Para determinação da dureza Brinell (HB) do material foi utilizado um durômetro Wolpert modelo HT1A. O valor obtido corresponde à média de cinco medições, cujos valores são mostrados na Tabela 6 e os respectivos valores de propriedades mecânicas são mostrados na Tabela 7.

Tabela 6: Ensaio de dureza do corpo de prova

Ensaio de Dureza (HB)	
Esfera (mm)	5
Carga (kg):	750
Dureza	156-160

Tabela 7: Propriedades mecânicas do corpo de prova

Ensaio Mecânico	
Tensão de ruptura (N/mm ²)	462
Alongamento (%)	20,7
Tensão de Escoamento (N/mm ²)	320

3.1.2 Ferramentas para alargar

A ferramenta utilizada nos ensaios de alargamento foi um alargador de gume único regulável com diâmetro de 14mm, fabricado pela empresa Hanna Tools e mostrada na Figura 44.



Figura 44: Alargador utilizado nos ensaios.

Para fixação desta ferramenta na máquina foi empregado um cone adaptador DIN69871 com regulagem de batimento angular e radial, pois segundo o fabricante, para eficiência máxima da ferramenta este batimento não deve ultrapassar 3 μ m no flange e na extremidade da ferramenta, visto que as máquinas ferramentas dificilmente garantem este batimento nos seus eixos-árvore. O valor obtido na regulagem do batimento na ferramenta do ensaio foi de 2 μ m no flange e 3 μ m na extremidade livre da ferramenta.

A lâmina empregada nos ensaios foi a 29WHF cuja geometria pode ser observada na Figura 45. O material que constitui a lâmina é metal-duro classe K01 com revestimento de TiAlN.

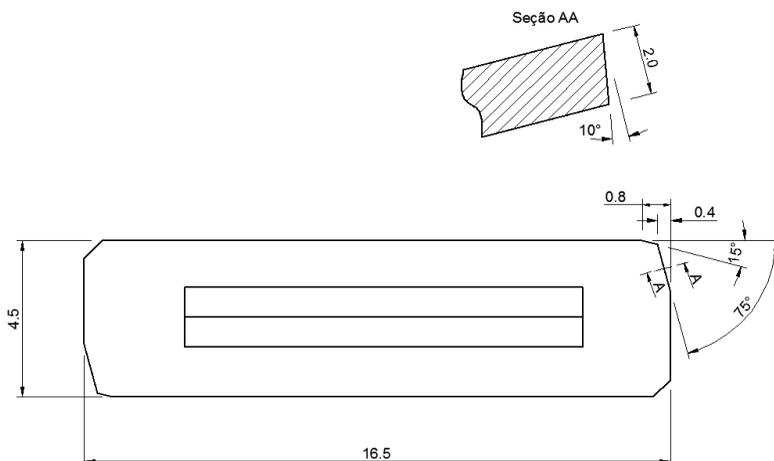


Figura 45: Geometria da lâmina do alargador.

3.1.3 Ferramenta para mandrilar

A ferramenta utilizada nos ensaios de mandrilamento foi um cabeçote de mandrilar com excentricidade regulável e com ajuste de balanceamento, conforme mostra a Figura 46. A resolução da ferramenta é de $2\mu\text{m}$ no diâmetro com capacidade de regulagem de 6mm, sendo este o motivo da necessidade de utilização de hastes para obtenção de valores de diâmetros maiores. A fixação do inserto foi realizada através de uma haste com capacidade entre 12 e 17mm.



Figura 46: Ferramenta de mandrilar utilizada nos ensaios.

O inserto escolhido para o ensaio de mandrilamento foi o CPGT060204 MPKC 730 da marca Kennametal, fabricado em metal-duro classe K10 e com revestimento de TiN cujas dimensões são ilustradas na Figura 47.

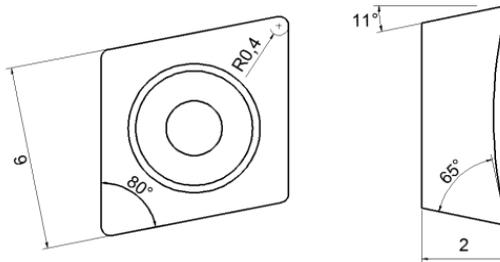


Figura 47: Representação esquemática do inserto utilizado no mandrilamento.

3.1.4 Meios lubri-refrigerantes

O meio lubri-refrigerante utilizado nos ensaios foi o fluido tipo sintético bioestável *Syntilo 916* do fabricante *Castrol*, em concentração de 5%, cujas descrições técnicas são apresentadas na Tabela 8. A pressão de alimentação utilizada foi de 60bar através do centro da ferramenta.

Segundo o fabricante, este fluido é indicado para usinagem de ferros fundidos em operações de desbaste e acabamento em centros de usinagem. Sua alimentação e reposição na máquina utilizada nos ensaios

são feitas por meio de uma central de lubrificação, local onde é realizado o controle do nível de contaminação e concentração do óleo.

Tabela 8: Características do meio lubri-refrigerante utilizado nos ensaios [35].

ENSAIO	UNIDADE	MÉTODO	SYNTILO 916
Aparência do concentrado	-	Visual	Líquido amarelo
Aparência da solução a 5%	-	Visual	Translúcida
Densidade a 20°	g/cm ³	ASTM D 4052	1,06
PH da solução a 5%	-	MCB 41	9,1
Corrosão em ferro fundido a 3%	-	DIN 51360/2	0/0

3.2 Equipamentos

3.2.1 Máquina-ferramenta

Os ensaios de alargamento e mandrilamento foram realizados em um centro de usinagem CNC horizontal da marca Heller, modelo MCi28, com 4 eixos, rotação máxima de 8000rpm, potência de acionamento da árvore de 50kW, avanço rápido de 60m/min, aceleração de 8m/s² e pressão de refrigeração de 60bar interna e externa (Figura 48).



Figura 48: Máquina utilizada nos ensaios.

3.2.2 Regulagem das ferramentas

Para regulagem de diâmetro e inclinação da lâmina do alargador foi utilizado um equipamento denominado *preseter* do fabricante Hanna. Este equipamento fixa a ferramenta entre pontas e com o auxílio de relógios comparadores com resolução de 1μ , permite a regulagem da lâmina tendo como referência a própria guia da ferramenta (Figura 49).



Figura 49: Equipamento para verificação da regulagem de alargados de lâminas ajustáveis.

O cabeçote de mandrilhar foi regulado utilizando um *preseter* de ferramentas da marca Zoller, modelo Venturion 500, com resolução de $0,001\text{mm}$ e sistema de aquisição de imagem conforme mostra a Figura 50.

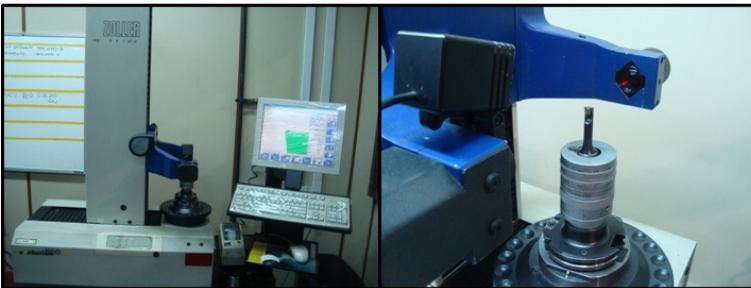


Figura 50: *Preseter* utilizado para regulagem do mandrilador.

3.2.3 Sistemas de medição

c) Máquina de medir por coordenadas

As medições dos diâmetros, circularidade e cilíndricidade foram realizadas com uma máquina de medir por coordenadas marca Zeiss, modelo Accura, com capacidade de medição de 900x1500x700mm e certificado de aferição emitido por órgão responsável (Figura 51).

A incerteza de medição desta máquina corresponde a: $U = (\pm 0,5 + L/451)\mu\text{m}$.



Figura 51: Máquina de medir por coordenadas utilizada nos ensaios.

d) Rugosímetro

Para medição da rugosidade das superfícies usinadas foi utilizado um rugosímetro portátil da marca Mahr, modelo M2 Perthometer, conforme mostra a Figura 52.



Figura 52: Rugosímetro utilizado nos ensaios.

3.3 Métodos

3.3.1 Preparação e fixação das amostras

As placas de ferro fundido nodular foram fixadas em um esquadro em virtude do centro de usinagem utilizado ser do tipo horizontal. Para garantia da perpendicularidade entre o eixo da ferramenta e a face das amostras e para evitar o empenamento da placa durante a fixação, as mesmas foram previamente fresadas conforme pode ser visto na Figura 53.

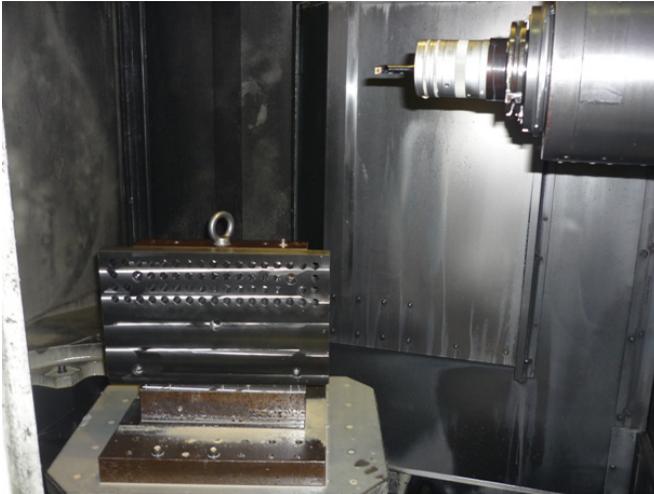


Figura 53: Fixação das amostras

A distribuição dos furos na placa respeitou uma distância mínima de parede entre os furos de 8mm, tendo em vista uma possível alteração na geometria dos furos próximos, ocasionada pelas forças geradas durante a usinagem. A Figura 54 mostra detalhadamente o leiaute das furações nas amostras.

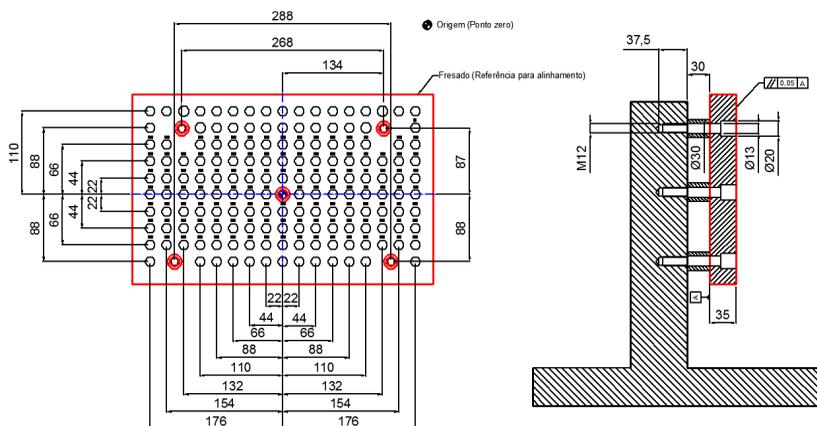


Figura 54: Detalhe das furações na amostra.

3.3.2 Planejamento experimental

O planejamento experimental foi estruturado de tal forma que a sistematização dos ensaios fosse realizada de acordo com as práticas mais usuais utilizadas em experimentos na área de usinagem.

a) Definição do objetivo

O objetivo do ensaio é verificar a influência que determinados parâmetros de usinagem exercem sobre a qualidade em furos de precisão, a fim de verificar quais variáveis de entrada e seus respectivos valores apresentam melhores resultados sob o ponto de vista qualitativo, servindo de referência para futuras aplicações no emprego do processo de mandrilamento de precisão e alargamento com ferramenta de gume único regulável.

b) Definição das variáveis de entrada

Em um processo de usinagem, muitos são os fatores que interferem no resultado final do trabalho, como por exemplo, máquina, parâmetros de usinagem, fixação de peça e ferramenta, meio lubri-refrigerante, material da peça, tipo de ferramenta etc. Porém um dos

fatores mais simples, rápido e de maior disponibilidade para interferência no resultado do processo são os parâmetros de usinagem.

Os parâmetros de usinagem apresentam significativa influência nos processos de fabricação sobre a qualidade, produtividade e vida da ferramenta e muitas vezes esta influência é mais acentuada em um processo do que em outro. Desta forma, escolheram-se os principais parâmetros de usinagem para servir de variáveis de entrada para a execução desta pesquisa, sendo eles velocidade de corte, profundidade de corte e avanço para ambos os processos em questão, quais sejam, mandrilamento de precisão e alargamento com ferramenta de gume único regulável.

c) Definição das variáveis de saída

Em função do objeto de estudo deste trabalho ser a qualidade obtida em furos de precisão, as variáveis de saída escolhidas para avaliação e critério de análise são variação dimensional, circularidade, cilindridade e rugosidade.

Estas variáveis geralmente são requisitos combinados para aprovação de um produto, visto que na aplicação de furo de precisão é exigido ajuste preciso de componentes e que por sua vez apenas a qualidade dimensional estando dentro da tolerância muitas vezes impede a montagem do conjunto. No caso da rugosidade até pode ser possível a montagem, porém o funcionamento e o desempenho de componentes, principalmente deslizantes, podem ficar comprometidos.

As forças envolvidas no processo de usinagem não foram medidas em função da indisponibilidade de recursos específicos na empresa onde os ensaios foram realizados.

d) Definição dos níveis e repetições das variáveis de entrada

Os limites para velocidade de corte, avanço e profundidade de corte utilizados nos ensaios foram fornecidos pelos fabricantes das respectivas ferramentas. Desta forma, para cada processo foram utilizados parâmetros específicos dentro de suas características e limitações.

Adotaram-se três níveis para cada variável, sendo uma faixa considerando valores mínimos indicados pelos fabricantes, outra faixa com valores médios e a terceira considerando valores mais elevados para os processos e os materiais de corte empregados nos ensaios.

Para ambos os processos a profundidade de corte considerada é referente à quantidade de material a ser retirada no raio, desta forma o sobre-material no diâmetro é o dobro da profundidade de corte.

A Tabela 9 mostra os valores dos parâmetros de corte empregados nos ensaios para o processo de mandrilamento e alargamento.

Tabela 9: Parâmetros de corte utilizados nos ensaios.

	Alargamento	Mandrilamento
v_c 1 (m/min)	80	100
v_c 2 (m/min)	90	150
v_c 3 (m/min)	100	200
a_p 1 (mm)	0,15	0,15
a_p 2 (mm)	0,25	0,25
a_p 3 (mm)	0,35	0,35
f 1 (mm/rot)	0,08	0,08
f 2 (mm/rot)	0,1	0,1
f 3 (mm/rot)	0,12	0,12

Em virtude da quantidade de variáveis, os ensaios foram estruturados de forma que sua execução fosse dividida em três grupos para facilitar a etapa de execução.

Os grupos levaram em consideração primeiramente a variável profundidade de corte, pois é necessária uma furação prévia e utilização de uma ferramenta específica para cada nível desta variável. Na seqüência foi considerado o tipo de processo, mandrilamento ou alargamento, pois uma vez que a ferramenta em análise é fixada no eixo árvore da máquina, a variação da velocidade de corte e do avanço é dada facilmente pela alteração no programa CNC.

A divisão dos grupos de ensaios e a seqüência de execução são mostradas na Tabela 10, 11 e 12 sendo que para cada ensaio foram realizadas três repetições.

Tabela 10: Divisão dos grupos de ensaios 1

	Ensaio	Processo	v_c	a_p	f
GRUPOS DE ENSAIOS 1	1	Alargador	v _c 1	a _p 1	f1
	2	Alargador	v _c 1	a _p 1	f2
	3	Alargador	v _c 1	a _p 1	f3
	4	Alargador	v _c 2	a _p 1	f1
	5	Alargador	v _c 2	a _p 1	f2
	6	Alargador	v _c 2	a _p 1	f3
	7	Alargador	v _c 3	a _p 1	f1
	8	Alargador	v _c 3	a _p 1	f2
	9	Alargador	v _c 3	a _p 1	f3
	10	Mandrilador	v _c 1	a _p 1	f1
	11	Mandrilador	v _c 1	a _p 1	f2
	12	Mandrilador	v _c 1	a _p 1	f3
	13	Mandrilador	v _c 2	a _p 1	f1
	14	Mandrilador	v _c 2	a _p 1	f2
	15	Mandrilador	v _c 2	a _p 1	f3
	16	Mandrilador	v _c 3	a _p 1	f1
	17	Mandrilador	v _c 3	a _p 1	f2
	18	Mandrilador	v _c 3	a _p 1	f3

Tabela 11: Divisão dos grupos de ensaios 2

	Ensaio	Processo	v_c	a_p	f
GRUPO DE ENSAIOS 2	19	Alargador	v _c 1	a _p 2	f1
	20	Alargador	v _c 1	a _p 2	f2
	21	Alargador	v _c 1	a _p 2	f3
	22	Alargador	v _c 2	a _p 2	f1
	23	Alargador	v _c 2	a _p 2	f2
	24	Alargador	v _c 2	a _p 2	f3
	25	Alargador	v _c 3	a _p 2	f1
	26	Alargador	v _c 3	a _p 2	f2
	27	Alargador	v _c 3	a _p 2	f3
	28	Mandrilador	v _c 1	a _p 2	f1
	29	Mandrilador	v _c 1	a _p 2	f2
	30	Mandrilador	v _c 1	a _p 2	f3
	31	Mandrilador	v _c 2	a _p 2	f1
	32	Mandrilador	v _c 2	a _p 2	f2
	33	Mandrilador	v _c 2	a _p 2	f3
	34	Mandrilador	v _c 3	a _p 2	f1
	35	Mandrilador	v _c 3	a _p 2	f2
	36	Mandrilador	v _c 3	a _p 2	f3

Tabela 12: Divisão dos grupos de ensaios 3

	Ensaio	Processo	v_c	a_p	f
GRUPO DE ENSAIOS 3	37	Alargador	$v_c 1$	$a_p 3$	f1
	38	Alargador	$v_c 1$	$a_p 3$	f2
	39	Alargador	$v_c 1$	$a_p 3$	f3
	40	Alargador	$v_c 2$	$a_p 3$	f1
	41	Alargador	$v_c 2$	$a_p 3$	f2
	42	Alargador	$v_c 2$	$a_p 3$	f3
	43	Alargador	$v_c 3$	$a_p 3$	f1
	44	Alargador	$v_c 3$	$a_p 3$	f2
	45	Alargador	$v_c 3$	$a_p 3$	f3
	46	Mandrilador	$v_c 1$	$a_p 3$	f1
	47	Mandrilador	$v_c 1$	$a_p 3$	f2
	48	Mandrilador	$v_c 1$	$a_p 3$	f3
	49	Mandrilador	$v_c 2$	$a_p 3$	f1
	50	Mandrilador	$v_c 2$	$a_p 3$	f2
	51	Mandrilador	$v_c 2$	$a_p 3$	f3
	52	Mandrilador	$v_c 3$	$a_p 3$	f1
	53	Mandrilador	$v_c 3$	$a_p 3$	f2
	54	Mandrilador	$v_c 3$	$a_p 3$	f3

3.3.3 Procedimento experimental

Os procedimentos adotados para realização dos ensaios são descritos na seqüência a seguir:

Primeiramente a matéria-prima foi usinada conforme desenho, fixada na máquina por meio de um esquadro, alinhada pela superfície de referência e localizado o ponto zero conforme identificado na Figura 54.

Na seqüência foi realizada a montagem do alargador e do mandrilador, o alargador foi regulado para que a lâmina ficasse 6 μ acima de sua guia, obtendo assim um diâmetro de corte de 14,015mm, valor este que serviu de referência para regulagem prévia do cabeçote de mandrilar.

Foram realizados testes com as duas ferramentas nas condições de corte do ensaio número um. De acordo com os resultados obtidos nestes testes, foram realizados ajustes no mandrilador para que as duas ferramentas partissem de um valor de diâmetro em comum, visto que para a ferramenta em questão este tipo de ajuste é inerente ao processo.

Depois de ajustadas as ferramentas, os ensaios foram executados conforme planejado. Em virtude dos ensaios serem de curta duração e tendo como o objetivo a avaliação dos efeitos dos parâmetros de corte sobre a qualidade do furo, a análise e a verificação do comportamento

do desgaste em função dos parâmetros de usinagem não foi abordado neste trabalho. Entretanto com o intuito de minimizar a influência do desgaste das ferramentas sobre os resultados, foi definido um valor de $VB_{B_{max}}$ de 0,1mm. De acordo com Ferraresi [36], em operações de acabamento utilizando ferramentas de metal-duro para obtenção de tolerâncias de qualidade ISO IT7, os valores de $VB_{B_{max}}$ não devem ultrapassar a marca de 0,1 a 0,2mm. O valor de $VB_{B_{max}}$ encontrado nas ferramentas utilizadas nos ensaios foi de 0,06mm, em média.

Depois de terminada a execução dos ensaios, as placas foram identificadas e encaminhadas para medição conforme procedimento descrito nos itens 3.3.4 e 3.3.5.

3.3.4 Procedimento de medição de erro de forma e dimensional

As medições do desvio dimensional e de forma foram realizadas em uma máquina de medir por coordenadas. Os parâmetros utilizados na MMC para medição de cilindricidade, circularidade e medição de diâmetro são:

- N° de pontos de apalpação: 150
- Filtro de medição gaussiano de 50 ondas/volta
- Geração de 3 secções transversais de medição ao longo do eixo da furação, sendo: uma afastada a 6mm da face de entrada dos furos, outra no meio do comprimento do eixo da furação e a última 6mm afastada da face de saída dos furos.
- Velocidade de medição de 10mm/s (velocidades maiores que 10mm/s podem provocar interferências no sinal de captação dos dados [4]).
- Obtenção do valor de diâmetro e circularidade na secção transversal intermediária.
- Obtenção do valor de cilindricidade nas três secções realizadas.
- Realização de três ciclos de medição para cada furação.

As amostras foram estabilizadas termicamente por um período de 3 horas dentro do laboratório dimensional a uma temperatura de 20°C antes da realização das medições.

Foram realizadas 3 medições para cada furo ensaiado, sendo que os resultados encontrados foram avaliados e tratados estatisticamente com a utilização de análise de variância utilizando uma confiabilidade de 95%.

3.3.5 Procedimento para medição de rugosidade

A medição da rugosidade foi realizada de acordo com a norma DIN EN ISO4288 para o parâmetro R_a com a medição de três pontos distribuídos a 120° para cada furo a uma profundidade de 15mm da superfície da placa.

Os resultados das medições foram submetidos a uma análise de variância, com um nível de significância de 95%, a fim de verificar se as diferenças observadas são estatisticamente significativas.

O parâmetro de rugosidade adotado no ensaio foi o R_a porque este parâmetro, em se tratando de uma média de valores absolutos, permite realizar comparações de uma forma mais adequada, pois apresenta menor dispersão se comparado a parâmetros que representam apenas valores absolutos [2]. Outra justificativa para a escolha deste parâmetro é a sua grande aplicação no meio industrial e sua facilidade de interpretação apesar de não representar perfeitamente a característica da superfície.

Para um melhor entendimento das características dos resultados de rugosidade, foram realizadas análises dos ensaios utilizando parâmetros de rugosidade R_a e R_z , de modo a identificar a tendência nos valores destes parâmetros com a mesma configuração de ensaio.

Nas figuras a seguir, é possível identificar o comportamento dos parâmetros de rugosidade R_a e R_z com o aumento do avanço. Nota-se uma semelhança nas características das curvas para ambos os parâmetros, semelhança esta encontrada tanto para o processo de alargamento (Figura 55), quanto para o processo de mandrilamento (Figura 56).

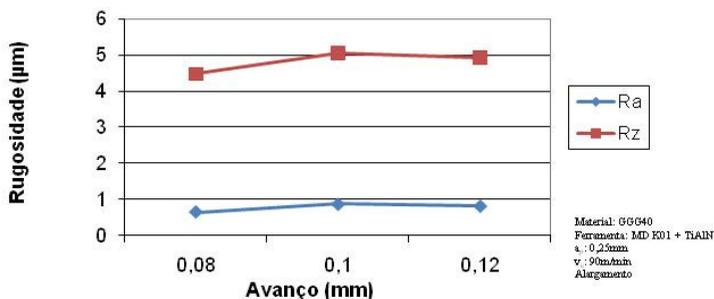


Figura 55: Comparação entre rugosidade R_a e R_z para o processo de alargamento

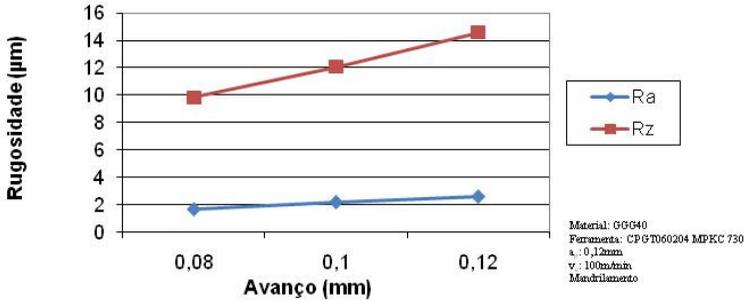


Figura 56: Comparação entre rugosidade R_a e R_z para o processo de mandrilamento

3.3.6 Análise estatística

Com o objetivo de obter resultados válidos sob o ponto de vista estatístico, foi utilizada para análise dos resultados de circularidade, cilindricidade, rugosidade e variação dimensional a ferramenta denominada ANOVA (análise de variância), de modo a identificar qual variável apresentou diferença estatisticamente significativa.

A análise de variância é utilizada para comparar a variação entre as médias de dois ou mais grupos em função da variação contida dentro de cada grupo. A ANOVA identifica se a hipótese H_0 é verdadeira, ou seja, para verificação se todas as médias são iguais. Esta estatística não identifica se uma média é maior do que a outra, e sim simplesmente testa se as médias são todas iguais ou se existe alguma média diferente [37].

A análise de significância é realizada a partir de uma variável chamada F_0 . Este valor é comparado a um valor tabelado chamado de $F_{\text{crítico}}$ e permite afirmar caso a relação $F_0 > F_{\text{crítico}}$ que a hipótese H_0 é verdadeira [3]. Outro fator determinante é o fator P , onde quanto maior o fator P , mais próximo da hipótese nula é o experimento. Desta forma, adota-se fator p menor que 5% para identificar diferença estatisticamente significativa entre os fatores [9].

Caso a hipótese H_0 seja rejeitada é utilizado o teste de comparação múltipla, chamado LSD (*Least Square Difference*) para verificação de qual ou quais médias são diferentes.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Este capítulo explora os resultados obtidos durante a realização dos ensaios e os expõem por meio de gráficos seguidos de sua respectiva análise.

Para melhor interpretação dos dados, a abordagem dos mesmos foi estruturada de forma a separar no primeiro momento os resultados para cada processo avaliado, ou seja, alargamento e mandrilamento, sendo analisada a dependência de cada variável escolhida (circularidade, cilindricidade, rugosidade e variação dimensional) com relação à variação dos parâmetros de entrada (v_c , a_p e f).

Posteriormente será realizada uma comparação dos resultados encontrados no processo de alargamento e mandrilamento com o objetivo de avaliar as especificidades de cada processo, bem como seus comportamentos para cada configuração de ensaio.

Finalmente, uma abordagem de viabilidade técnica será realizada considerando a produtividade máxima obtida dentro dos limites de qualidade estabelecidos.

4.1 Análise dos Resultados no Processo de Alargamento

4.1.1 Análise da circularidade

- **Influência do avanço**

Na avaliação da influência do avanço sobre a circularidade, nenhuma variável apresentou diferença significativa nos resultados, conforme mostram os valores p encontrados nos testes de ANOVA para diversas velocidades de corte (para $v_{c80m/min}$, $p = 0,292$; $v_{c90m/min}$, $p = 0,493$ e $v_{c100m/min}$, $p = 0,854$). Para que os resultados apresentem diferença significativa com nível de confiabilidade de 95% é necessário que o valor de p seja menor que 0,05.

De acordo com Gomes [37], a utilização de poucas repetições em ensaios pode não permitir a comprovação estatística de médias ponderáveis entre tratamento, mesmo observando-se diferenças expressivas. A Figura 57 mostra uma maior dispersão dos resultados para os ensaios com avanço de 0,12mm e velocidade de corte de 80m/min. Este comportamento pode estar relacionado à combinação de

dois fatores que aumentam a força de corte; o aumento da seção de usinagem ocasionado pelo aumento do avanço e a diminuição da velocidade de corte, tendo em vista que em velocidades maiores o aumento de temperatura provoca diminuição da resistência do material facilitando desta forma o processo de corte [18].

Bezerra [26], no alargamento de alumínio com ferramenta multicortante, encontrou tendência de aumento no erro de circularidade com o aumento do avanço. Almeida [1], no alargamento de ferro fundido cinzento com ferramentas multicortantes, não observou diferença estatisticamente significativa na variação do avanço, porém na avaliação das médias ocorreu uma redução da circularidade com o aumento do avanço, fato previsível se considerar que os valores iniciais de avanço utilizados foram extremamente baixos, de 0,01 a 0,1mm, e que para valores de avanço muito baixos, a ferramenta não promove o corte e sim o esmagamento do material, o que por sua vez provoca distúrbios durante o processo de usinagem [18].

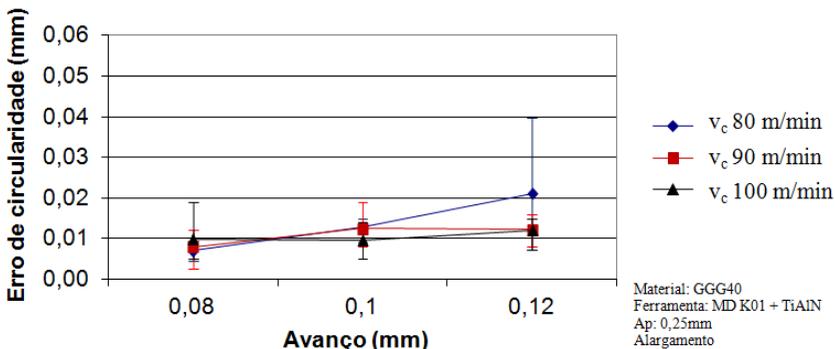


Figura 57: Influência do avanço no alargamento sobre o erro de circularidade

- **Influência da velocidade de corte**

De acordo com os valores p obtidos na ANOVA para a variação da velocidade de corte em diferentes condições de avanço (para $f_{0,08\text{mm}}$, $p = 0,824$; $f_{0,10\text{mm}}$, $p = 0,671$ e $f_{0,12\text{mm}}$, $p = 0,502$), mostram que para uma hipótese com confiabilidade de 95% a variação do avanço não apresenta diferença estatisticamente significativa nos resultados.

A Figura 58 mostra os resultados encontrados para o erro de circularidade em função da variação da velocidade de corte onde é possível observar que menor velocidade de corte (80m/min) proporciona menor dispersão nos resultados se combinada com baixos avanços ($f_0,08$ e $0,10$ mm). É possível observar uma tendência de diminuição da circularidade com o aumento da velocidade de corte para um avanço de $0,12$ mm.

De uma forma geral, a velocidade de corte tem uma correlação bastante intensa com a geração de calor durante o processo de usinagem e proporciona uma redução considerável na resistência do material e nas forças de corte à medida que seus valores são incrementados [18]. Esta diminuição nas forças de corte justifica a redução da circularidade com o aumento da velocidade de corte quando utilizada no avanço de $0,12$ mm.

É necessário observar os limites superiores de velocidades de corte, uma vez que a utilização de valores elevados é comumente associada ao aparecimento de vibrações no processo de usinagem, o que pode ocasionar uma piora na qualidade do furo. Este evento é fortemente influenciado pelo tipo de ferramenta utilizada, balanceamento da mesma e rigidez da máquina ferramenta [26, 38].

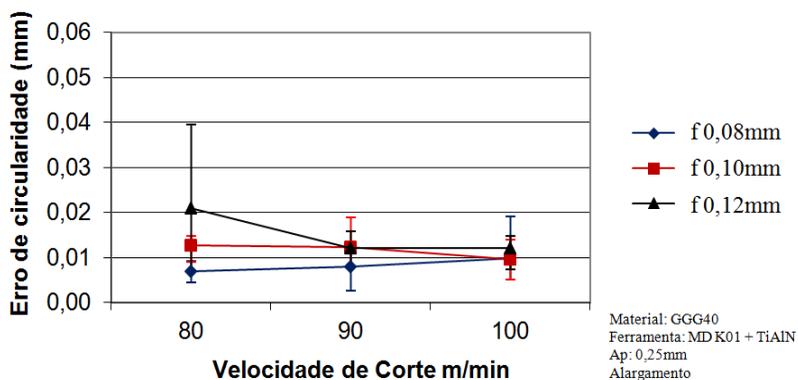


Figura 58: Influência da velocidade de corte no alargamento sobre o erro de circularidade.

- **Influência da profundidade de corte**

Os valores p obtidos no teste de ANOVA para a profundidade de corte em diferentes condições de velocidade de corte, (para V_c 80m/min, p

= 0,040; $v_{c90\text{m/min}}$, $p = 0,183$ e $v_{c100\text{m/min}}$, $p = 0,554$) mostraram que para algumas condições de usinagem a profundidade de corte pode exercer influência significativa sobre a circularidade.

De acordo com König [18] o aumento da profundidade de corte promove um aumento proporcional nas componentes da força de usinagem F_c , F_p e F_f , sendo que tais componentes interferem na qualidade da superfície usinada. Avaliando-se a Figura 59, é possível observar este comportamento para a v_c de 100m/min, onde ocorre um aumento do valor de circularidade com o aumento da profundidade de corte.

Santos [9], no alargamento de guias de válvulas com ferramentas de gume único regulável, observou uma redução dos valores de circularidade com o aumento da profundidade de corte para a faixa de valores entre 0,06 e 0,25mm. Tendência também encontrada em ensaios realizados por Almeida [1], no alargamento de ferro fundido cinzento com ferramentas multicortantes de metal-duro.

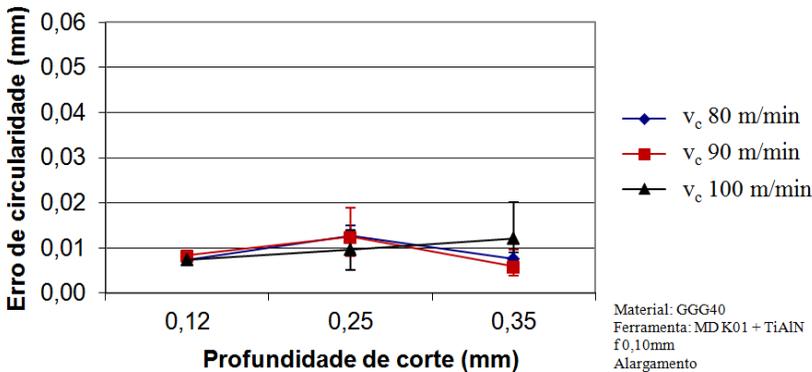


Figura 59: Influência da profundidade de corte sobre o erro de circularidade

4.1.2 Análise da cilindridade

- Influência do avanço**

De acordo com ANOVA, os valores p encontrados (para $v_{c80\text{m/min}}$, $p = 0,367$; $v_{c90\text{m/min}}$, $p = 0,386$ e $v_{c100\text{m/min}}$, $p = 0,148$) mostram que o avanço não tem influência significativa sobre os resultados de cilindridade. Contudo, os menores valores de cilindridade foram

encontrados para os menores avanços, onde foi possível obter cilindridade na ordem de $5\mu\text{m}$ para velocidade de corte de 80m/min , conforme mostra a Figura 60.

O resultado menos favorável foi encontrado em condições severas de usinagem, com velocidade de corte de 100m/min e avanço de $0,12\text{mm}$, evidenciando que as utilizações combinadas de parâmetros de usinagem elevados produzem maiores esforços e, conseqüentemente, uma redução na qualidade dos desvios de forma, inclusive a cilindridade.

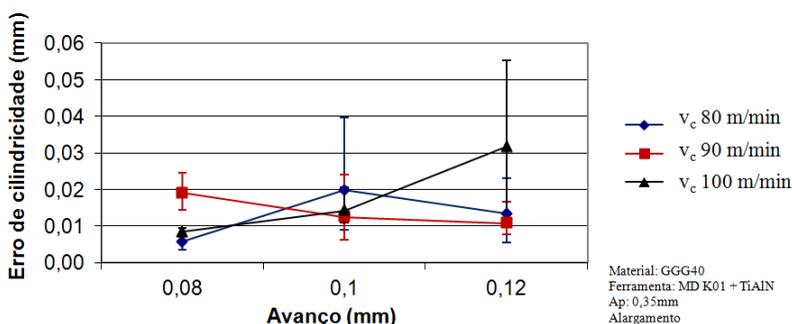


Figura 60: Influência do avanço no alargamento sobre o erro de cilindridade.

- **Influência da velocidade de corte**

De acordo com os valores p obtidos na ANOVA (para $f_{0,08\text{mm}}$, $p = 0,074$; $f_{0,10\text{mm}}$, $p = 0,601$ e $f_{0,12\text{mm}}$, $p = 0,511$), a velocidade de corte não apresentou influência significativa sobre a cilindridade. Na Figura 61 é possível observar que o aumento da velocidade de corte de 80 para 90m/min ocasionou uma redução nos valores de cilindridade na ordem de 67% para um avanço de $0,08\text{mm}$ e 32% para avanço de $0,12\text{mm}$.

Schroeter [7], Santos [9] e Eckhardt [39], em estudos de alargamento em ligas de alumínio com ferramentas de gume único regulável, não observaram diferença significativa nos resultados de cilindridade com a variação da velocidade de corte. Desta forma, a redução da cilindridade encontrada nos resultados pode estar associada a outros fatores como, por exemplo, faixa de ressonância da máquina-ferramenta ou distúrbios na usinagem em função da secção de usinagem utilizada, visto que para os mesmos ensaios o valor de circularidade

também apresentou resultados elevados, já a rugosidade e o dimensional do furo apresentaram valores ligeiramente menores.

Bezerra [26], no alargamento de ligas de alumínio com alargadores multicortantes de metal-duro, observou um aumento da cilindridade na ordem de 500% com o aumento da velocidade de corte na faixa de valores de 25 a 80m/min. Todavia, a partir de 60m/min a curva de crescimento começou a apresentar tendência de diminuição. O autor justificou o resultado como sendo devido ao aumento de vibrações ocorridas com maiores velocidades de corte.

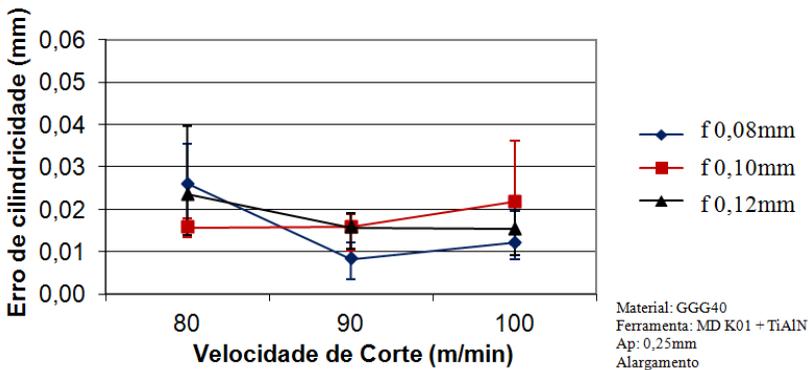


Figura 61: Influência da velocidade de corte no alargamento sobre o erro de cilindridade.

- **Influência da profundidade de corte**

A profundidade de corte não apresentou influência significativa sobre a cilindridade, como pode ser observado nos valores p obtidos nos testes de ANOVA (para $v_{c80m/min}$, $p = 0,770$; $v_{c90m/min}$, $p = 0,801$ e $v_{c100m/min}$, $p = 0,519$) nem tampouco pode-se identificar uma tendência no resultados obtidos (Figura 62).

O motivo pelo qual a profundidade de corte não apresentou influência sobre a cilindridade, já que com o aumento da mesma ocorre um aumento das forças envolvidas no processo, pode ser em decorrência da presença de elementos de guia neste tipo de ferramenta, que tendem a neutralizar as forças de corte e passiva provenientes do aumento da profundidade de corte, mantendo assim a ferramenta concêntrica com o eixo da furação.

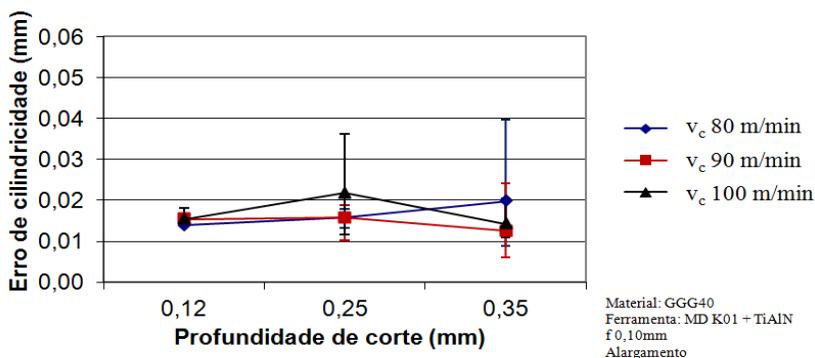


Figura 62: Influência da profundidade de corte sobre o erro de cilindridade.

4.1.3 Análise da rugosidade

- **Influência do Avanço**

Os valores de p obtidos na ANOVA (para $v_{c80\text{m/min}}$, $p = 0,257$; $v_{c90\text{m/min}}$, $p = 0,136$ e $v_{c100\text{m/min}}$, $p = 0,214$), mostram que o avanço não teve influência significativa sobre os valores de rugosidade, apresentando apenas uma pequena tendência de crescimento com o aumento do avanço (Figura 63).

De acordo com a Equação 1 apresentada no item 2.4.2, a rugosidade teórica é diretamente proporcional ao avanço e inversamente proporcional ao raio do gume da ferramenta. Desta forma, o aumento do avanço tende a aumentar os valores de rugosidade de forma proporcional. Contudo, os ensaios realizados mostraram que tal equação não consegue justificar o comportamento da rugosidade no processo de alargamento de forma plena. Tal fato pode ser decorrência do pequeno ângulo de inclinação da lâmina presente neste tipo de ferramenta, o que gera um efeito alisador durante o processo de usinagem, ou a presença dos elementos de guia que promovem o esmagamento dos picos de rugosidade.

Segundo Kress [29], para o processo de alargamento, além do avanço, outros fatores são importantes para determinação da rugosidade teórica, sendo eles a inclinação da lâmina e o ângulo de entrada. Schroeter (1989), em ensaios de alargamento com ferramentas de gume único, não encontrou variação significativa da rugosidade com a variação do avanço.

O ângulo de entrada de 15° da lâmina utilizada nos ensaios também pode ter contribuído para um menor resultado de rugosidade, uma vez que é considerado pequeno e é o menor disponível no mercado para este tipo de ferramenta.

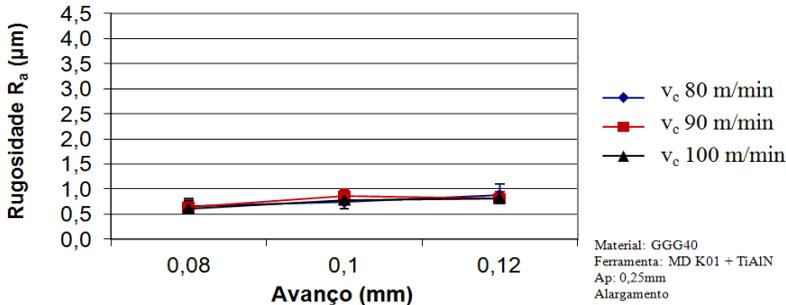


Figura 63: Influência do avanço no processo de alargamento sobre a rugosidade.

- **Influência da velocidade de corte**

De acordo com os valores p obtidos na ANOVA (para $f_{0,08mm}$, $p = 0,915$; $f_{0,10mm}$, $p = 0,492$ e $f_{0,12mm}$, $p = 0,795$) a velocidade de corte não apresentou diferença significativa nos resultados de rugosidade, nem apresentou tendência alguma com a variação da velocidade (Figura 64).

Santos [9], no alargamento de liga de alumínio com ferramenta de gume único, não encontrou variação significativa nos valores de rugosidade com a variação da velocidade de corte de 90 até 140m/min. Bezerra [26], no alargamento de liga de alumínio, observou um aumento nos valores de rugosidade com o aumento da velocidade de corte na faixa de 25 a 80m/min, entretanto seus ensaios foram realizados com alargadores multicortantes, que são mais propícios ao aparecimento de vibrações em velocidades maiores.

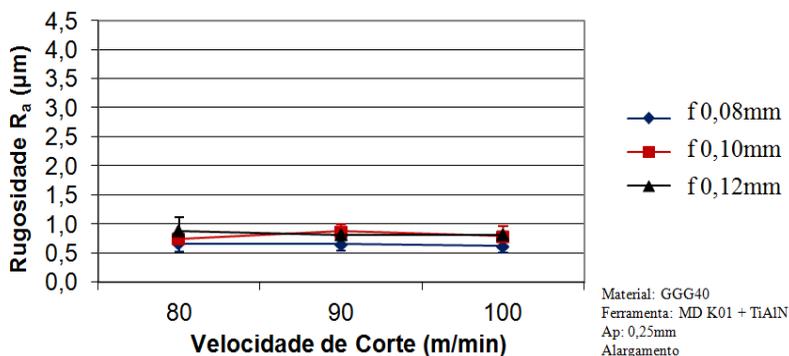


Figura 64: Influência da velocidade de corte no alargamento sobre a rugosidade.

- **Influência da profundidade de corte**

De acordo com os valores p obtidos da ANOVA (para $v_{c80\text{m/min}}$, $p = 1,92 \times 10^{-6}$; $v_{c90\text{m/min}}$, $p = 2 \times 10^{-5}$ e $v_{c100\text{m/min}}$, $p = 2 \times 10^{-5}$), é possível observar que a profundidade de corte tem influência significativa sobre a rugosidade.

Na Figura 65 é possível observar que o aumento da profundidade de corte de 0,12mm para 0,25mm não provocou muita diferença nos resultados, porém o incremento de 0,25mm para 0,35mm na profundidade de corte provocou um aumento considerável nos valores de rugosidade para todas as velocidades testadas, resultados evidenciados pela aplicação do teste *LSD*.

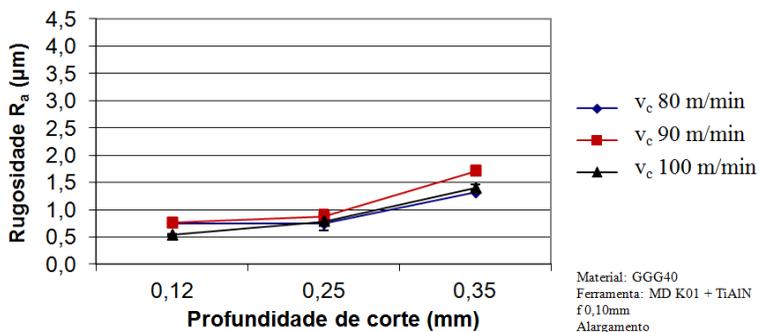


Figura 65: Influência da profundidade de corte sobre a rugosidade

No processo de alargamento, a pequena inclinação da lâmina de corte e o pequeno ângulo de entrada secundário, os quais são responsáveis pelo alisamento da superfície, provocam um aumento significativo da parte ativa do gume de corte à medida que se aumenta a profundidade. Já que a força de corte é proporcional à largura do cavaco, que por sua vez é proporcional à profundidade de corte, um aumento nesta componente tende a provocar uma sobrecarga no recalque do cavaco durante a usinagem, interferindo no cisalhamento do mesmo e dificultando sua saída ao longo da parede do furo.

Este processo é mais evidenciado na usinagem de pequenos diâmetros, pois com o aumento da profundidade de corte ocorre uma diminuição do ângulo de cisalhamento, o que confere à usinagem uma característica de formação de cavado arrancado, fazendo assim com que a estrutura superficial da peça seja danificada por microlascamentos.

4.1.4 Análise da variação dimensional

- **Influência do avanço**

De acordo com os valores p obtidos no teste de ANOVA (para $v_{c80\text{m/min}}$, $p = 0,947$; $v_{c90\text{m/min}}$, $p = 0,062$ e $v_{c100\text{m/min}}$, $p = 0,924$) os resultados não apresentam diferença significativa na variação dimensional com a variação do avanço para todas as velocidades de corte testadas, conforme mostra a Figura 66.

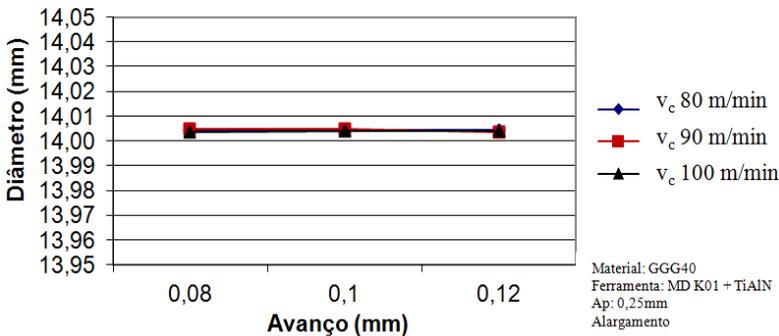


Figura 66: Influência do avanço no alargamento sobre a variação dimensional.

Bezerra [26], no alargamento de liga de alumínio com ferramenta multicortante, encontrou uma tendência de redução do diâmetro com o aumento do avanço entre 0,04mm e 0,16mm. Nos ensaios abaixo destes valores ocorreu um aumento do valor do diâmetro, ocasionado pela pequena taxa de avanço, o que permite que a ferramenta permaneça um tempo mais elevado em contato com a superfície da peça.

Schroeter [7], no alargamento de alumínio com ferramenta de gume único, também encontrou esta tendência de diminuição do diâmetro com o aumento do avanço. Santos [9], no alargamento de liga de alumínio, não verificou diferença significativa nos valores dimensionais com a variação do avanço tanto com ferramenta de gume único regulável quanto com ferramenta multicortantes.

- **Influência da velocidade de corte**

Os valores p obtidos no teste de ANOVA (para $f_{0,08\text{mm}}$, $p = 0,599$; $f_{0,10\text{mm}}$, $p = 0,381$ e $f_{0,12\text{mm}}$, $p = 0,230$) mostram que a velocidade de corte não apresenta influência significativa sobre a variação dimensional. Na Figura 67 também é possível verificar o comportamento dos resultados.

Resultados semelhantes também foram encontrados por Schroeter [7] e Eckhardt [39], onde os autores variaram a velocidade de corte e não observaram variação significativa nas dimensões dos furos.

Santos [9] também não observou variação dimensional significativa nos furos com a alteração da velocidade de corte.

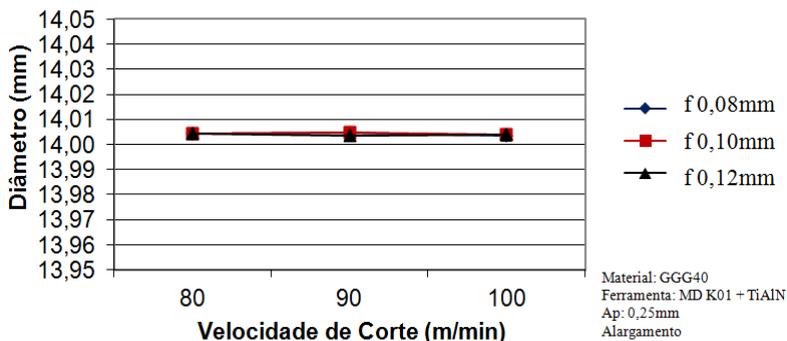


Figura 67: Influência da velocidade de corte no alargamento sobre a variação dimensional.

- **Influência da profundidade de corte**

Conforme os valores p obtidos no teste de ANOVA para a variação da profundidade de corte em diferentes condições de velocidades (para $v_{c80\text{m/min}}$, $p = 0,001$; $v_{c90\text{m/min}}$, $p = 0,001$ e $v_{c100\text{m/min}}$, $p = 0,002$) é possível observar que a profundidade de corte nas condições testadas apresenta influência significativa sobre os resultados dimensionais.

De acordo com Eckhardt [39], no processo de alargamento a utilização de profundidades de corte relativamente grande pode resultar na sobrecarga do gume bem como no aumento do diâmetro do furo.

Santos [9], em seus ensaios de alargamento, não observou diferença significativa na variação dimensional com a alteração da profundidade de corte na faixa de 0,07mm a 0,13mm.

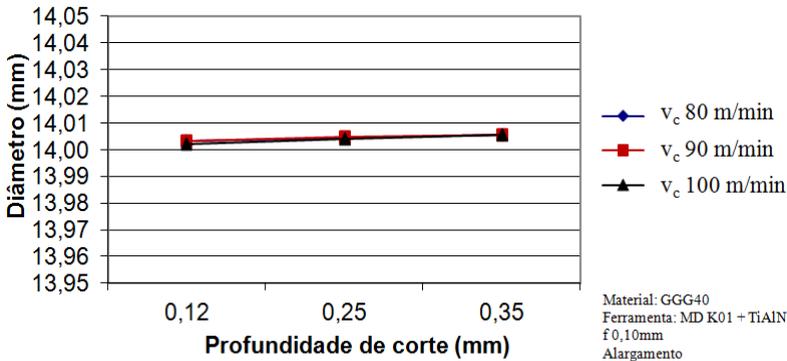


Figura 68: Influência da profundidade de corte no alargamento sobre a variação dimensional.

4.2 Análises dos Resultados no Processo de Mandrilamento

4.2.1 Análise da circularidade

- **Influência do avanço**

De acordo com os valores p obtidos no teste de ANOVA (para $v_{c100\text{m/min}}$, $p = 0,097$; $v_{c150\text{m/min}}$, $p = 0,474$ e $v_{c200\text{m/min}}$, $p = 0,249$), o avanço não apresentou influência significativa sobre a circularidade, independente da velocidade de corte empregada.

Como pode ser observado na Figura 69, os maiores valores de circularidade e de dispersão nos resultados foram encontrados para o maior avanço utilizado, ou seja, 0,12mm.

Muitos autores relacionam o aumento do avanço com a diminuição da qualidade do furo mandrilado em virtude do aumento das componentes da força de usinagem, principalmente a força de corte [4, 18]. Este fenômeno é bastante pronunciado no processo de mandrilamento em decorrência do sistema peça-ferramenta apresentar uma característica de viga engastada sujeita a esforços em sua extremidade, o que pode provocar vibração e diminuição da qualidade do furo se as forças atuantes no momento da usinagem forem grandes em relação à rigidez deste sistema [2, 3, 4].

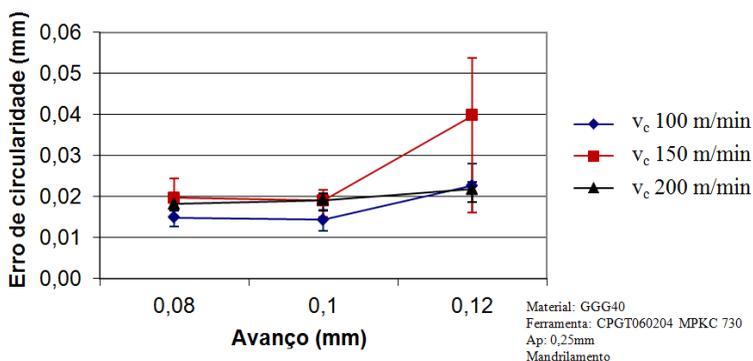


Figura 69: Influência do avanço no mandrilamento sobre o erro de circularidade.

Mühle [3], em ensaios de mandrilamento com cabeçotes de excentricidade regulável, observou que com o aumento da velocidade de corte ocorreu um aumento nos níveis de vibração para velocidades até 220m/min e uma diminuição dos níveis de vibração após a velocidade de 260m/min, permanecendo constante entre os dois valores. Neste caso o autor justificou tal variação como sendo a rigidez do corpo de prova e o desbalanceamento do eixo árvore da máquina os fatores responsáveis por tal comportamento.

- **Influência da velocidade de corte**

De acordo com os valores p (para $f_{0,08\text{mm}}$, $p = 0,003$; $f_{0,10\text{mm}}$, $p = 0,486$ e $f_{0,12\text{mm}}$, $p = 0,462$) obtidos nos testes de ANOVA, a velocidade

de corte apresenta diferença significativa nos resultados de circularidade para um avanço de 0,08mm.

Na Figura 70 é possível observar que o aumento da velocidade de corte para um avanço de 0,08mm acarretou uma tendência de crescimento nos valores de circularidade. Já a variação da velocidade de corte combinada com maiores avanços proporcionou valores de circularidade mais elevados bem como em maiores dispersões nos resultados.

De acordo com Mühle [3], o aumento do nível de vibração com o aumento da velocidade de corte é esperado, uma vez que a força centrífuga F_c causadora da vibração é proporcional ao quadrado do aumento da velocidade angular ω . Este aumento da vibração provoca uma diminuição da qualidade do furo, visto que o movimento descrito pela ponta da ferramenta quando submetido ao processo vibratório é transferido para a superfície do furo.

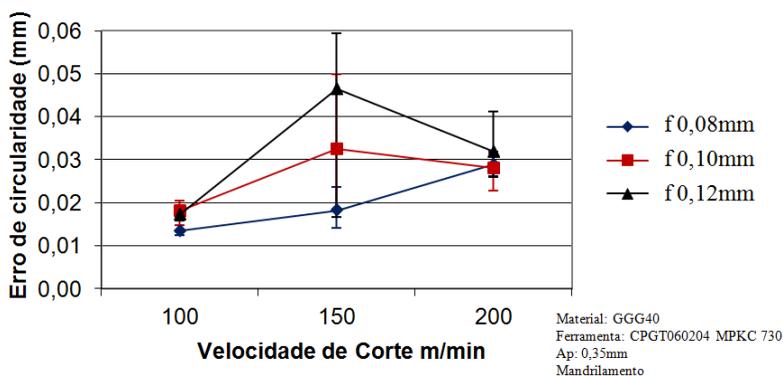


Figura 70: Influência da velocidade de corte no mandrilamento sobre o erro de circularidade.

- **Influência da profundidade de corte**

De acordo com os valores p (para $v_{c100m/min}$, $p = 0,121$; $v_{c150m/min}$, $p = 0,382$ e $v_{c200m/min}$, $p = 0,065$) obtidos nos testes de ANOVA, a profundidade de corte dentro da faixa avaliada, não apresenta influência significativa sobre os valores de circularidades. Na Figura 71 é possível observar o comportamento dos resultados para este ensaio.

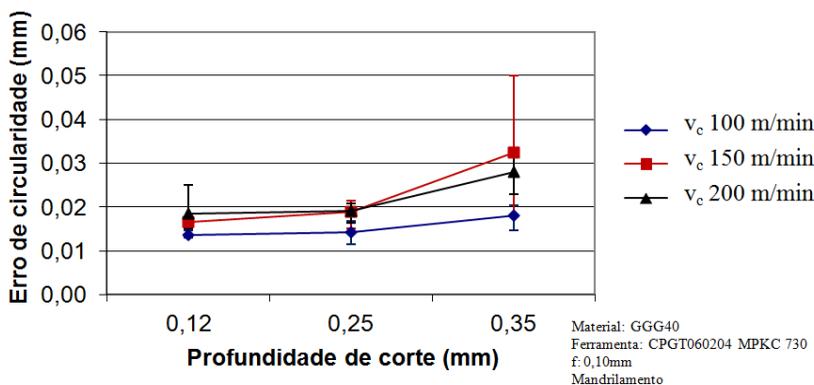


Figura 71: Influência da profundidade de corte no mandrilamento sobre o erro de circularidade.

De acordo com König [18], as componentes da força de usinagem aumentam proporcionalmente com a profundidade de corte, desde que tais valores sejam maiores que o raio da ferramenta. O aumento de forças durante o processo de acabamento tende a gerar vibrações e perturbações na ferramenta de usinagem e conseqüentemente a redução da qualidade do furo, visto que a ferramenta de mandrilar não possui elementos de guia que minimizem ou anulem tais esforços.

Polli [2] observa em seus ensaios de mandrilamento que a profundidade de corte apresenta grande influência nas forças de corte e força passiva. Da mesma forma, profundidades de corte menores que o raio da ferramenta provocam instabilidade do processo em virtude de apenas a parte arredondada da ferramenta promover o corte, gerando assim uma variação na espessura de corte e no ângulo de posição durante a usinagem.

4.2.2 Análise da cilindricidade

- **Influência do avanço**

De acordo com os valores p encontrados nos testes de ANOVA (para $v_{c100m/min}$, $p = 0,790$; $v_{c150m/min}$, $p = 0,168$ e $v_{c200m/min}$, $p = 0,173$) o avanço não apresenta influência sobre a cilindricidade para as faixas de valores ensaiados.

Na Figura 72 é possível observar que o aumento do avanço praticamente não alterou os valores de cilindricidade, com exceção do

ensaio utilizando 0,12mm de avanço e 150m/min de velocidade de corte no qual verificou-se um crescimento relativamente alto se comparado aos demais resultados.

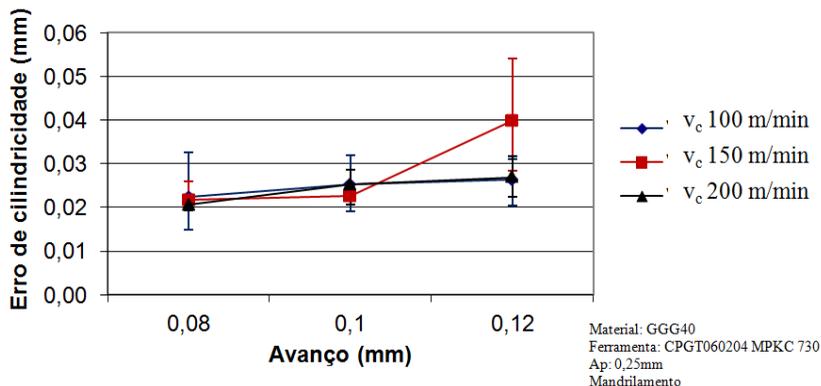


Figura 72: Influência do avanço no mandrilamento sobre o erro de cilindridade.

Neto [40], em ensaios de torneamento interno em cilindros de blocos de motores de ferro fundido cinzento centrifugado, não observou tendência nos valores de cilindridade com a variação do avanço para diversas condições de velocidade de corte. Neste mesmo trabalho o autor relata que as oscilações ocorridas podem estar relacionadas à não-homogeneidade do material e sua forma de apresentação no estado bruto.

Godinho [4], em ensaios de mandrilamento de cilindro de blocos de motores, verificou uma tendência no aumento da retitude com o aumento do avanço nas condições de início e fim de vida de ferramenta. O autor justifica os resultados em função da relação direta que existe entre a espessura do cavaco e a força de avanço que faz com que ocorra o aumento significativo da força com o aumento do avanço.

- **Influência da velocidade de corte**

De acordo com os valores p obtidos no teste de ANOVA ($f_{0,08mm}$, $p = 0,929$; $f_{0,10mm}$, $p = 0,726$ e $f_{0,12mm}$, $p = 0,223$), a velocidade de corte não apresenta influência significativa sobre os valores de cilindridade. Na Figura 73, é possível observar sob o ponto de vista qualitativo que

apenas a velocidade de 150m/min para um avanço de 0,12mm apresentou valor diferenciado se comparado aos demais resultados.

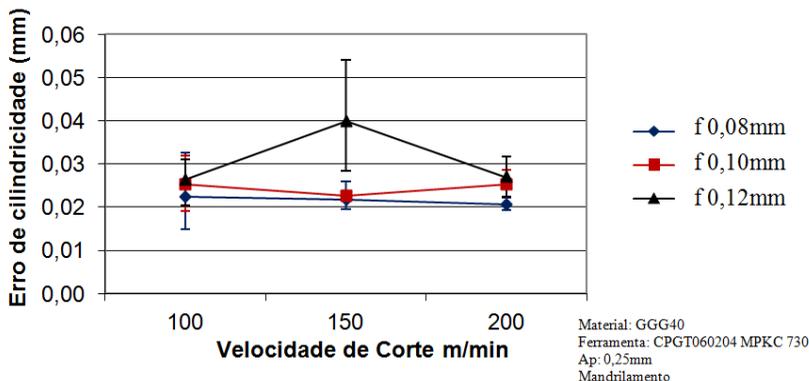


Figura 73: Influência da velocidade de corte no mandrilamento sobre o erro de cilindridade.

Tendo em vista o fato que os resultados não apresentaram tendência, a associação do valor obtido para as condições de corte citadas anteriormente podem estar relacionada à interferência de variáveis secundárias do ensaio como, por exemplo, problemas localizados de falta de homogeneidade do material.

Mühle [3], em ensaios de mandrilamento em aço SAE 1020, não observou variação da cilindridade com a variação da velocidade de corte para valores até 220m/min, contudo o aumento de 220 até 340m/min provocou um substancial incremento nos resultados, apresentando uma perceptível tendência de aumento da circularidade com o aumento da velocidade de corte, tanto para ferramentas balanceadas como ferramentas não-balanceadas.

Godinho [4] não observou tendência de comportamento bem definida em relação ao desvio de retitude com a variação da velocidade de corte para valores entre 120 e 130m/min.

- **Influência da profundidade de corte**

De acordo com os valores p obtidos no teste de ANOVA (para $v_{c100m/min}$, $p = 0,202$; $v_{c150m/min}$, $p = 0,551$ e $v_{c200m/min}$, $p = 0,322$) a profundidade de corte nas condições de testes realizadas não apresentou influência significativa sobre os resultados de cilindridade.

Na Figura 74 é possível observar que os resultados encontrados não apresentam tendência para nenhuma condição de teste e que o aumento do avanço de 0,12mm para 0,25mm para as velocidades de corte de 150m/min e 200m/min provocou uma redução na cilindridade e em seguida de um incremento da mesma com o aumento do avanço para 0,35m/min.

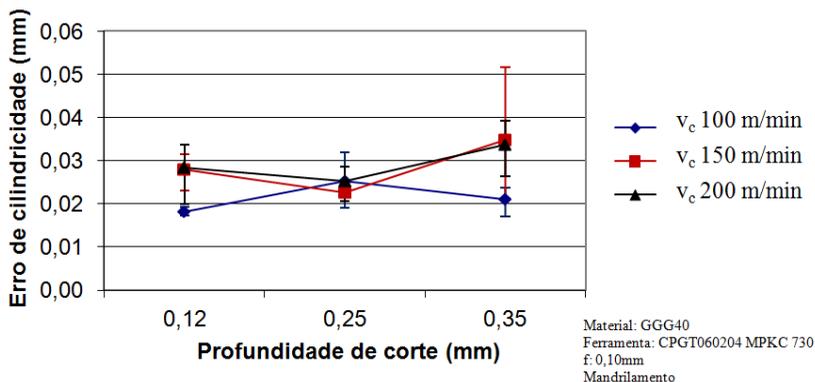


Figura 74: Influência da profundidade de corte sobre o erro de cilindridade.

4.2.3 Análise da rugosidade

• Influência do avanço

De acordo com os valores p obtidos no teste de ANOVA (para $v_{c100m/min}$, $p = 0,072$; $v_{c150m/min}$, $p = 5 \times 10^{-5}$ e $v_{c200m/min}$, $p = 6 \times 10^{-5}$) o avanço apresentou influência significativa sobre os resultados de rugosidade em duas condições de ensaios, uma para a v_c de 150m/min e outra para v_c 200m/min. Entretanto é possível observar na Figura 75 que para todos os ensaios realizados o aumento do avanço provocou uma tendência de aumento nos valores de rugosidade.

Segundo König [18], a rugosidade cinemática é decorrente da forma da quina da ferramenta e do movimento relativo entre ferramenta e peça. No caso do torneamento, que por sua vez é um processo similar ao mandrilamento a rugosidade cinemática é principalmente influenciada pela forma do gume e pelo avanço.

Neto [40] também observou a tendência de aumento da rugosidade com o aumento do avanço no torneamento interno de cilindros de blocos de motores. Böttger *apud* Mühle [3], em ensaios de torneamento interno em aço CK45 verificou a mesma tendência de aumento da rugosidade em função do aumento do avanço.

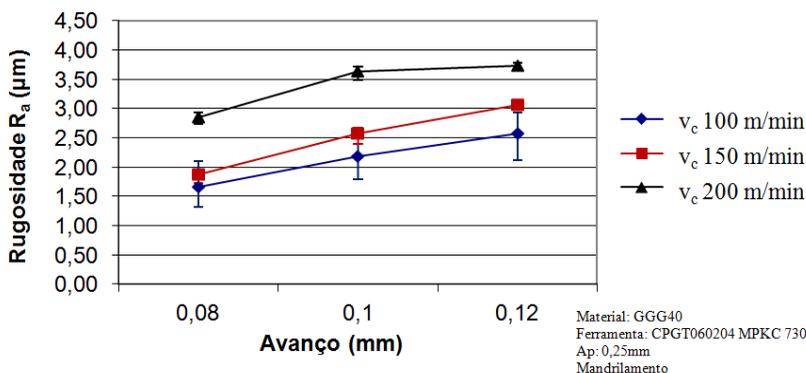


Figura 75: Influência do avanço no mandrilamento sobre a rugosidade.

- **Influência da velocidade de corte**

De acordo com os valores p encontrados no teste de ANOVA (para $f_{0,08mm}$, $p = 0,002$; $f_{0,10mm}$, $p = 5 \times 10^{-4}$ e $f_{0,12mm}$, $p = 0,003$) a variação da velocidade de corte acarretou uma diferença significativa nos resultados de rugosidade.

Na Figura 76, é possível observar que o aumento da velocidade de corte dentro da faixa analisada provocou um aumento na rugosidade média do furo para as três condições de avanço.

Segundo Stemmer [24], a utilização de velocidades de corte na faixa de formação do gume postigo piora a rugosidade. Já o aumento da velocidade de corte provoca uma diminuição nos valores de rugosidade. Desta forma, os resultados contraditórios encontrados podem estar associados ao aumento da vibração do conjunto máquina-ferramenta.

Mühle [3], em ensaios de mandrilamento com cabeçotes de excentricidade regulável e sistema de balanceamento, encontrou um aumento nos níveis de vibração com o aumento da velocidade de corte para valores até 260m/min, respectivamente os valores de rugosidades médias apresentaram uma tendência de aumento na mesma proporção.

Polli [2], na análise do processo de mandrilamento de acabamento do aço ABNT 1213, verificou que para ferramentas de mandrilar onde a relação $L/D=4,5\text{mm}$ a velocidade de corte não apresentou influência significativa nos níveis de vibração, entretanto para a relação $L/D=6$, o aumento da velocidade de corte provocou aumento significativo na vibração durante a usinagem.

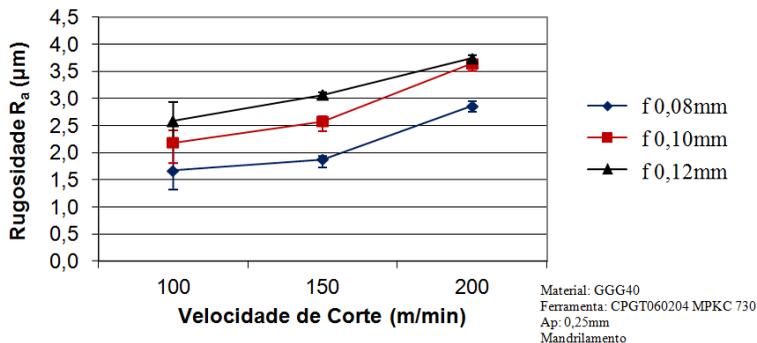


Figura 76: Influência da velocidade de corte sobre a rugosidade.

- **Influência da profundidade de corte**

De acordo com os valores p ($v_c 100\text{m/min}$, $p = 0,001$; $v_c 150\text{m/min}$, $p = 0,256$ e $v_c 200\text{m/min}$, $p = 0,011$) encontrados no teste de ANOVA, a profundidade de corte apresenta influência significativa sobre a rugosidade para dois valores de velocidades de corte, 100m/min e 200m/min. Contudo, observando-se a Figura 77 é possível notar a clara tendência de aumento da rugosidade média com o aumento da profundidade de corte para todas as velocidades testadas.

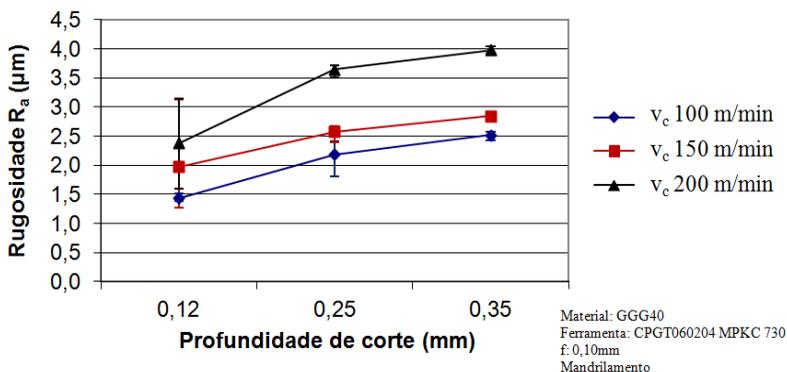


Figura 77: Influência da profundidade de corte no mandrilamento sobre a rugosidade.

Segundo Stemmer [24], a seção de usinagem tem efeito ponderável sobre a qualidade do furo, uma vez que maiores esforços geralmente estão associados com superfícies de menor qualidade. A profundidade de corte, por sua vez, influencia a qualidade do furo de uma forma mais discreta do que outros parâmetros de processo como, por exemplo, o avanço.

4.2.4 Análise da variação dimensional

- **Influência do avanço**

De acordo com os valores p ($v_{c100m/min} = 7 \times 10^{-4}$; $v_{c150m/min} = 1 \times 10^{-5}$ e $v_{c200m/min} = 1 \times 10^{-5}$) obtidos no teste de ANOVA é possível verificar que o avanço apresenta influência significativa sobre a variação dimensional.

A Figura 78 mostra a redução na dimensão do furo com o aumento do avanço, de tal forma que pode ser identificada claramente uma tendência no comportamento desta variável para diversas condições de usinagem.

Este comportamento é esperado, uma vez que maiores avanços provocam o aumento nas componentes de força e aumentam as solicitações mecânicas na ponta da ferramenta, fazendo com que o conjunto ferramenta, composto pelo inserto, haste de fixação, cabeçote mandrilador e cone adaptador, esteja sujeito à deformação proveniente do aumento destes esforços. Esta característica é bem peculiar a

processos de usinagem que utilizam ferramentas monocortantes sem a presença de elementos de guia.

Na prática industrial, esta variação dimensional provocada pela alteração dos parâmetros de usinagem pode ser compensada com a regulagem de diâmetro na própria ferramenta. Entretanto, esta regulagem não foi executada em virtude do trabalho em questão ter como foco a verificação e entendimento do comportamento do processo em função da variação de alguns parâmetros de usinagem.

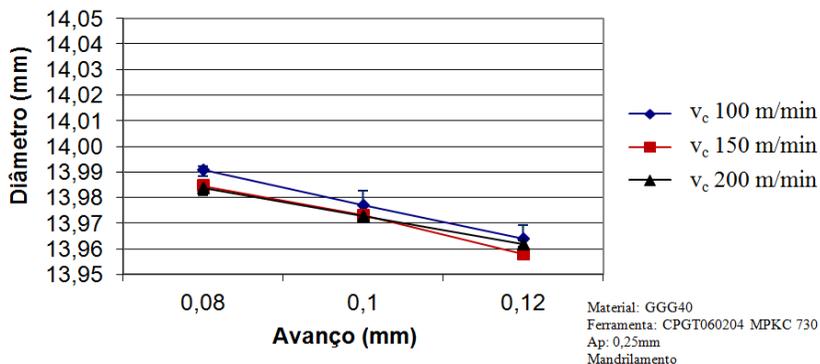


Figura 78: Influência do avanço sobre a dimensão do furo.

- **Influência da velocidade de corte**

De acordo com os valores de p ($f_{0,08\text{mm}}$, $p = 0,024$; $f_{0,10\text{mm}}$, $p = 0,251$ e $f_{0,12\text{mm}}$, $p = 0,156$) obtidos no teste de ANOVA, a velocidade de corte dentro da faixa estudada apresenta influência significativa sobre a variação dimensional quando empregado um avanço de 0,08mm. Tal resultado é referente à alteração da velocidade de corte de 100 para 150m/min. Na Figura 79 é possível verificar um comportamento de redução do diâmetro com o aumento da velocidade de corte para as curvas de avanço de 0,08 e 0,12mm.

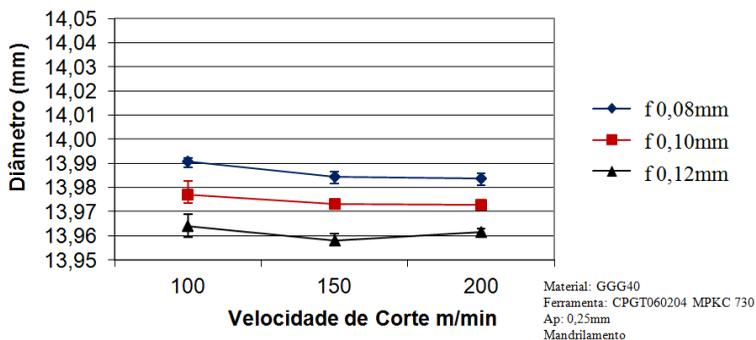


Figura 79: Influência da velocidade de corte sobre a dimensão do furo.

Neto [40], em ensaios de torneamento interno de cilindros automotivos, verificou que a utilização de maiores velocidades de corte ocasiona a obtenção de furos com maiores diâmetros do que com velocidades menores, porém ao longo dos testes o autor observou que a diminuição dos furos para velocidade de cortes maiores foi mais acentuada, comportamento justificado pelo autor como sendo o aumento na taxa de desgaste da ferramenta de corte provocado pela temperatura elevada em função da maior velocidade de corte.

- **Influência da profundidade de corte**

De acordo com os valores p (para $v_{c100m/min}$, $p = 2 \times 10^{-4}$; $v_{c150m/min}$, $p = 9 \times 10^{-9}$ e $v_{c200m/min}$, $p = 1 \times 10^{-7}$) obtidos no teste de ANOVA, a variação da profundidade de corte apresentou diferença significativa nos valores dimensionais dos furos executados. De acordo com testes do tipo *LSD*, a diferença significativa foi obtida com a variação da profundidade de corte de 0,12mm para 0,25mm, Figura 80.

De acordo com König [18], o aumento da profundidade de corte provoca um aumento nas forças envolvidas no processo, principalmente nas forças de corte e passiva, o que acaba provocando uma deflexão na haste da ferramenta. Em virtude de ser uma usinagem interna, tal deflexão acarreta na diminuição do diâmetro do furo.

A manutenção e, em alguns casos, o ligeiro aumento no diâmetro do furo com o aumento da profundidade de corte de 0,25mm para 0,35mm, podem estar associados à ocorrência de instabilidade no processo em virtude de maiores esforços de corte ou à menor rigidez no sistema de fixação da ferramenta, uma vez que em alguns momentos

durante a execução desta configuração de ensaio foi observada a presença de vibrações na usinagem.

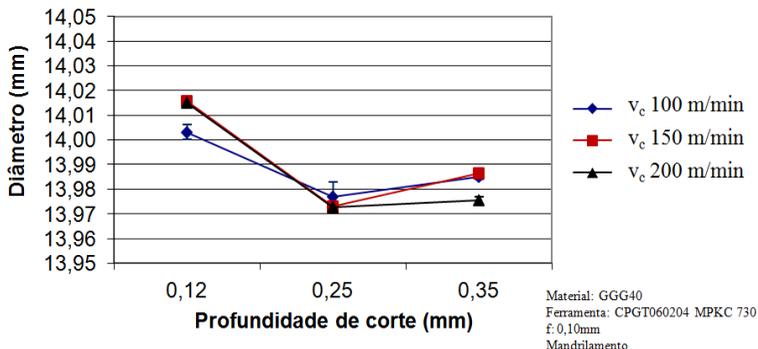


Figura 80: Influência da profundidade de corte no mandrilamento sobre a dimensão do furo.

4.3 Análise Comparativa entre os Processos de Alargamento e Mandrilamento

4.3.1 Análise da circularidade

Para a análise comparativa entre os dois processos avaliados foi estipulado um limite máximo de circularidade no valor de $18\mu\text{m}$. Desta forma, considera-se que os resultados obtidos acima desta faixa não satisfazem o requisito de qualidade, independentemente da produtividade.

Nas Figuras 81, 82 e 83 é possível observar os resultados de circularidade em função dos parâmetros (avanço, velocidade de corte e profundidade de corte) para os dois processos avaliados. De uma forma geral nota-se que o processo de alargamento mostrou-se mais estável do que o processo de mandrilamento quando submetido à variação dos parâmetros de entrada, apresentando 92,6% dos resultados dentro do limite estabelecidos contra 40,7%, respectivamente.

Na avaliação da influência do avanço (Figura 81), ambos os processos apresentaram aumento no valor de circularidade com o aumento do avanço. No caso do processo de mandrilamento os valores

obtidos foram ligeiramente maiores que os do alargamento e com crescimento mais acentuado a partir do avanço de 0,10mm.

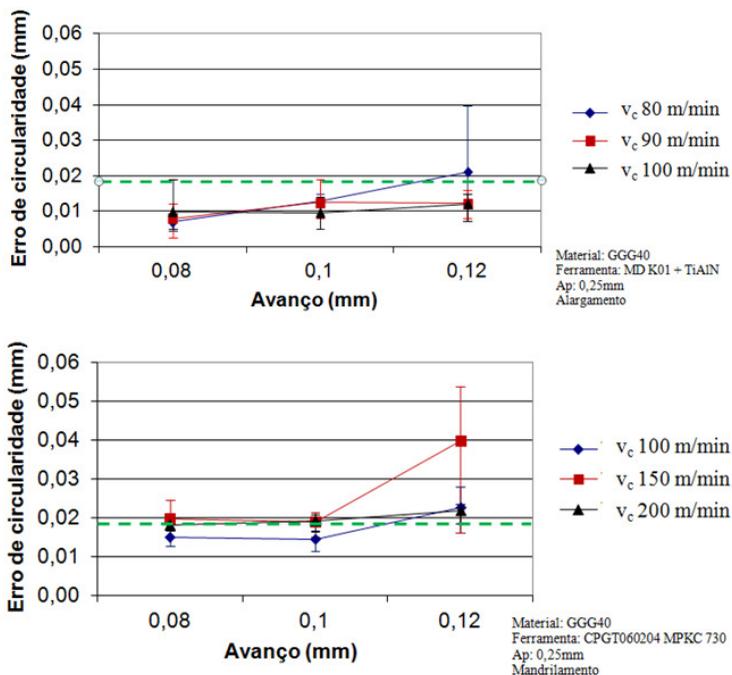


Figura 81: Análise comparativa para circularidade em função do avanço.

A velocidade de corte (Figura 82) apresentou maior influência nos resultados de circularidade para o processo de mandrilamento do que para o alargamento. Neste primeiro caso os únicos resultados dentro do limite especificado foram encontrados para velocidades de corte mais baixas, já no alargamento a tendência foi inversa, apresentando melhores resultados para velocidades maiores.

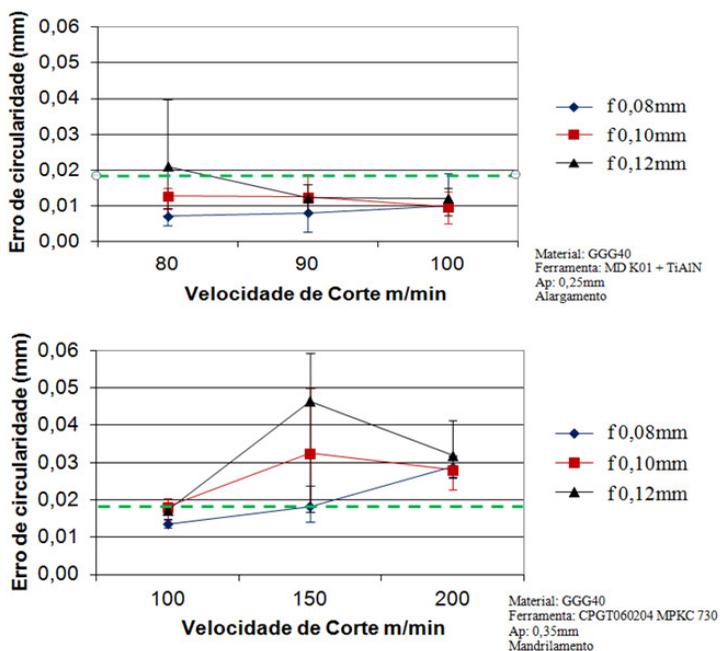


Figura 82: Análise comparativa para circularidade em função da velocidade de corte.

A variação da profundidade de corte dentro da faixa utilizada não se mostrou significativa sobre os resultados de circularidade para o processo de alargamento. Já no caso do mandrilamento a profundidade de corte na ordem de 0,35mm provocaram um aumento considerável na circularidade. Este comportamento de aumento de profundidade de corte é similar à redução do diâmetro do pré-furo provocado pelo desgaste da ferramenta de desbaste em condições de produção seriada. Desta forma, no caso do mandrilamento, é importante o controle desta faixa de desgaste em virtude de sua maior sensibilidade com relação a este parâmetro (Figura 83).

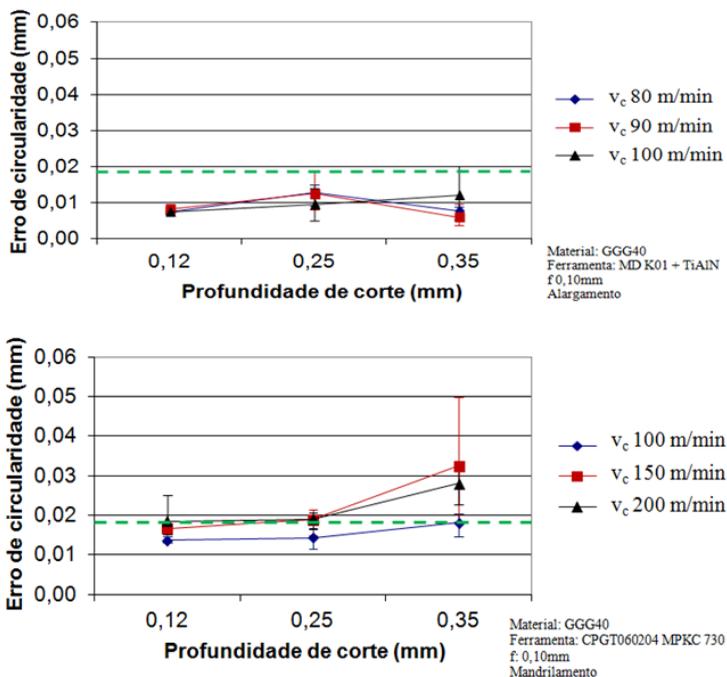


Figura 83: Análise comparativa para circularidade em função da profundidade de corte.

4.3.2 Análise da cilindricidade

Para uma análise comparativa entre os resultados de cilindricidade obtidos nos testes de alargamento e mandrilamento, foi estipulado um limite máximo de cilindricidade de $25\mu\text{m}$. As Figuras 84, 85 e 86 mostram os resultados de cilindricidade em função da variação dos parâmetros de entrada (f , v_c , a_p) para os dois processos analisados.

A influência do avanço sobre a cilindricidade (Figura 84) apresentou comportamento diferente entre os processos. Para o alargamento, a maioria dos resultados obtidos situou-se dentro da faixa de tolerância pré-estabelecida, entretanto os valores não apresentaram tendência de comportamento. O processo de mandrilamento apresentou uma maior quantidade de pontos acima ou muito próximos do limite especificado, porém apresentou menor dispersão e uma clara tendência de aumento da cilindricidade com o aumento do avanço. Os menores

valores de cilindridade foram obtidos com a utilização de menores taxas de avanços, possibilitando a obtenção de furos com erros de cilindridade na ordem de $5\mu\text{m}$ para o processo de alargamento e $15\mu\text{m}$ para o mandrilamento.

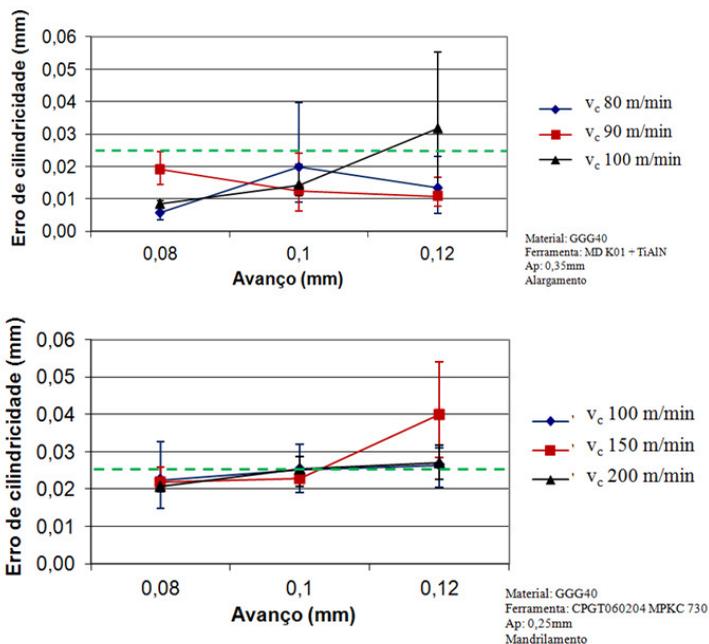


Figura 84: Análise comparativa da cilindridade em função do avanço.

Na avaliação da influência da velocidade de corte sobre a cilindridade, pode-se observar (Figura 85) que para os ensaios de alargamento os valores situaram-se dentro da faixa especificada e apresentaram de uma forma geral tendência de diminuição com o aumento da velocidade de corte. Para o caso do processo de mandrilamento, os valores obtidos situaram-se próximo ao limite estipulado, porém praticamente sem alteração da cilindridade com o aumento da velocidade de corte, com exceção ao ensaio realizado com v_c de 150m/min e avanço de 0,12mm.

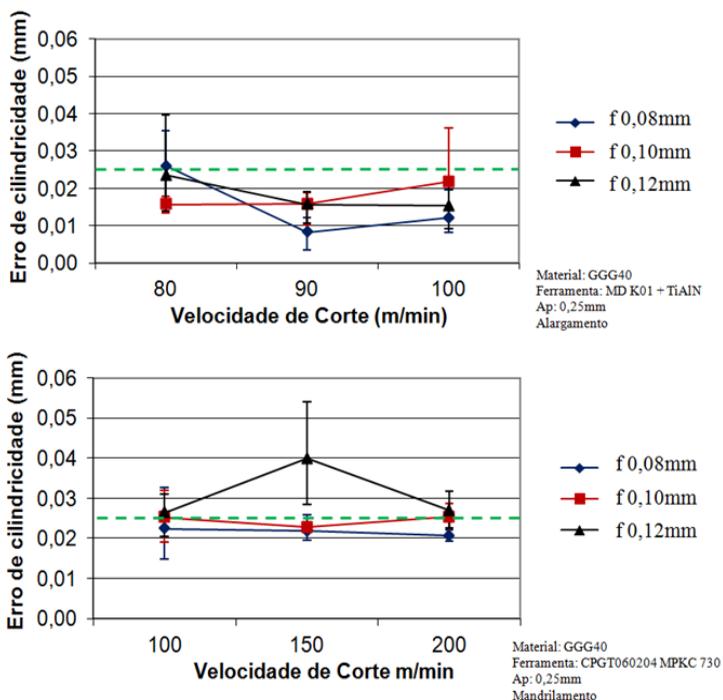


Figura 85: Análise comparativa da cilindridade em função da velocidade de corte.

Na Figura 86 é possível observar a influência da profundidade de corte sobre a cilindridade. Para o processo de alargamento a variação da profundidade de corte apresentou algumas alterações nos valores de cilindridade sem muita caracterização na forma do comportamento. Já no caso do mandrilamento, a variação da profundidade de corte apresentou forte influência sobre os resultados de cilindridade sem caracterização típica de tendência.

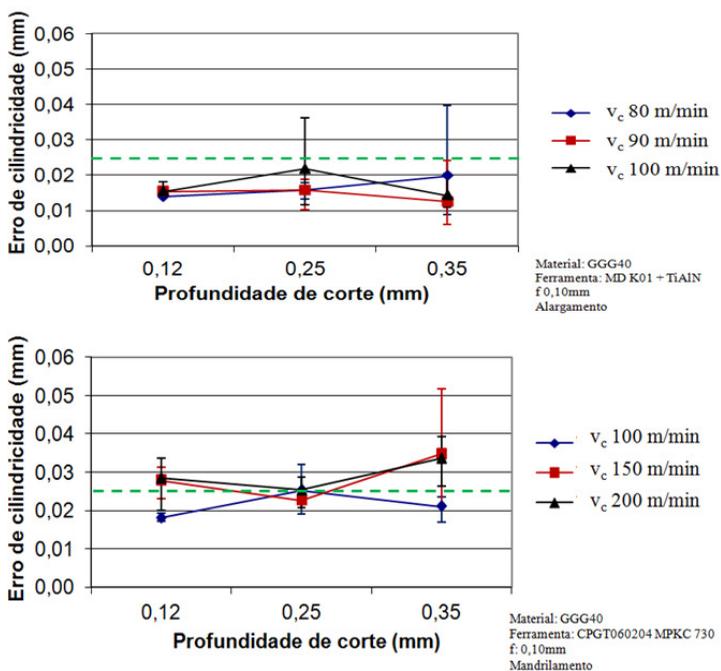


Figura 86: Análise comparativa da cilindridade em função da profundidade de corte.

Na comparação entre o processo de alargamento e o processo de mandrilamento, pode-se notar que os valores de cilindridade obtidos no alargamento foram de uma forma geral menores dos que encontrados no processo de mandrilamento e que apesar da variação nos resultados, 92,6% dos furos usinados estavam dentro do limite especificado, contra 55% do mandrilamento. Outro aspecto a ser avaliado é a proximidade dos resultados no teste de mandrilamento com o valor máximo de cilindridade admissível neste trabalho, representado pela média nos resultados de 15 μ m do alargamento contra 27 μ m do mandrilamento.

4.3.3 Análise da rugosidade

Para avaliação comparativa entre os processos, foi estipulado um limite máximo de rugosidade média de 1,6 μ m. As Figuras 87, 88 e 89 mostram os resultados de rugosidade em função da variação dos

parâmetros de usinagem (f , v_c e a_p) para o processo de alargamento e mandrilamento.

A diferença no comportamento da rugosidade entre os dois processos estudados apresentam características bem distintas, pois de uma forma geral, os resultados de rugosidade para o processo de mandrilamento foram maiores do que os resultados encontrados no processo de alargamento. Conforme explicado no item 2.2.1, este comportamento no processo de alargamento é atribuído ao pequeno ângulo de inclinação da lâmina que promove o alisamento da superfície e da presença dos elementos de guia, que realizam o esmagamento dos picos da rugosidade. No caso dos resultados para o ensaio de mandrilamento todos os testes apresentaram aumento da rugosidade com o aumento dos parâmetros ensaiados, os quais avanço (Figura 87), velocidade de corte (Figura 88) e profundidade de corte (Figura 89) onde na maioria dos ensaios os resultados estiveram acima do valor especificado.

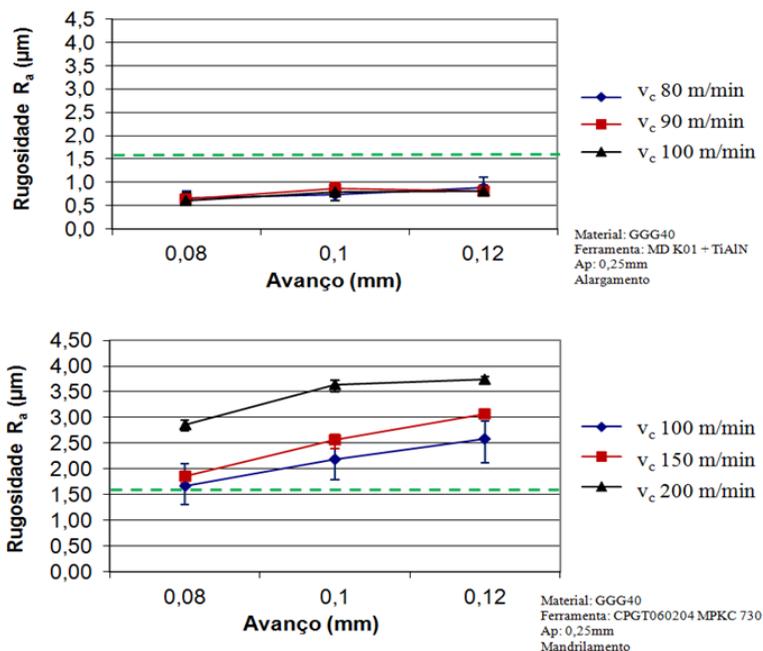


Figura 87: Análise comparativa da rugosidade em função do avanço.

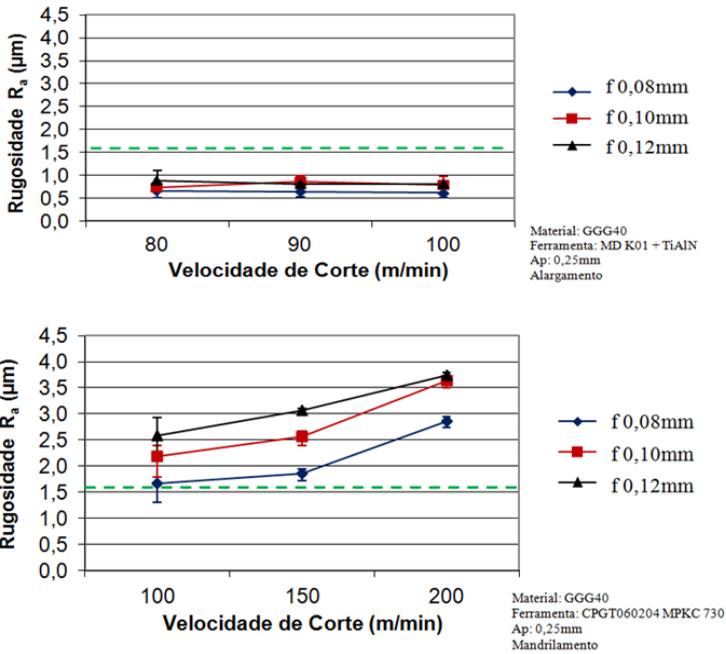


Figura 88: Análise comparativa da rugosidade em função da velocidade de corte.

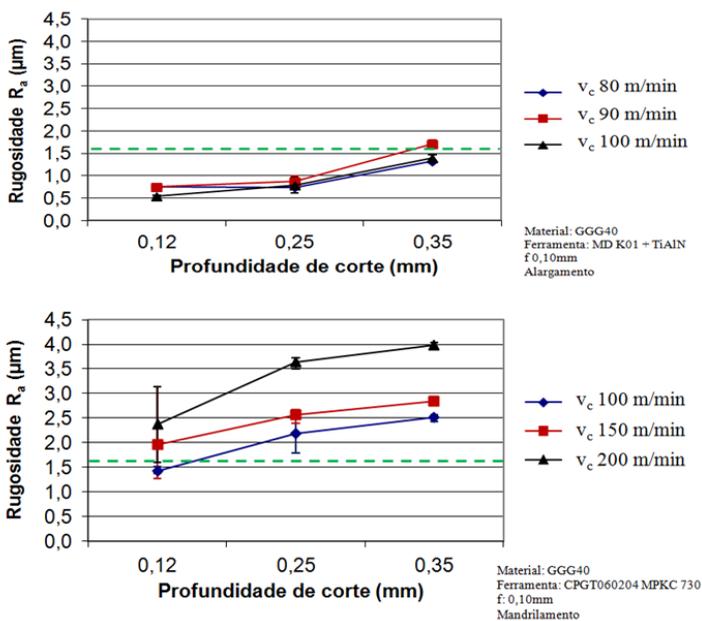


Figura 89: Análise comparativa da rugosidade em função da profundidade de corte.

4.3.4 Análise da variação dimensional

Para comparação dos resultados de qualidade dimensional, foi utilizado o padrão de qualidade IT7 com tolerância de ajuste H, desta forma o valor nominal definido foi de 14mm com afastamento inferior de $0\mu\text{m}$ e um afastamento superior de $18\mu\text{m}$. Nas Figuras 90, 91 e 92 é possível observar o comportamento dimensional do diâmetro alargado e mandrilado para diferentes condições de ensaios. Vale ressaltar que os dois processos partiram de uma regulagem padrão de diâmetro e que no caso do mandrilamento a variação dimensional ocorrida em virtude das diferentes condições de parâmetros pode ser corrigida, regulando-se a ferramenta para a faixa de valores desejado. Como o objetivo deste trabalho é justamente avaliar o comportamento de ambos os processos em função da variação de alguns parâmetros de usinagem, esta correção não foi realizada.

Pode-se observar que no processo de alargamento a influência dos parâmetros de usinagem (f , v_c e a_p) sobre a qualidade dimensional não apresentou grandes diferenças, se comparado aos resultados do

processo de mandrilamento (Figuras 90 - 92). Este fato pode estar associado à presença do elemento de guia na ferramenta de alargar, que por sua vez promove a anulação das forças e diminuem as solicitações dinâmicas no corpo da ferramenta durante o processo de usinagem.

A variável mais significativa nos resultados para o processo de mandrilamento é o avanço, pois possibilita a identificação de uma clara tendência de diminuição no diâmetro do furo com o aumento do avanço, seguido pela profundidade de corte e posteriormente com a velocidade de corte. Estes dois primeiros parâmetros estão associados ao aumento da secção de usinagem, que por sua vez interfere nos esforços mecânicos no qual a ferramenta esta submetida. Estas cargas promovem deformações elásticas no corpo da ferramenta durante o processo de usinagem e provocam uma redução na dimensão do diâmetro do furo, tendo em vista se tratar de um processo de usinagem interna.

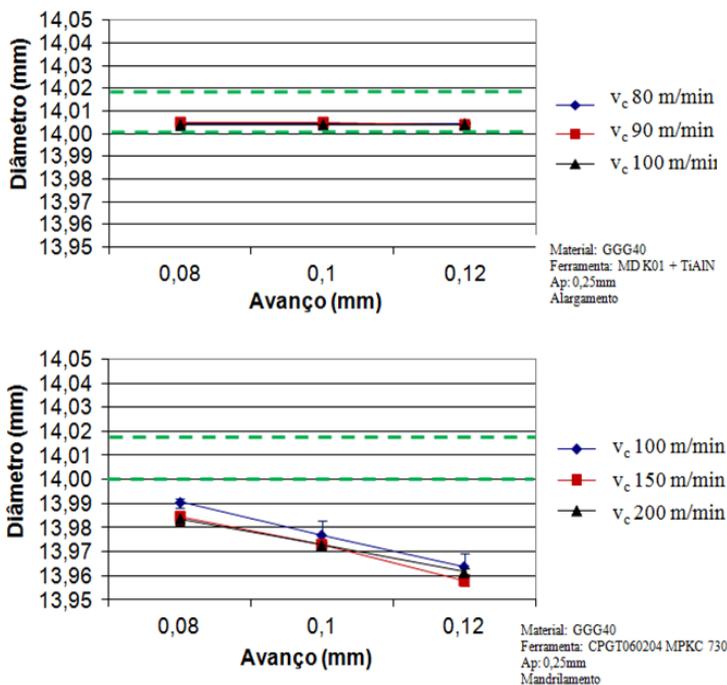


Figura 90: Análise comparativa da variação dimensional em função do avanço.

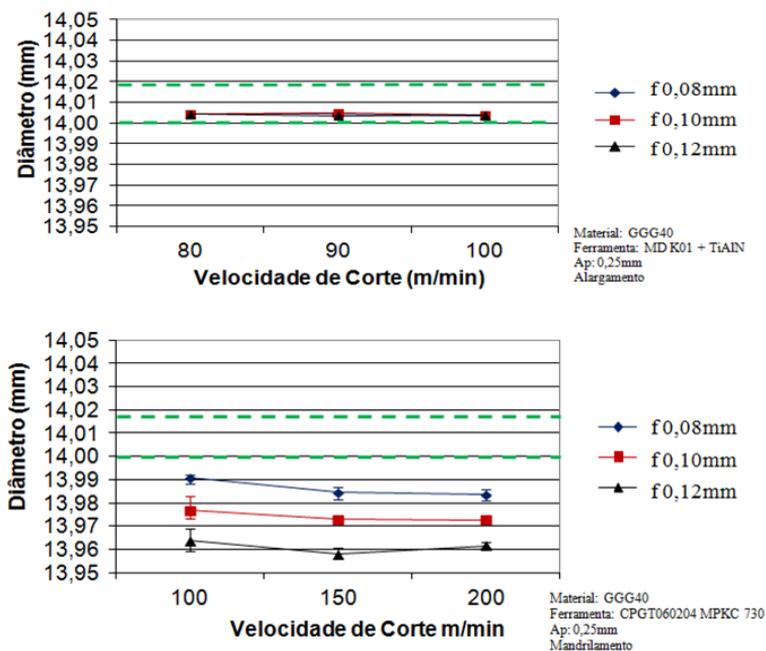


Figura 91: Análise comparativa da variação dimensional em função da velocidade de corte.

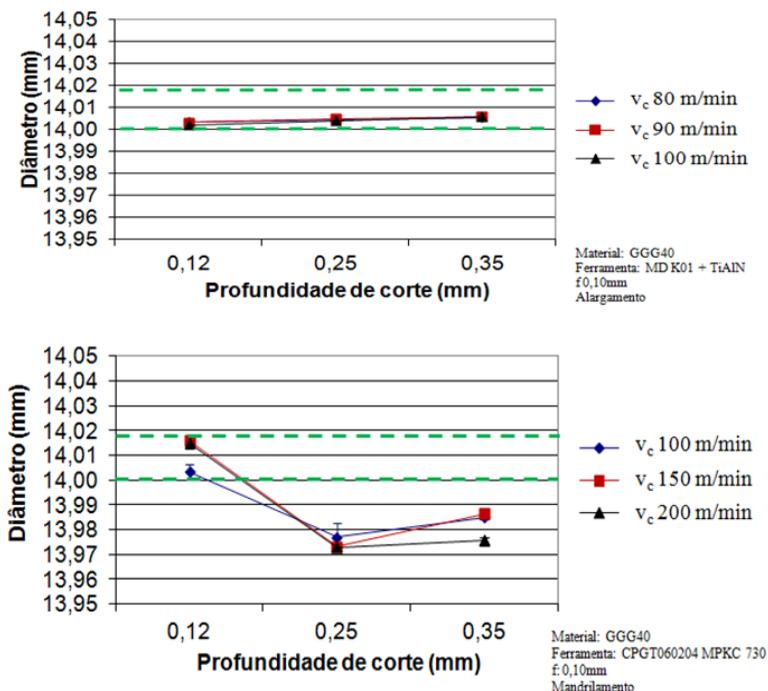


Figura 92: Análise comparativa da variação dimensional em função da profundidade de corte.

4.3.5 Análise de produtividade x qualidade

Neste capítulo será abordada a produtividade de cada processo de acordo com os parâmetros utilizados em cada ensaio, bem como seus respectivos resultados. Para tanto serão considerados apenas os resultados que satisfazem todos os requisitos de qualidade simultaneamente (circularidade, cilíndricidade, rugosidade e qualidade dimensional), pois se entende que para um processo produtivo, independente dos valores de cada característica avaliada, é de fundamental importância que todas as especificações do produto sejam atendidas.

De acordo com os parâmetros de usinagem fornecidos pelos fabricantes e utilizados nos ensaios é possível observar que o processo de mandrilamento utiliza um menor tempo de usinagem para produzir o mesmo furo em relação ao processo alargamento, como pode ser visto

na Tabela 13. O tempo de usinagem utilizando o processo de mandrilamento pode ser 50% menor do que o tempo para executar o furo pelo processo de alargamento.

Tabela 13: Tempos de usinagem para o processo de alargamento e mandrilamento.

Nº Ensaio Alargamento	Tempo de Usinagem Alargamento (s)	Nº Ensaio Mandrilamento	Tempo de Usinagem Mandrilamento (s)
9	7,7	18	3,8
6	8,5	17	4,6
8	9,2	15	5,1
3	9,6	16	5,8
5	10,3	14	6,2
2	11,5	12	7,7
7	11,5	13	7,7
4	12,8	11	9,2
1	14,4	10	11,5

A Tabela 14 mostra os resultados médios de circularidade, cilindridade, rugosidade e diâmetro para o processo de alargamento, onde os valores destacados em verde estão dentro da faixa de tolerância especificada e os valores destacados em vermelho fora da faixa. É possível notar que apenas 4 ensaios não atenderam os requisitos de qualidade, representando um percentual de aprovação de 85% das condições ensaiadas.

No processo de alargamento, os ensaios que possibilitaram produzir as furações dentro da faixa especificada com o menor tempo de usinagem possível foram os ensaios 9 e 27, exigindo 7,7 segundos para cada furo.

Tabela 14: Resultados x tempo de usinagem para o alargamento.

Resultados para o processo de alargamento								
Ensaio	v_c	a_p	f	Diâmetro (mm) 14±0,018	Circularidade (mm) 0,018mm	Cilindricidade (mm) 0,025mm	Rugosidade (μ m) Ra 1,6 μ m	Tempo de Usinagem (s)
1	80	0,12	0,08	14,005	0,008	0,015	0,61	14,4
2	80	0,12	0,1	14,003	0,007	0,014	0,75	11,5
3	80	0,12	0,12	14,004	0,007	0,014	1,03	9,6
4	90	0,12	0,08	14,002	0,007	0,013	0,73	12,8
5	90	0,12	0,1	14,003	0,008	0,015	0,75	10,3
6	90	0,12	0,12	14,003	0,008	0,015	0,85	8,5
7	100	0,12	0,08	14,003	0,007	0,014	0,52	11,5
8	100	0,12	0,1	14,002	0,007	0,015	0,54	9,2
9	100	0,12	0,12	14,003	0,008	0,015	0,91	7,7
19	80	0,25	0,08	14,004	0,007	0,026	0,66	14,4
20	80	0,25	0,1	14,004	0,013	0,016	0,74	11,5
21	80	0,25	0,12	14,005	0,021	0,023	0,88	9,6
22	90	0,25	0,08	14,005	0,008	0,008	0,65	12,8
23	90	0,25	0,1	14,005	0,012	0,016	0,87	10,3
24	90	0,25	0,12	14,004	0,012	0,016	0,81	8,5
25	100	0,25	0,08	14,004	0,010	0,012	0,61	11,5
26	100	0,25	0,1	14,004	0,010	0,022	0,78	9,2
27	100	0,25	0,12	14,004	0,012	0,015	0,81	7,7
37	80	0,35	0,08	14,005	0,005	0,006	1,05	14,4
38	80	0,35	0,1	14,005	0,008	0,020	1,32	11,5
39	80	0,35	0,12	14,006	0,005	0,013	1,49	9,6
40	90	0,35	0,08	14,005	0,008	0,019	1,52	12,8
41	90	0,35	0,1	14,006	0,006	0,013	1,71	10,3
42	90	0,35	0,12	14,007	0,007	0,011	1,45	8,5
43	100	0,35	0,08	14,005	0,007	0,008	1,37	11,5
44	100	0,35	0,1	14,006	0,012	0,014	1,39	9,2
45	100	0,35	0,12	14,005	0,024	0,032	1,48	7,7
			Mínimo	14,002	0,005	0,006	0,52	7,7
			Máximo	14,007	0,024	0,032	1,71	14,4

A Tabela 15 mostra os resultados médios avaliados no processo de mandrilamento, sendo que apenas dois ensaios apresentaram valores adequados para os requisitos de qualidade. Dentre estes dois, o que apresentou maior produtividade foi o com as condições do ensaio 18, que exigiu 3,8 segundos para execução da operação de acabamento.

Tabela 15: Resultados x tempo de usinagem para o mandrilamento.

Resultados para o processo de mandrilamento								
Ensaio	v_c	a_p	f	Diâmetro (mm) 14±0,018	Circularidade (mm) 0,018mm	Cilindricidade (mm) 0,025mm	Rugosidade (μm) Ra 1,6 μm	Tempo de Usinagem (s)
10	100	0,12	0,08	14,011	0,015	0,019	1,79	11,5
11	100	0,12	0,1	14,003	0,014	0,018	1,43	9,2
12	100	0,12	0,12	13,997	0,013	0,018	2,75	7,7
13	150	0,12	0,08	14,017	0,018	0,027	3,59	7,7
14	150	0,12	0,1	14,016	0,017	0,028	1,97	6,2
15	150	0,12	0,12	14,008	0,019	0,025	1,87	5,1
16	200	0,12	0,08	14,015	0,016	0,023	3,39	5,8
17	200	0,12	0,1	14,015	0,019	0,028	2,38	4,6
18	200	0,12	0,12	14,006	0,013	0,022	1,44	3,8
28	100	0,25	0,08	13,991	0,015	0,022	1,67	11,5
29	100	0,25	0,1	13,977	0,014	0,025	2,19	9,2
30	100	0,25	0,12	13,964	0,023	0,026	2,58	7,7
31	150	0,25	0,08	13,985	0,020	0,022	1,87	7,7
32	150	0,25	0,1	13,973	0,019	0,023	2,58	6,2
33	150	0,25	0,12	13,958	0,040	0,040	3,06	5,1
34	200	0,25	0,08	13,984	0,018	0,021	2,86	5,8
35	200	0,25	0,1	13,973	0,019	0,025	3,64	4,6
36	200	0,25	0,12	13,962	0,022	0,027	3,74	3,8
46	100	0,35	0,08	13,997	0,014	0,020	1,95	11,5
47	100	0,35	0,1	13,985	0,018	0,021	2,51	9,2
48	100	0,35	0,12	13,974	0,017	0,024	2,98	7,7
49	150	0,35	0,08	14,004	0,018	0,035	1,85	7,7
50	150	0,35	0,1	13,986	0,032	0,035	2,84	6,2
51	150	0,35	0,12	13,971	0,046	0,050	3,80	5,1
52	200	0,35	0,08	13,989	0,029	0,038	3,27	5,8
53	200	0,35	0,1	13,976	0,028	0,034	3,98	4,6
54	200	0,35	0,12	13,960	0,032	0,034	4,47	3,8
			Mínimo	13,958	0,013	0,018	1,43	3,8
			Máximo	14,017	0,046	0,050	4,47	11,5

De acordo com as configurações de ensaios realizadas e com os resultados obtidos neste trabalho, o processo de alargamento mostrou-se mais indicado para aplicação em questão, pois obteve resultados com menores dispersões na usinagem dos furos. Os reduzidos valores de rugosidade, circularidade, cilindridade e variação dimensional encontrados nos ensaios de alargamento, permitem que sejam utilizados parâmetros de processos mais elevados para diminuição dos tempos de usinagem. O processo de mandrilamento apesar de proporcionar maior produtividade, dentro da faixa de testes realizados apresentou maior dispersão nos resultados se comparado ao alargamento e uma baixa quantidade de furos dentro das características especificadas.

O processo de mandrilamento utilizado neste trabalho, por possibilitar sua aplicação em uma maior faixa de diâmetro, pode ser empregado em processos produtivos onde o tamanho de lote é reduzido ou em processos onde a fabricação de peças é unitária, pois nestes casos o controle da qualidade é realizado na sua grande maioria das vezes de forma unitária.

5 CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

5.1 Conclusões

A utilização de ferramentas de alargar e ferramentas de mandrilar levam a alternativas flexíveis e economicamente viáveis para fabricação de furos de precisão em escala produtiva, uma vez que não exigem equipamentos sofisticados ou com aplicações dedicadas a esta finalidade.

A escolha do tipo de processo e parâmetros de usinagem a serem utilizados estão relacionados à produtividade desejada e aos requisitos de projeto do produto, dos quais podem ser citados a tolerância dimensional, os desvios de forma e a qualidade da superfície. Desta forma os ensaios realizados neste trabalho possibilitaram identificar as características e o comportamento dos processos de alargamento com ferramenta de gume único regulável e do mandrilamento de precisão com cabeçote de ajuste micrométrico e sistema de balanceamento, quando submetidos à variação dos parâmetros de processos avanço, velocidade de corte e profundidade de corte.

O presente estudo permitiu um melhor direcionamento e otimização na escolha de ferramental para a produção de furos de pequenos diâmetros de acordo com os resultados de qualidade desejados, bem como um melhor aproveitamento dos recursos de ferramentas já disponíveis por meio da utilização de parâmetros de usinagem mais adequados e que possibilitem melhores resultados de qualidade e produtividade, uma vez que ambas as ferramentas possuem custo elevado e representam uma parcela significativa no valor total no inventário de ferramenta.

Circularidade

As variações dos parâmetros de usinagem apresentaram pouca influência sobre os resultados de circularidade para o processo de alargamento, apresentando em algumas combinações de parâmetros uma ligeira tendência de aumento com o aumento do avanço. O melhor resultado encontrado foi de $4\mu\text{m}$ para os parâmetros $f = 0,08\text{mm}$, $v_c = 80\text{m/min}$ e $a_p = 0,35\text{mm}$ e a maior circularidade, $23,6\mu\text{m}$, com a utilização dos parâmetros nos níveis mais severos ($f = 0,12\text{mm}$, $v_c = 100\text{m/min}$ e $a_p = 0,35\text{mm}$).

No processo de mandrilamento, as variações dos parâmetros de entrada apresentaram maior influência sobre os valores de circularidade, apresentando de uma forma geral tendência de piora da circularidade com o aumento da velocidade de corte, do avanço e da profundidade de corte. O melhor resultado encontrado foi de $13\mu\text{m}$ para os parâmetros $f=0,12\text{mm}$, $v_c=100\text{m/min}$ e $a_p=0,12\text{mm}$, ou seja, baixa velocidade, baixa profundidade de corte e alto avanço. O pior resultado foi de $46\mu\text{m}$, encontrado com a utilização dos parâmetros nos níveis mais altos de avanço e profundidade de corte e valor mediano de velocidade de corte ($f=0,12\text{mm}$, $v_c=150\text{m/min}$ e $a_p=0,35\text{mm}$).

No âmbito deste estudo, o processo de alargamento mostrou melhores valores de circularidade em relação ao processo de mandrilamento, tanto no que se refere ao menor valor obtido, quanto ao número de ensaios que se enquadram na faixa de tolerância especificada ($18\mu\text{m}$), representando um total de 92,6% para o alargamento contra 40,7% do mandrilamento.

Cilindricidade

Na análise dos resultados de cilindridade para o processo de alargamento, a avaliação isolada da influência de cada parâmetro de usinagem sobre o comportamento da cilindridade não possibilitou a identificação de uma tendência de resultados, nem tampouco a observação da variável mais crítica para esta característica. Porém com o aumento combinado de profundidade de corte e avanço foi possível observar uma tendência de aumento da cilindridade. O menor erro de cilindridade encontrado no processo de alargamento foi de $5\mu\text{m}$ para os parâmetros $f=0,08\text{mm}$, $v_c=80\text{m/min}$ e $a_p=0,35\text{mm}$. Já o pior resultado foi de $31\mu\text{m}$ na condição $f=0,12\text{mm}$, $v_c=100\text{m/min}$ e $a_p=0,35\text{mm}$, condição esta caracterizada por maior avanço, maior profundidade de corte e maior velocidade de corte.

No processo de mandrilamento, a variação dos parâmetros de usinagem apresentou maior impacto sobre a cilindridade. O incremento de todos os parâmetros ensaiados provocou um aumento no valor de cilindridade, porém a variável mais significativa e com tendência mais clara foi a profundidade de corte. O menor erro de cilindridade encontrado nos ensaios de mandrilamento foi de $18\mu\text{m}$ para os parâmetros $f=0,12\text{mm}$, $v_c=100\text{m/min}$ e $a_p=0,12\text{mm}$, enquanto que o pior resultado de $50\mu\text{m}$ foi encontrado para os parâmetros $f=0,12\text{mm}$, $v_c=150\text{m/min}$ e $a_p=0,35\text{mm}$.

Para as configurações de ensaios desta pesquisa, o processo de alargamento permitiu a obtenção de melhores valores de cilindridade se comparado ao processo de mandrilamento, ou seja, 92,6% dos ensaios de alargamento obtiveram resultados que se encaixam dentro da faixa estabelecida (25 μm) contra 44,4% do mandrilamento. Com relação à influência dos parâmetros de usinagem sobre a cilindridade, o processo de mandrilamento mostrou-se mais sensível à variação dos dados de entrada em relação ao processo de alargamento, evidenciando que os maiores esforços gerados em decorrência da utilização de parâmetros mais severos, promovem distúrbios e deformações durante o processo de mandrilamento do furo.

Rugosidade

Dentre as condições de usinagem testadas neste trabalho para os ensaios de alargamento, a profundidade de corte foi a variável que apresentou maior influência sobre o valor de rugosidade, verificando-se tendência de aumento com o aumento da profundidade. O aumento do avanço apresentou uma tímida tendência de crescimento nos valores de rugosidades, comportamento que pode estar associado ao conceito do processo de alargamento, que possui um efeito alisador em virtude da presença das guias e do maior comprimento de contato entre a aresta de corte secundária e a parede do furo, promovida pelo menor ângulo de inclinação da lâmina.

O menor valor de rugosidade média obtida nos ensaios de alargamento foi R_a 0,52 μm para a condição de baixo avanço, baixa profundidade de corte e alta velocidade de corte ($f = 0,08\text{mm}$, $v_c = 100\text{m/min}$ e $a_p = 0,12\text{mm}$).

Para o processo de mandrilamento, a influência dos parâmetros de usinagem sobre a rugosidade foi maior e apresentou uma tendência direta de aumento da rugosidade com o aumento dos parâmetros avaliados (f , v_c e a_p). O avanço, em virtude da cinemática do processo de mandrilamento, apresentou grande impacto sobre a rugosidade, apresentando uma tendência de aumento linear da rugosidade média com o aumento do mesmo, juntamente com a profundidade de corte, onde as utilizações de parâmetros mais elevados provocaram uma redução na qualidade da superfície.

O melhor resultado de rugosidade média encontrados nos testes de mandrilamento foi de 1,43 μm para uma condição de teste de $f = 0,10\text{mm}$, $v_c = 100\text{m/min}$ e $a_p = 0,12\text{mm}$ e o pior resultado foi de 4,47 μm com os dados de corte de $f = 0,12\text{mm}$, $v_c = 200\text{m/min}$ e $a_p = 0,35\text{mm}$,

representando a condição de corte mais extrema utilizada em todos os ensaios.

Considerando o limite de $1,6\mu\text{m}$ para a rugosidade média estipulada neste trabalho, apenas 7,4% dos ensaios de mandrilamento conseguiram atingir este valor, contra 96,3% dos ensaios de alargamento.

Tolerância dimensional

No processo de alargamento, apenas o parâmetro profundidade de corte apresentou influência sobre a variação dimensional do furo, porém com intensidade muito baixa. Dentre todas as combinações de parâmetros realizados nos ensaios de alargamento, a diferença entre o resultado de menor diâmetro (14,002mm) e o maior (14,006mm) ficou de apenas $4\mu\text{m}$, que para uma dimensão nominal de 14mm corresponde ao grau de tolerância padrão IT4 da norma NBR 6158/1995 (Sistema de tolerâncias e ajustes).

Considerando os parâmetros utilizados neste trabalho, 100% dos resultados de tolerância dimensional para o processo de alargamento permaneceram dentro da faixa especificada de 14,000mm a 14,018mm.

No processo de mandrilamento, a tolerância dimensional do furo é claramente influenciada pelos parâmetros de usinagem avanço, velocidade de corte e profundidade de corte. O parâmetro mais evidente de influência sobre a variação dimensional é o avanço, cujo aumento provoca uma diminuição no diâmetro do furo. O aumento da profundidade de corte também apresenta o mesmo comportamento, porém com menor expressividade.

A avaliação dimensional do processo de mandrilamento mostrou que o mesmo é bastante sensível com relação à variação dos parâmetros de usinagem, ocorrendo uma diferença de $59\mu\text{m}$ entre a menor dimensão encontrada (13,957mm) e a maior (14,017mm). Para efeito de processo produtivo, esta variação pode ser compensada com o sistema de regulagem presente na ferramenta, entretanto outros fatores como, por exemplo, desgaste da ferramenta de desbaste e acabamento, variação de dureza e microestrutura do material devem ser bem controlados.

Produtividade x qualidade

Em função de o processo de mandrilamento utilizar velocidades de cortes mais elevadas em comparação ao processo de alargamento e ambos possuírem o mesmo número de gumes cortantes, o tempo de

usinagem foi 50% menor do que o tempo de alargamento. Entretanto, considerando os limites estabelecidos de qualidade, apenas 7,4% dos ensaios de mandrilamento apresentaram resultados positivos em todos os requisitos avaliados. Para melhor desempenho do processo empregado é importante que as variáveis de entrada, tais como parâmetros de usinagem, desempenho da máquina-ferramenta, características do material estejam bem controladas e com tolerâncias estreitas.

O processo de alargamento, apesar de apresentar menor produtividade, alcançou maior índice de qualidade, totalizando 85,7% dos ensaios realizados com resultados dentro dos limites estabelecidos para todos os aspectos avaliados.

5.2 Sugestões para Trabalhos Futuros

Através dos estudos realizados neste trabalho foi possível observar os diferentes comportamentos e resultados para cada um dos processos estudados. Alguns aspectos não abordados nesta pesquisa podem, entretanto, ser explorados de maneira a dar continuidade ou para complementar o presente, como os que seguem.

- Estudo do processo de alargamento utilizando ferramentas de múltiplos gumes reguláveis em busca de maior produtividade, avaliando os desvios de forma, dimensional e de superfície dos furos obtidos.
- Verificação da influência do material das guias do alargador e de suas características geométricas sobre o comportamento da ferramenta durante o processo de usinagem e da qualidade do furo usinado.
- Avaliação de outras geometrias de insertos no mandrilamento bem como a utilização de menores profundidades de corte e avanços, de modo a buscar melhorar os resultados em termos de rugosidade, cilindridade e circularidade.

REFERÊNCIAS

- [1] ALMEIDA, D. O. **Investigação de desvios geométricos no alargamento de ferro fundido com ferramentas revestidas.** 2008. 117 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2008.
- [2] POLLI, M. L. **Estudo do Processo de Mandrilamento de Acabamento.** 1994. 111 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica), Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis: 1994.
- [3] MÜHLE, H. B. **Mandrilamento com cabeçotes de excentricidade regulável e sistema de balanceamento.** 2000. 115 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2000.
- [4] GODINHO, A. F. E. **Análise do mandrilamento de cilindros de blocos de motores em ferro fundido vermicular com diferentes concepções de ferramentas.** 2007. 129 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2007.
- [5] MARTINS, P. S. **Avaliação dos sistemas de fixação hidráulico e térmico de broca de metal duro em furação do cabeçote do motor fire.** 2008. 108 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Departamento de Engenharia Mecânica, Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2008.
- [6] LOHNER, K. Casos práticos de aplicação de ferramentas modernas de mandrilar. **Máquinas e Metais**, São Paulo, n.339, 1994. P.18-30.
- [7] SCHROETER, R. B. **Alargamento de precisão em alumínio aeronáutico com ferramentas de gume único regulável.** 1989. 113 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 1989.

- [8] BORILLE, A. V. **Análise do alargamento de ferro fundido cinzento GG25 com ferramentas de metal-duro**. 2005. 153 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2005.
- [9] SANTOS, R. G. dos. **Avaliação do processo de alargamento de guias de válvulas**. 2004. 107 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2004.
- [10] LUGSCHEIDER, E. *et al.* Investigations on hard coated reamers in different lubricant free cutting operations. **Surface and Coatings Technology**, p.172-177, 15 ago. 1996.
- [11] HANNA. **Conceitos e princípios dos alargadores de lâminas intercambiáveis**. Catálogo do fabricante, 2003.
- [12] ATABEY, F. ; LAZOGLU, I.; ALTINTAS, Y.. Mechanics of boring processes - Part II - multi-insert boring heads. **International Journal Of Machine Tools & Manufacture**, p. 477-484. 13 nov. 2002.
- [13] ABELE, E. *et al.* Influence of Drill Dynamics on Bore Quality. **Cirp Annals - Manufacturing Technology**, p. 83-86. 2005.
- [14] ABNT ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6409 Tolerâncias Geométricas- tolerâncias de formas, orientação, posição e batimento - generalidades, símbolos, definições e indicações de desenho**. Brasil, 1997. 19 p.
- [15] ABNT-ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6158 Sistema de tolerância e ajuste**. Brasil, p.1-79, 31 jul. 1995.
- [16] CASTILLO, W. J. G. **Furação profunda de ferro fundido cinzento GG25 com brocas de metal-duro com canais retos**. 2005. 134 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2005.

- [17] AGOSTINHO, O. L.; RODRIGUES, A. C. S.; LIRANI, J. **Tolerâncias, ajustes, desvios e análise de dimensões**. Ed 2004 São Paulo: Editora Edgard Blucher, 2004.
- [18] KÖNIG, W.; KLOCKE, F. **Tecnologia da Usinagem com Geometria Definida – parte 1**. Traduzido e adaptado por Rolf Bertrand Schoroeter e Walter Lindolfo Weingaertner do livro “Fertigungsverfahren – drehen, bohren, fräsen”. 2001.
- [19] FARIAS, A. de. **Análise de tensão residual e integridade superficial no processo de torneamento em material endurecido do aço ABNT 8620 cementado**. 2002. 191 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Departamento de Engenharia Mecatrônica e e de Sistemas Mecânicos, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2009.
- [20] STEMMER, G. E.. **Ferramentas de Corte II**. 4. ed. Florianópolis: UFSC, 2008. 314 p.
- [21] TOOLTECH. **Bladed Reamers**. Catálogo, 2007
- [22] CHIU, W. M.; CHANB, K. W. Design and testing of piezoelectric actuator-controlled boring bar. **Int. J. Production Economics**, p. 135-148. 1997.
- [23] YUSSEFIAN, N. Z.; IMANI, B. M.; MOUNAYRI, H. E. The prediction of cutting force for boring process. **International Journal Of Machine Tools & Manufacture**, p. 1387-1394. 23 maio 2008.
- [24] STEMMER, G. E.. **Ferramentas de corte I**. 7. ed. Florianópolis: UFSC, 2007. 249 p.
- [25] ROMI. **Sistema de Alta Precisão para Usinagem de Furos. Indústrias Romi S.A.** Catálogo do fabricante, 1996.
- [26] BEZERRA, A. A. *et al.* Effects of machining parameters when reaming aluminium-silicon (SAE 322) alloy. **Journal of Materials Processing Technology**, p. 185-198. 6 fev. 2001.

- [27] TANG, Y.; SASAHARA, H. Investigation of thermal behavior on cylinder liner. **International Journal of Machine Tools & Manufacture**, p. 2162-2171. 29 abr. 2007.
- [28] EBRAHIMI, A.; MOSHKARSAR, M. M. Study of machinability in boring operation of microalloyed. **Materials Science And Engineering A**, p. 314-323. 16 jan. 2007.
- [29] KRESS, D. **El escariado con altas velocidades**. Stuttgart, 1974. Tese de Doutorado - Universidade de Stuttgart.
- [30] MEI, C.. Active regenerative chatter suppression during boring. **Robotics and Computer-integrated Manufacturing**, n. 21, p.153-158, 14 jul. 2004.
- [31] TEWANI, S.; ROUCH, K. E.; WALCOTT, B. L. A study of cutting process stability of a boring bar with active dynamic absorber. **International Journal of Machine Tools & Manufacture**, p. 91-108. 15 nov. 1993.
- [32] MORADI, H.; NEJAD, F. B.; MOVAHHEDY, M. R.. Tuneable vibration absorber design to suppress vibrations: An application in boring manufacturing process. **Journal of Sound and Vibration**, p. 93-108. 16 maio 2008.
- [33] CHIAVERINI, V. **Aços e Ferros Fundidos**. 7. ed. Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais – ABM, 2002.
- [34] BAGETTI, J. H. **Análise da usinabilidade, deformação e temperatura no fresamento dos ferros fundidos vermicular e cinzento**. 2009. 136 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal De Santa Catarina, Florianópolis, 2009.
- [35] CASTROL. **Data sheet fluido de corte SYNTILO 916 castrol**. Catálogo do fabricante, 2004.
- [36] FERRARESI, D. **Fundamentos da usinagem dos metais**. São Paulo: Edgard Blücher, 1977. 751p

- [37] GOMES, P. F. **Curso de Estatística Experimental**. 12ª edição. Piracicaba: ESALQ, 1987.
- [38] DILLEY, D. N. *et al.* An analytical study of the effect of process damping on reamer vibrations. **Journal of Sound and Vibration**, p. 997-1015. 5 jan. 2004.
- [39] ECKHARDT, M. **Utilização de alargadores de gume único regulável para a obtenção de furos de precisão**. 1993. 128f. Dissertação (Mestrado em Ciências em Engenharia Mecânica) Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 1993.
- [40] NETO, E. R. **Torneamento Interno de Cilindros Automotivos de Ferro Fundido Cinzento Centrifugado**. 2009. 131 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Departamento de Engenharia de Fabricação, Unicamp, Campinas, 2009.