

DÉBORAH OLIVEIRA ALMEIDA

**INVESTIGAÇÃO DE DESVIOS GEOMÉTRICOS NO
ALARGAMENTO DE FERRO FUNDIDO COM FERRAMENTAS
REVESTIDAS**



UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA
FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA

2008

DÉBORAH OLIVEIRA ALMEIDA

**INVESTIGAÇÃO DE DESVIOS GEOMÉTRICOS NO
ALARGAMENTO DE FERRO FUNDIDO COM FERRAMENTAS
REVESTIDAS**

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

Área de Concentração: Materiais e Processos de Fabricação.

Orientador: Prof. Dr. Álisson Rocha Machado

Uberlândia - MG

2008

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)

A447i Almeida, Déborah Oliveira, 1982-
Investigação de desvios geométricos no alargamento de ferro fundido
com ferramentas revestidas / Déborah Oliveira Almeida. - 2008.
100 f. : il.

Orientador: Álisson Rocha Machado.

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

1. Materiais - Teses. 2. Processos de fabricação - Teses. 3. Ferramentas - Teses. I. Machado, Álisson Rocha. II. Universidade Federal de Uberlândia. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica. IV. Título.

CDU: 620.1

*“Não basta ensinar ao homem uma especialidade,
porque se tornará assim uma máquina utilizável,
mas não uma personalidade.
É necessário que adquira um sentimento,
um senso prático daquilo que vale a pena ser empreendido,
daquilo que é belo e do que é moralmente correto.”*

Albert Einstein

DEDICATÓRIA

*Para minha querida família,
pelo estímulo,
carinho e compreensão.
Amo vocês...*

AGRADECIMENTOS

Ao professor Álisson Rocha Machado, pela orientação, pelo suporte e, principalmente, pela paciência, fundamentais à realização deste trabalho de mestrado.

Aos colegas membros do LEPU (Laboratório de Ensino e Pesquisa em Usinagem), em especial ao professor Éder Silva Costa, que tanto me auxiliou na realização dos experimentos e nas medições, aos alunos de iniciação científica que me ajudaram com os testes, e ao técnico Reginaldo Souza. Ao professor Helder B. Lacerda, pelo auxílio com as medições no circularímetro. A todos os meus colegas e professores da Pós-Graduação por me acompanharem durante esses dois anos de estudos e experimentos.

Às empresas que forneceram o material para a realização do trabalho: Teksid do Brasil pelas barras de ferro fundido cinzento e Fundição Tupy pelas barras de ferro fundido vermicular.

À empresa OSG Tungaloy Sulamericana de Ferramentas Ltda., nas pessoas do Eng^o Coiti Fukushima e do Sr. Hélio Kamigashima, por fornecerem os alargadores e brocas para a realização dos testes.

Ao Programa de Pós Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Uberlândia, pela oportunidade de realizar este curso.

À Capes, pelo apoio financeiro, através da concessão da bolsa de estudo.

Ao meu namorado Pedro Leonardo Rocha Ferreira, pelo incentivo constante durante a maior parte do desenvolvimento deste trabalho.

À minha família maravilhosa, sempre presente em todos os momentos de minha vida, sejam eles de luta, de tristeza ou de felicidade: minha mãe Déa Dilma Oliveira Almeida, minha irmã Renata Oliveira Almeida e meu irmão Tiago Oliveira Almeida. Em especial ao meu pai, José Ricardo de Almeida, presente em espírito, e, com certeza, orgulhoso por mais esta vitória.

ALMEIDA, D. O. **Investigação de Desvios Geométricos no Alargamento de Ferro Fundido com Ferramentas Revestidas**. 2008. 103p. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia.

RESUMO

Durante a produção de um bloco de motor a execução de furos é a operação de usinagem mais comum, e exige operações posteriores a fim de melhorar a qualidade superficial, a precisão de forma e dimensional. Isso é conseguido empregando-se, entre outras, a operação de alargamento. Este trabalho utilizou um planejamento de experimentos estatístico para investigar a influência da variação na geometria do alargador (guia cilíndrica), dos parâmetros de corte (sobremetal, velocidade de corte e avanço), e de revestimentos da ferramenta (TiAlN, Alcrona® e Helica®) na operação de alargamento cilíndrico de ferro fundido cinzento (GH 190) e vermicular (CGI 450) sobre os desvios geométricos (erros de circularidade e cilindridade e rugosidade da superfície) de furos produzidos em corpos de provas. Os resultados mostraram que o melhor revestimento para alargar o ferro fundido cinzento foi a Helica® e o melhor para usinar o ferro fundido vermicular foi o Alcrona®. Também foi verificado que o sobremetal maior (0,25mm), guias cilíndricas mais finas (0,10mm), velocidades de corte menores (40m/min) e avanços maiores (0,5mm/volta) produzem furos alargados com melhor qualidade, tanto para a usinagem do ferro fundido cinzento como do ferro fundido vermicular.

Palavras-chave: *alargamento, desvios geométricos, ferramentas revestidas, ferro fundido cinzento, ferro fundido vermicular.*

ALMEIDA, D. O. **Investigation of Geometric Deviation in Reaming of Cast Iron with Coated Tools**. 2008. 103 p., M.Sc. Dissertation, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, MG.

ABSTRACT

During the manufacturing of an internal combustion engine block, the drilling is the most common machining operation, and the holes produced require further operations in order to improve the form quality and the surface finish. Reaming is such operation, frequently used after drilling. The present work uses a Statistical Experimental Design to investigate the influence of the reamer geometry (margin width), the cutting parameters (cutting speed, feed rate and depth of cut) and the tool coatings (TiAlN, Alcrona® e Helica®) on the hole qualities (roundness, cylindricity and surface roughness) during reaming of grey (GH 190) and compacted graphite Iron (CGI 450). The results showed that Helica® was the best tool coating to machine the grey cast iron and Alcrona® was the best to machine compacted graphite iron. It was also found that the bigger depth of cut (0.25mm), the thinner margin width (0.10mm), the lower cutting speed (40m/min) and the higher feed rate (0,50mm/rev) produced holes with better quality in terms of form deviation and surface roughness.

Keywords: *reaming, form deviation, coated reamers, grey cast iron, compacted graphite iron.*

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1. Alargador de desbaste	11
Figura 2.2. Alargador de acabamento	12
Figura 2.3. Alargadores de canal reto, hélice à esquerda e hélice à direita	13
Figura 2.4. Alargadores ajustáveis	14
Figura 2.5. Terminologia dos alargadores segundo SKF	15
Figura 2.6. Principais ângulos de um alargador	16
Figura 2.7. Gráficos de comparação da vida útil de ferramentas revestidas com TiAlN e Alcrona®	18
Figura 2.8. Gráficos de comparação da vida útil de ferramentas revestidas com TiAlN e Helica®	20
Figura 2.9. Desvios geométricos e dimensionais na furação	22
Figura 2.10. Erro de Circularidade	24
Figura 2.11. Erro de cilindricidade	25
Figura 2.12. Concavidade, Convexidade e Conicidade, respectivamente	25
Figura 2.13. Elementos que compõem a superfície	27
Figura 2.14. Definição da Rugosidade Ra	28
Figura 2.15. Definição da Rugosidade Rt	28
Figura 2.16. Definição da Rugosidade Rz a partir das rugosidades parciais Zi	29
Figura 3.1. Fluxograma para demonstração da metodologia utilizada	31
Figura 3.2. Micrografias do ferro fundido cinzento GH-190	33
Figura 3.3. Micrografias representativas do núcleo da amostra de ferro fundido vermicular (fonte: Viana, 2004)	33
Figura 3.4. Desenho esquemático das brocas utilizadas para fazer os pré-furos	35
Figura 3.5. Desenho esquemático dos alargadores utilizados durante os testes	37
Figura 3.6. Mandril hidráulico usado nos ensaios de alargamento	37
Figura 3.7. Desenho esquemático do corpo de prova de ferro fundido cinzento	38
Figura 3.8. Desenho esquemático do corpo de prova de ferro fundido vermicular	39
Figura 3.9. Foto do corpo de prova de ferro fundido cinzento	39

Figura 3.10. Foto do corpo de prova de ferro fundido vermicular	40
Figura 3.11. Circularímetro Talyrond 131 – Taylor Hobson	41
Figura 3.12. Exemplo de medição do erro de circularidade de um plano do furo usinado	42
Figura 3.13. Exemplo de medição do erro de cilindridade de um furo usinado	42
Figura 3.14. Planos de medição da circularidade	43
Figura 3.15. Rugosímetro Surtronic 3+ da Taylor Hobson	43
Figura 4.1. Erros de Circularidade e Cilindridade x Sobremetal – Primeira Etapa – Ferro Fundido Cinzento	48
Figura 4.2. Erros de Circularidade e Cilindridade x Guia Cilíndrica – Primeira Etapa – Ferro Fundido Cinzento	48
Figura 4.3. Erros de Circularidade e Cilindridade x Revestimento – Primeira Etapa – Ferro Fundido Cinzento	49
Figura 4.4. Erros de Circularidade e Cilindridade x Velocidade de Corte – Primeira Etapa – Ferro Fundido Cinzento	50
Figura 4.5. Erros de Circularidade e Cilindridade x Avanço – Primeira Etapa – Ferro Fundido Cinzento	50
Figura 4.6. Rugosidades x Sobremetal – Primeira Etapa – Ferro Fundido Cinzento	52
Figura 4.7. Rugosidades x Guia Cilíndrica – Primeira Etapa – Ferro Fundido Cinzento	53
Figura 4.8. Rugosidades x Revestimento – Primeira Etapa – Ferro Fundido Cinzento	54
Figura 4.9. Rugosidades x Velocidade de Corte – Primeira Etapa – Ferro Fundido Cinzento ..	55
Figura 4.10. Rugosidades x Avanço – Primeira Etapa – Ferro Fundido Cinzento	55
Figura 4.11. Erros de Circularidade e Cilindridade x Sobremetal – Segunda Etapa – Ferro Fundido Cinzento	58
Figura 4.12. Erros de Circularidade e Cilindridade x Guia Cilíndrica – Segunda Etapa – Ferro Fundido Cinzento	59
Figura 4.13. Erros de Circularidade e Cilindridade x Revestimento – Segunda Etapa – Ferro Fundido Cinzento	60
Figura 4.14. Erros de Circularidade e Cilindridade x Velocidade de Corte – Segunda Etapa – Ferro Fundido Cinzento	60
Figura 4.15. Erros de Circularidade e Cilindridade x Avanço – Segunda Etapa – Ferro Fundido Cinzento	61

Figura 4.16. Rugosidades x Sobremetal – Segunda Etapa – Ferro Fundido Cinzento	63
Figura 4.17. Rugosidades x Guia Cilíndrica – Segunda Etapa – Ferro Fundido Cinzento	63
Figura 4.18. Rugosidades x Revestimento – Segunda Etapa – Ferro Fundido Cinzento	64
Figura 4.19. Rugosidades x Velocidade de Corte – Segunda Etapa – Ferro Fundido Cinzento.	65
Figura 4.20. Rugosidades x Avanço – Segunda Etapa – Ferro Fundido Cinzento	65
Figura 4.21. Erros de Circularidade e Cilindricidade x Sobremetal – Primeira Etapa – Ferro Fundido Vermicular	70
Figura 4.22. Erros de Circularidade e Cilindricidade x Guia Cilíndrica – Primeira Etapa – Ferro Fundido Vermicular	71
Figura 4.23. Erros de Circularidade e Cilindricidade x Revestimento – Primeira Etapa – Ferro Fundido Vermicular	71
Figura 4.24. Erros de Circularidade e Cilindricidade x Velocidade de Corte – Primeira Etapa – Ferro Fundido Vermicular	72
Figura 4.25. Erros de Circularidade e Cilindricidade x Avanço – Primeira Etapa – Ferro Fundido Vermicular	73
Figura 4.26. Rugosidades x Sobremetal – Primeira Etapa – Ferro Fundido Vermicular	75
Figura 4.27. Rugosidades x Guia Cilíndrica – Primeira Etapa – Ferro Fundido Vermicular	75
Figura 4.28. Rugosidades x Revestimento – Primeira Etapa – Ferro Fundido Vermicular	76
Figura 4.29. Rugosidades x Velocidade de Corte – Primeira Etapa – Ferro Fundido Vermicular	77
Figura 4.30. Rugosidades x Avanço – Primeira Etapa – Ferro Fundido Vermicular	77
Figura 4.31. Erros de Circularidade e Cilindricidade x Sobremetal – Segunda Etapa – Ferro Fundido Vermicular	80
Figura 4.32. Erros de Circularidade e Cilindricidade x Guia Cilíndrica – Segunda Etapa – Ferro Fundido Vermicular	81
Figura 4.33. Erros de Circularidade e Cilindricidade x Revestimento – Segunda Etapa – Ferro Fundido Vermicular	

Figura 4.34. Erros de Circularidade e Cilindricidade x Velocidade de Corte – Segunda Etapa – Ferro Fundido Vermicular	82
Figura 4.35. Erros de Circularidade e Cilindricidade x Avanço – Segunda Etapa – Ferro Fundido Vermicular	83
Figura 4.36. Rugosidades x Sobremetal – Segunda Etapa – Ferro Fundido Vermicular	85
Figura 4.37. Rugosidades x Guia Cilíndrica – Segunda Etapa – Ferro Fundido Vermicular	85
Figura 4.38. Rugosidades x Revestimento – Segunda Etapa – Ferro Fundido Vermicular	86
Figura 4.39. Rugosidades x Velocidade de Corte – Segunda Etapa – Ferro Fundido Vermicular	87
Figura 4.40. Rugosidades x Avanço – Segunda Etapa – Ferro Fundido Vermicular	87

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1. Classificação dos ferros fundidos cinzentos segundo ASTM (Santos, 1999)	6
Tabela 2.2. Propriedades mecânicas médias do ferro fundido vermicular, cinzento e nodular (SinterCast, 2001)	7
Tabela 2.3. Propriedade do revestimento Alcrona® (Balzers, 2006)	17
Tabela 2.4. Propriedade do revestimento Helica® (Balzers, 2006)	19
Tabela 3.1. Características do ferro fundido cinzento GH 190 (fonte: Santos, 1999)	32
Tabela 3.2. Características do ferro fundido vermicular (CGI) (fonte: Viana, 2004)	32
Tabela 3.3. Planejamento fatorial fracionário da primeira etapa	34
Tabela 3.4. Planejamento fatorial fracionário da segunda etapa – Ferro Fundido Cinzento	34
Tabela 3.5. Planejamento fatorial fracionário da segunda etapa – Ferro Fundido Vermicular..	34
Tabela 3.6. Dimensionamento das ferramentas fornecidas pela OSG Tungaloy Sulamericana de Ferramentas Ltda	36
Tabela 4.1. Parâmetros de Corte – Ferro Fundido Cinzento	45
Tabela 4.2. Resultados do Erro de Circularidade – Primeira Etapa – Ferro Fundido Cinzento...	45
Tabela 4.3. Resultados do Erro de Cilindricidade – Primeira Etapa – Ferro Fundido Cinzento..	46
Tabela 4.4. ANOVA – Erro de Circularidade – Primeira Etapa – Ferro Fundido Cinzento.....	46
Tabela 4.5. ANOVA – Erro de Cilindricidade – Primeira Etapa – Ferro Fundido Cinzento.....	46
Tabela 4.6. Resultados das Rugosidades – Primeira Etapa – Ferro Fundido Cinzento.....	51
Tabela 4.7. ANOVA – Rugosidade Ra – Primeira Etapa – Ferro Fundido Cinzento	51
Tabela 4.8. ANOVA – Rugosidade Rz – Primeira Etapa – Ferro Fundido Cinzento	51
Tabela 4.9. ANOVA – Rugosidade Rt – Primeira Etapa – Ferro Fundido Cinzento	52
Tabela 4.10. Resultados do Erro de Circularidade – Segunda Etapa – Ferro Fundido Cinzento	56
Tabela 4.11. Resultados do Erro de Cilindricidade – Segunda Etapa – Ferro Fundido Cinzento	57
Tabela 4.12. ANOVA – Erro de Circularidade – Segunda Etapa – Ferro Fundido Cinzento.....	57
Tabela 4.13. ANOVA – Erro de Cilindricidade – Segunda Etapa – Ferro Fundido Cinzento.....	57

Tabela 4.14. Médias das Rugosidades Ra, Rt e Rz – Segunda Etapa – Ferro Fundido Cinzento	61
Tabela 4.15. ANOVA – Rugosidade Ra – Segunda Etapa – Ferro Fundido Cinzento.....	62
Tabela 4.16. ANOVA – Rugosidade Rz – Segunda Etapa – Ferro Fundido Cinzento	62
Tabela 4.17. ANOVA – Rugosidade Rt – Segunda Etapa – Ferro Fundido Cinzento	62
Tabela 4.18. Propriedades mecânicas médias do ferro fundido vermicular, cinzento e nodular (SinterCast, 2001)	66
Tabela 4.19. Parâmetros de corte – Ferro Fundido Vermicular.....	67
Tabela 4.20. Resultados dos Erros de Circularidade – Primeira Etapa – Ferro Fundido Vermicular	68
Tabela 4.21. Resultados do Erro de Cilindricidade – Primeira Etapa – Ferro Fundido Vermicular	68
Tabela 4.22. ANOVA – Erro de Circularidade – Primeira Etapa – Ferro Fundido Vermicular.....	69
Tabela 4.23. ANOVA – Erro de Cilindricidade – Primeira Etapa – Ferro Fundido Vermicular....	69
Tabela 4.24. Resultados das Rugosidades Ra e Rz – Primeira Etapa – Ferro Fundido Vermicular	73
Tabela 4.25. ANOVA – Rugosidade Ra – Primeira Etapa – Ferro Fundido Vermicular	74
Tabela 4.26. ANOVA – Rugosidade Rz – Primeira Etapa – Ferro Fundido Vermicular	74
Tabela 4.27. Resultados dos Erros de Circularidade – Segunda Etapa – Ferro Fundido Vermicular	78
Tabela 4.28. Resultados dos Erros de Cilindricidade – Segunda Etapa – Ferro Fundido Vermicular	79
Tabela 4.29. ANOVA – Erro de Circularidade – Segunda Etapa – Ferro Fundido Vermicular.....	79
Tabela 4.30. ANOVA – Erro de Cilindricidade – Segunda Etapa – Ferro Fundido Vermicular....	80
Tabela 4.31. Médias das Rugosidades Ra e Rz – Segunda Etapa – Ferro Fundido Vermicular...	83
Tabela 4.32. ANOVA – Rugosidade Ra – Segunda Etapa – Ferro Fundido Vermicular.....	84
Tabela 4.33. ANOVA – Rugosidade Rz – Segunda Etapa – Ferro Fundido Vermicular.....	84
Tabela 4.34. Efeito da mudança de níveis das variáveis nos resultados	88
Tabela 4.35. Comparação Geral entre os Dois Materiais Testados	90

LISTA DE SÍMBOLOS

ϕ - diâmetro [mm]

α_0 – ângulo de folga [°]

γ_0 – ângulo de saída [°]

a_e – penetração de trabalho [mm]

a_p – profundidade de corte [mm]

b_f – largura da guia cilíndrica [mm]

D – diâmetro externo [mm]

f – avanço [mm/rot]

HRc – Dureza Rockwell C

HV – Dureza Vickers

l_e – comprimento de amostragem [mm]

l_m – comprimento total de avaliação [mm]

l_t – distância total percorrida pelo apalpador do rugosímetro [mm]

R_a – rugosidade média aritmética [μm]

R_t – rugosidade total [μm]

R_z – rugosidade média parcial [μm]

T_{zc} – Erro de Conicidade [mm]

T_{zn} – Erro de Concavidade [mm]

T_{zo} – Erro de Convexidade [mm]

$V_{bm\acute{a}x}$ – Desgaste de flanco máximo [mm]

V_c – Velocidade de Corte [m/min]

SUMÁRIO

CAPÍTULO I – INTRODUÇÃO	1
CAPÍTULO II – REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	4
2.1. FERROS FUNDIDOS	4
2.1.1. Ferro Fundido Cinzento	5
2.1.2. Ferro Fundido Vermicular	6
2.2. ALARGAMENTO	8
2.2.1. Parâmetros de Usinagem no Alargamento	8
2.2.2. Alargadores	10
2.2.3. Geometria dos Alargadores	14
2.3. REVESTIMENTOS DE FERRAMENTAS	17
2.4. QUALIDADE DE SUPERFÍCIES USINADAS	21
2.4.1. Erro de Circularidade	24
2.4.2. Erro de Cilindricidade	24
2.4.3. Rugosidade	26
2.4.3.1. <i>Rugosidade média Ra</i>	27
2.4.3.2. <i>Rugosidade total Rt</i>	28
2.4.3.3. <i>Rugosidade média Rz</i>	29
2.4.4. Influência da Geometria dos Alargadores	29
CAPÍTULO III – METODOLOGIA	31
3.1. MATERIAL UTILIZADO	32
3.2. PLANEJAMENTO EXPERIMENTAL	33
3.3. ENSAIOS DE USINAGEM	35
3.3.1. Corpos de Prova	38
3.4. ANÁLISE DA QUALIDADE DOS FUROS	40

CAPÍTULO IV – RESULTADOS E DISCUSSÃO	44
4.1. FERRO FUNDIDO CINZENTO	44
4.1.1. Primeira Etapa – Comparação dos revestimentos TiAlN x Alcrona®	44
4.1.1.1. Erros de forma – Circularidade e Cilindricidade	44
4.1.1.2. Parâmetros de Rugosidade Ra, Rz e Rt	50
4.1.2. Segunda Etapa – Comparação dos revestimentos TiAlN x Helica®	55
4.1.2.1. Erros de forma - Circularidade e Cilindricidade	56
4.1.2.2. Parâmetros de Rugosidade Ra, Rz e Rt	61
4.2. FERRO FUNDIDO VERMICULAR	66
4.2.1. Primeira Etapa – Comparação dos revestimentos TiAlN x Alcrona®	66
4.2.1.1. Erros de forma – Circularidade e Cilindricidade.....	67
4.2.1.2. Parâmetros de Rugosidade Ra e Rz	73
4.2.2. Segunda Etapa - Comparação dos revestimentos Alcrona® x Helica®	77
4.2.2.1. Erros de forma – Circularidade e Cilindricidade	78
4.2.2.2. Parâmetros de Rugosidade Ra e Rz	83
4.3. QUADRO RESUMO DOS RESULTADOS E COMPARAÇÕES	88
CAPÍTULO V – CONCLUSÃO E SUGESTÕES PARA FUTUROS TRABALHOS	91
5.1. CONCLUSÕES	91
5.2. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	93
CAPÍTULO VI – REFERÊNCIAS	94

CAPÍTULO I

INTRODUÇÃO

A produção de um bloco de motor é uma seqüência de várias operações de usinagem até chegar totalmente pronto ao final do processo. Dentre essas operações a execução de furos é a mais comum, e exige operações posteriores a fim de melhorar a qualidade superficial, a precisão de forma e dimensional. Isso é conseguido empregando-se, entre outras, a operação de alargamento.

O alargamento, segundo o Metals Handbook (1989), é um processo de usinagem onde uma ferramenta rotativa com geometria especial, faz um leve corte nos furos cilíndricos ou cônicos, a fim de reduzir a rugosidade superficial e melhorar acabamento, garantindo uma melhor qualidade nos mesmos. Essa operação também pode ser definida, segundo a norma DIN 8589, como um tipo de furação que utiliza uma ferramenta de alargar (alargadores) para produzir pequenas espessuras de cavacos e criar superfícies com alta qualidade dimensional e de forma (Da Silva, 2001).

Sabe-se que existem na literatura poucos trabalhos técnico-científicos sobre alargamento, embora várias recomendações práticas sejam oferecidas pelos fabricantes de ferramentas, as quais são às vezes conflitantes entre os concorrentes ou se confrontadas com resultados de testes práticos (Da Silva, 2001). Além disso, os trabalhos encontrados na literatura, incluindo catálogos de fabricantes e artigos científicos, ainda não respondem a todas as dúvidas e problemas encontrados durante a operação de alargamento que na maioria das vezes implicam em prejuízos ou redução de lucro para empresas.

Dentre os componentes mecânicos que sofrem operações de alargamento, se destacam os blocos de motores de combustão, que normalmente são feitos de ferro fundido cinzento, embora hoje exista no mercado a utilização de ferros fundidos vermiculares e até mesmo os blocos de motores feitos de ligas de alumínio.

A produção de ferros fundidos cresceu muito nos últimos anos, e representa boa parte do mercado dos materiais utilizados na indústria metal-mecânica e, por isso, a busca contínua pelas melhorias de propriedades tem levado várias indústrias siderúrgicas e centros de pesquisas ao aprimoramento dos materiais a se manterem competitivas no mercado. Um maior controle nos teores de elementos tais como o silício, magnésio, cromo, molibdênio e cobre, e também a aplicação de tratamentos térmicos adequados tem contribuído muito para a melhoria das propriedades mecânicas destes materiais como, por exemplo, a rigidez e a ductilidade, tornando viável o emprego de ferros fundidos em certas aplicações que eram até então exclusivas dos aços médio teor de carbono (Da Silva, 2001). Uma dessas aplicações é a produção de blocos de motores de combustão interna. Porém, os teores destes elementos influenciam a usinabilidade dos ferros fundidos.

O ferro fundido vermicular, também conhecido como Compacted Graphite Iron (CGI), é o mais novo membro da família dos ferros fundidos. Ele vem ganhando aplicabilidade nos últimos anos principalmente em blocos de motores, substituindo o ferro fundido cinzento, já que permite o projeto de motores mais leves e com menor nível de emissões (Doré et al, 2007; Kopkka e Ellermeller, 2005). Ele foi inicialmente obtido por acaso durante a fabricação do ferro fundido nodular, devido a erros de composição química (Mocellin, 2002). Suas propriedades mecânicas diferenciadas foram reconhecidas em 1965, quando o CGI foi patenteado (ASM, 1996).

As ferramentas de corte são revestidas quando se deseja garantir características duras, resistentes ao desgaste e quimicamente inertes na superfície das mesmas (Machado e Da Silva, 2004). O TiAlN é um revestimento que tem sido muito utilizado na indústria para a usinagem de ferros fundidos, principalmente no processo de furação. Nos últimos anos, porém, novos revestimentos foram desenvolvidos e se mostraram bastante competitivos, já que podem elevar os limites de performance das ferramentas. Um desses revestimentos, desenvolvidos pela

empresa Balzers, é o Balinit Alcrona, o nitreto de cromo-alumínio (AlCrN). Este revestimento possui uma elevada resistência à oxidação e dureza a quente, ou seja, uma ótima resistência à abrasão. Outro revestimento desenvolvido pela mesma empresa é o Balinit Helica, especialmente utilizado para melhorar a vida de ferramentas de furação, já que proporciona a utilização de velocidades de corte mais elevadas, excelente evacuação dos cavacos e melhor qualidade dos furos. À base de AlCr, o Helica oferece performance superior à dos revestimentos com base em titânio, e pode ser aplicado em todas as classes de aço e ferro fundido, com refrigeração interna ou externa e ainda em trabalhos a seco ou com mínima quantidade de lubrificante (Balzers, 2006).

Este trabalho utilizou um planejamento de experimentos estatístico para investigar a influência da variação na geometria do alargador (guia cilíndrica), dos parâmetros de corte (sobremetal, velocidade de corte e avanço), e de alguns revestimentos da ferramenta (Alcrona, Helica e TiAlN) na operação de alargamento cilíndrico de ferro fundido cinzento e de ferro fundido vermicular sobre os desvios geométricos rugosidade da superfície, cilindridade e circularidade. Pretendeu-se com isso identificar as variáveis de corte mais significativas nesta operação e conseqüentemente oferecer diretrizes para o alargamento dos materiais pesquisados.

O trabalho está dividido em cinco capítulos o capítulo 2 apresenta uma fundamentação teórica, necessária para a interpretação dos resultados obtidos. O capítulo 3 descreve a metodologia e os procedimentos experimentais empregados durante a realização dos ensaios. No capítulo 4 são apresentados e discutidos os resultados obtidos na análise dos ensaios e o capítulo 5 apresenta as principais conclusões obtidas no trabalho.

CAPÍTULO II

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1. FERROS FUNDIDOS

Os ferros fundidos são ligas ferro-carbono com teor de carbono entre 1,8 e 4,5% e que possuem ponto de fusão relativamente baixo (aproximadamente 1200°C), requerendo, assim, menos energia para sua produção e possibilitando fácil moldação, uma vez que o metal fundido preencherá os vazios dos moldes com facilidade. Além disso, apresentam menor custo e permitem que posterior operação de usinagem seja a mínima possível, quando comparado aos aços (Van Vlack, 1984).

Até não muitos anos atrás os ferros fundidos eram empregados apenas em peças destinadas a suportar esforços de tração, flexão ou choque relativamente pequenos, pois pelos processos utilizados, os produtos obtidos eram bem frágeis. Graças à evolução dos processos de obtenção e dos meios de controle, atualmente as fundições conseguem obter peças com propriedades melhores, o que ampliou o campo de aplicação dos ferros fundidos e tornou o seu emprego viável em algumas aplicações antes exclusivas de aços com médio teor de carbono (Colpaert, 1977).

De acordo com Chiaverini (1988), os ferros fundidos são classificados em seis classes: ferro fundido cinzento; ferro fundido branco; ferro fundido mesclado; ferro fundido maleável; ferro fundido nodular e ferro fundido vermicular (ou de grafita compactada).

1. Ferro fundido cinzento: recebe essa denominação devido à coloração escura de sua fratura. É uma liga ternária composta por ferro, carbono e silício como elementos de liga fundamentais, e apresenta em sua microestrutura carbono livre na forma de veios, denominados grafita lamelar. Pode também apresentar carbonetos de ferro. O silício atua como elemento grafitizante (Pereira, 2005).
2. Ferro fundido branco: apresenta fratura com a coloração clara, com a maior parte do carbono combinado na forma de Fe_3C , devido às condições de fabricação e do menor teor de silício.
3. Ferro fundido mesclado: formado por uma mescla de proporções variadas de ferro fundido branco e ferro fundido cinzento, e possui uma fratura com uma coloração mista entre branca e escura.
4. Ferro fundido maleável: é obtido a partir do ferro fundido branco, através de um tratamento térmico especial denominado maleabilização, onde todo ou parte do carbono combinado na forma de carbonetos é transformado em nódulos de grafita.
5. Ferro fundido nodular (ADI): apresenta o carbono livre na forma de grafita esferoidal, obtida a partir de um tratamento térmico realizado quando a liga se encontra no estado líquido. Este tratamento confere ao material uma boa ductilidade, que é a principal propriedade deste material.
6. Ferro fundido vermicular (CGI): apresenta a grafita em forma de plaquetas (ou estrias), e possui propriedades intermediárias entre os ferros fundidos cinzento e nodular, com boa fundibilidade, com melhor resistência mecânica e baixa ductilidade.

Considerando que no presente trabalho o estudo se concentra no alargamento de ferro fundido cinzento e vermicular, estes serão abordados com maiores detalhes a seguir.

2.1.1. Ferro Fundido Cinzento

Dentre todos os tipos de ferro fundido apresentados, o ferro fundido cinzento é o mais utilizado devido às suas propriedades, tais como fácil fusão e moldagem, boa resistência mecânica, boa usinabilidade e boa resistência ao desgaste. As propriedades dos ferros fundidos

cinzentos são determinadas pela sua composição química, principalmente pelos teores de carbono grafítico e de silício, e pela forma em que se encontra a grafita. A presença da grafita é a responsável pela característica de ótima usinabilidade desses materiais (Santos, 1999).

A ASTM classifica os ferros fundidos cinzentos conforme sua composição química, de acordo com a tabela 2.1:

Tabela 2.1: Classificação dos ferros fundidos cinzentos segundo ASTM (*apud* Santos, 1999).

Classe	Composição Química (%)				
	C	Si	Mn	P	S
20	3,10 – 3,80	2,20 – 2,60	0,50 – 0,80	0,20 – 0,80	0,08 – 0,13
25	3,00 – 3,50	1,90 – 2,40	0,5 – 0,80	0,15 – 0,50	0,08 – 0,13
30	2,90 – 3,40	1,70 – 2,30	0,45 – 0,80	0,15 – 0,30	0,08 – 0,12
35	2,80 – 3,30	1,60 – 2,20	0,45 – 0,70	0,10 – 0,30	0,06 – 0,12
40	2,75 – 3,20	1,50 – 2,20	0,45 – 0,70	0,07 – 0,25	0,05 – 0,12
50	2,55 – 3,10	1,40 – 2,10	0,50 – 0,80	0,07 – 0,20	0,06 – 0,12
60	2,50 – 3,00	1,20 – 2,20	0,50 – 1,00	0,05 – 0,20	0,05 – 0,12

O ferro fundido cinzento é considerado um material de fácil usinagem segundo quase todos os critérios: as forças e potências de corte requeridas são relativamente baixas, a taxa de remoção de material é alta e a taxa de desgaste da ferramenta é considerada baixa. Os cavacos produzidos são descontínuos, portanto não apresentam problemas de controle. Apesar disso, a usinagem do ferro fundido cinzento produz partículas pequenas de grafite que são lançadas ao ar, o que exige o uso de equipamento de proteção individual (EPI) pelo operador da máquina. Este problema diminui quando a operação é realizada a baixas velocidades ou com aplicação de fluido de corte (Santos, 1999). A dureza não é um indicador muito eficiente da usinabilidade, ao contrário da microestrutura e dos elementos de liga presentes no material.

2.1.2. Ferro Fundido Vermicular

O ferro fundido vermicular recebe esta denominação devido à forma da sua grafita, embora tal fundamento seja contestado por alguns pesquisadores. Isto porque as grafitas não se apresentam de forma isolada quando observadas por microscopia eletrônica de varredura,

elas se apresentam na forma de lamelas pequenas com arredondamento nas extremidades, que se assemelham a vermes, daí a denominação vermicular (Santos et al., 1998).

Este material possui menor usinabilidade quando comparado ao ferro fundido cinzento, em relação à vida da ferramenta de usinagem, já que não apresenta o sulfeto de manganês em sua composição, presente no ferro fundido cinzento, e que garante a ação lubrificante local, facilitando assim a usinagem (De Andrade, 2005; Pereira, 2006). As ferramentas que mais se destacam para a usinagem deste material são as de metal duro e CBN, seguidas pelas de cerâmica, que ainda são pouco usadas pela falta de resultados positivos em pesquisas científicas (Doré et. Al, 2007).

É um material aplicável na construção de blocos e cabeçotes de motores mais leves e mais compactos, com a redução das espessuras de paredes de galerias. Em outras palavras, o CGI pode atender às necessidades de maiores pressões de combustão para a melhor queima do combustível com conseqüente redução do índice de emissão de resíduos nocivos ao meio-ambiente e do peso do motor (Tholl et al., 1996).

O ferro fundido vermicular possui boas características de resistência mecânica, ductilidade, tenacidade, resistência a choques térmicos, amortecimento e condutividade térmica. A união de características desejáveis, tanto do ferro fundido cinzento, quanto do nodular, confere ao vermicular uma significativa e crescente importância na aplicação industrial (ASM, 1996; Marquard et al., 1998; Mocellin, 2002). A Tabela 2.2 compara as características fundamentais dos ferros fundidos cinzento, vermicular e nodular.

Tabela 2.2: Propriedades mecânicas médias do ferro fundido vermicular, cinzento e nodular (SinterCast, 2001).

Propriedade	Cinzento	Vermicular	Nodular
Resistência à tração (MPa)	235	500	650
Módulo elasticidade (GPa)	110	140	165
Resistência fadiga (MPa)	100	205	265
Condutividade térmica (W/(mK))	48	35	28
Dureza (HB)	200	225	270
Tensão dev ruptura (MPa)	160	380	425

2.2. ALARGAMENTO

O alargamento é um tipo de furação que utiliza uma ferramenta que produz cavacos com pequenas dimensões e proporciona superfícies com alta qualidade superficial e precisão dimensional e de forma. O alargamento é uma tecnologia que utiliza ferramenta de corte com geometria definida (Weinert et. al, 1998 *apud* Santos, 2004).

A operação de alargamento pode ser realizada no mesmo tipo de máquinas-ferramenta usadas para a operação de furação. Empregando-se condições apropriadas e parâmetros de corte adequados é possível atingir tolerâncias apertadas e boa qualidade superficial. Uma característica do processo é que a ferramenta se “auto-posiciona” no furo, onde as forças passivas de facas opostas se subtraem mutuamente. Isso permite o alargamento de furos muito longos e de pequenos diâmetros. Apesar disso, as desvantagens desse processo são a impossibilidade de mudança da posição do furo prévio e a velocidade de corte que deve ser limitada (Schroeter, 1989).

2.2.1. Parâmetros de Usinagem no Alargamento

De acordo com o Metals Handbook (1989), a maioria dos furos alargados tem diâmetros entre 3,2 e 32 mm. Quando uma profundidade de corte maior que 0,5 mm no diâmetro deve ser removida de furos de grandes dimensões utiliza-se geralmente uma operação de mandrilamento, ou um alargamento especial, como o uso de alargadores canhão ou o alargamento de desbaste.

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

menor do que 0,13mm de metal, o brunimento ou outro processo de usinagem é preferível (Metals Handbook, 1989).

Segundo o Metals Handbook (1989), tolerâncias de 0,025 a 0,075 mm sobre o diâmetro são comuns durante o alargamento de produção, mas tolerâncias menores que 0,025mm podem ser obtidas se houver um controle mais preciso das dimensões do alargador, dos parâmetros de corte e de todas as outras variáveis do processo.

A ocorrência de vibrações durante o alargamento é prejudicial sobre a vida da ferramenta e sobre o acabamento do furo. Elas podem ser conseqüências de vários fatores, como o avanço excessivo ou insuficiente, a rigidez insuficiente da máquina ou da fixação da ferramenta e/ou da peça, o comprimento excessivo do alargador ou uma folga no cabeçote. (Bezerra, 1998).

A dureza dos aços ao carbono e aços de baixa liga tem um efeito maior que a composição desses materiais sobre a facilidade de serem alargados, de acordo com o Metals Handbook (1989). Metais moles como alumínio ou latão podem ser alargados a velocidades de cinco a dez vezes maiores que as velocidades usadas para aços recozidos.

Quanto às máquinas-ferramenta, todo tipo capaz de rotacionar uma ferramenta ou uma peça de trabalho pode ser utilizada para a operação de alargamento, sendo que peças relativamente grandes são rotacionadas num torno, e os avanços são proporcionados pelo cabeçote móvel do mesmo. Para operações de produção de furos com diâmetros menores que 32 mm, máquinas que rotacionam a ferramenta e mantêm a peça de trabalho estacionária, como as furadeiras de coluna, por exemplo, são mais práticas e econômicas (Metals Handbook, 1989).

O resultado da operação de alargamento vai depender de vários fatores, entre eles a aplicação manual ou mecânica do alargador, o tipo, a profundidade e a qualidade do furo após a operação de furação, tipo e rigidez da máquina-ferramenta, fixações da ferramenta e da peça, propriedades do material do alargador, propriedades do material da peça, condições de usinagem (velocidade, avanço, profundidade de corte), efeitos térmicos, entre outros (Metals Handbook, 1989).

2.2.2. Alargadores

Os alargadores são ferramentas multicortantes, possuem duas ou mais arestas cortantes, que podem ser retas (paralelas ao eixo da ferramenta) ou helicoidais. Estas arestas estão dispostas em um único conjunto e encontram-se em contato com a peça simultaneamente, e a usinagem é subdividida em duas operações básicas: corte pelas arestas principais e alisamento pelas arestas laterais, sendo que estas últimas influenciam mais fortemente no resultado final da operação de alargamento (Bezerra, 1998).

Segundo Kress (1974, *apud* Santos, 2004), os alargadores se diferem em mono-cortante e multicortante, sendo que o número das múltiplas arestas de corte é normalmente par e os dentes não são simétricos em algumas posições, de maneira a evitar vibrações. Ele ainda comenta que a precisão do furo alargado depende muito do alargador, sendo que a tolerância de construção recomendada do diâmetro do alargador deve ser aproximadamente 35% menor que a tolerância do furo desejado.

Os alargadores monocortantes executam furos com alta qualidade, e permitem utilizar maiores velocidades de corte (Schroeter, 1989). A utilização de alargadores multicortantes é interessante, pois, com um maior número de dentes podem-se utilizar maiores velocidades de avanço. Existe também a dificuldade em regular as ferramentas de aresta única de corte (monocortantes), além da manutenção dos componentes de fixação e regulação (Santos, 2004).

A usinagem é dividida no corte pelas arestas principais e alisamento nas arestas laterais ou régua de guias, que guiam a ferramenta se apoiando na superfície do furo. Os alargadores monocortantes separam as funções de corte e guia em elementos de trabalho diferentes: a guia ou sapata e a lâmina de corte. Desta forma, há a possibilidade de ajuste de diâmetro e troca do consumível (lâmina). As ferramentas multicortantes apresentam aresta de corte e guia no mesmo corpo e encontram-se simultaneamente em contato com a peça durante a usinagem (Schroeter 1989; Kress 1974; Weinert et al 1998).

De acordo com o Metals Handbook (1989) os alargadores geralmente possuem uma haste de aço-rápido ou de um aço-ferramenta de baixa liga e arestas de corte de metal duro. Como a carga imposta sobre a ferramenta durante o alargamento é menor que a carga na

furação, os alargadores requerem uma menor tenacidade que as brocas; ao contrário, os alargadores devem possuir uma dureza máxima para que o acabamento superficial e a vida da ferramenta sejam ótimos.

Apesar dessa definição, a maioria dos alargadores padrão e especiais é fabricada inteiramente de metal duro ou contêm insertos deste material, que apesar de ser mais caro que o aço-rápido, proporcionam uma vida dez vezes maior (quando se alarga aços com dureza aproximada de 20 HR_C). Quando a dureza do material for superior a 40 HR_C a aplicação de ferramentas de metal duro torna-se essencial (Metals Handbook, 1989).

Para se usar alargadores de metal duro exige-se máxima rigidez da máquina, do alargador e da peça. Recomenda-se que o comprimento não guiado e não sustentado do alargador seja de até seis vezes maior que o seu diâmetro, mais que isso o uso do metal duro se torna questionável (Da Silva, 2001).

Os alargadores podem ser classificados de várias formas. Uma delas é quanto ao tipo de operação, sendo:

- *Alargadores de desbaste*: têm como objetivo melhorar a tolerância do furo, quanto à sua forma e dimensões, ou permitir uma perpendicularidade do furo em relação à parede. Apresentam formas semelhantes às das brocas helicoidais e o número de arestas cortantes varia entre três e quatro. A figura 2.1 mostra um alargador de desbaste com três arestas.

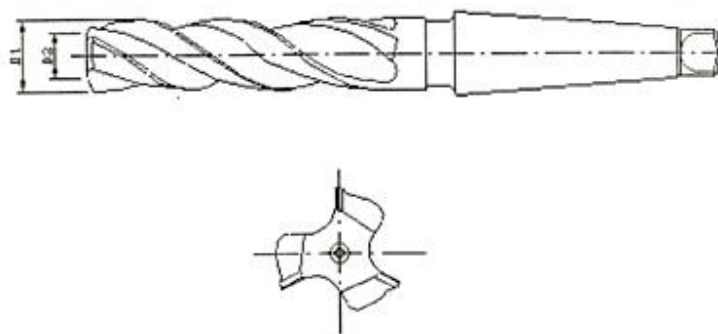


Figura 2.1: Alargador de desbaste (Fonte: Hurth-Infer, 1998)

• *Alargadores de acabamento*: são muito utilizados na produção em série, já que com uma ferramenta é possível acabar um grande número de furos. Na operação de alargamento de acabamento procura-se melhorar a precisão de forma e de medida do furo, além da qualidade superficial. Possuem um número maior de arestas cortantes, que varia de acordo com o diâmetro, o tipo do alargador e o material a ser usinado (Hurth – Infer, 1998). A figura 2.2 mostra alguns exemplos de alargadores de acabamento.

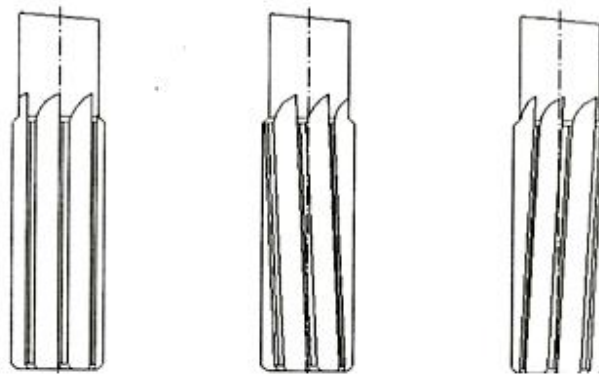


Figura 2.2: Alargador de acabamento (Fonte: Hurth-Infer, 1998)

Também podem ser classificados quanto ao tipo de canais (dentes), que podem ser retos ou helicoidais como mostrados na figura 2.3. Os alargadores com canais helicoidais podem ter hélice à esquerda ou à direita. Algumas aplicações destes tipos de alargadores são:

- Alargadores com canais retos: são usados para usinagem de furos passantes;
- Alargadores com hélice à esquerda: mais usados na usinagem de furos passantes com corte interrompido, com rasgos de chaveta ou canais de lubrificação, por exemplo.
- Alargadores com hélice à direita: usados na usinagem de furos cegos, onde se deseja “tirar o cavaco para fora” do furo. Este tipo de alargador facilita o corte e exige uma força menor que a ferramenta com hélice à esquerda (Da Silva, 2001).

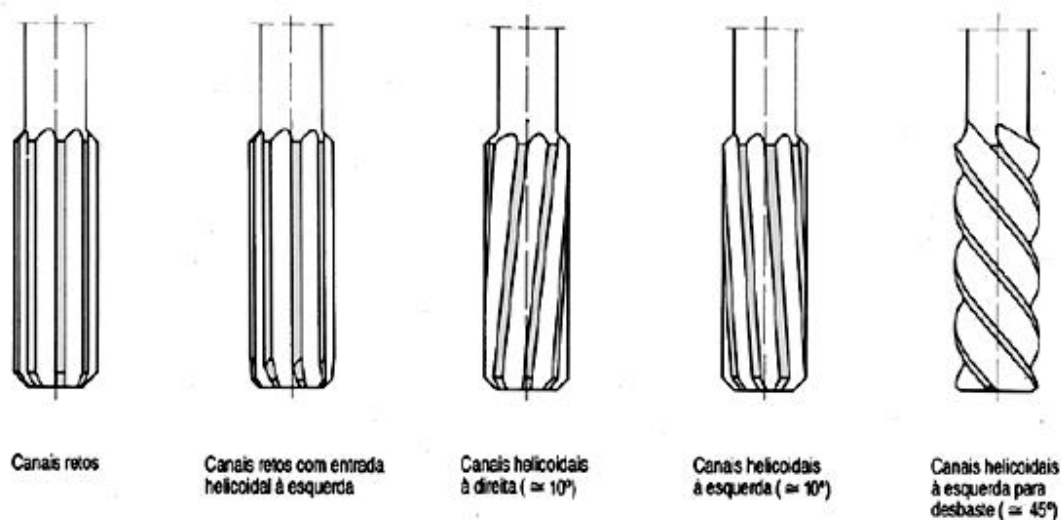


Figura 2.3: Alargadores de canal reto, hélice à esquerda e hélice à direita (Fonte: Bezerra, 1998)

Quanto à fixação, podem possuir haste cônica ou cilíndrica. Quanto ao uso, podem ser manuais ou mecânicos (usados em máquinas). Quanto à geometria do furo, podem ser cônicos ou cilíndricos. (Bezerra, 1998). Quanto à regulagem podem ser fixos ou ajustáveis, cujo diâmetro pode ser variado através de uma regulagem radial dos dentes, como pode ser visto na figura 2.4.

De acordo com o Metals Handbook (1989), o termo alargador regulável ou expansivo é geralmente usado para se referir somente a um número limitado de tipos, dos quais os dois mais comuns são os alargadores de lâminas inseridas e o ajustável com pino de expansão. Os alargadores de lâminas inseridas são fabricados com ou sem regulagem de medida. São portaferramentas nos quais os rasgos são fresados para receber lâminas planas, que permitem variar o diâmetro a ser alargado dentro de certa faixa de valores.

Os alargadores de lâminas inseridas são encontrados com canais retos ou helicoidais e são recomendados para aplicações nas quais o material da peça é influenciado pelas variações de temperatura ou da falta de rigidez das máquinas, o que dificulta manter a medida exata do furo. Os alargadores com pino de expansão utilizam um pino com certa conicidade para mover as lâminas e variar a dimensão do alargador. Estes alargadores são encontrados apenas com canais retos. Em muitas operações de produção em larga escala os alargadores de lâminas

inseridas e com pino de expansão são mais econômicos que os alargadores sólidos porque as lâminas podem ser reafiadas várias vezes antes da substituição, e desta forma, pequenos ajustes podem prolongar a vida do alargador entre afiações. Para operações de baixa escala de produção, maiores ajustes são necessários porque uma única ferramenta pode ser ajustada para usinar furos com diâmetros poucos diferentes, reduzindo assim o número de ferramentas. Além do ajuste de medida, os alargadores reguláveis possuem outras vantagens sobre os alargadores sólidos, já que o material das lâminas podem ser substituídos de acordo com a necessidade, usando o mesmo corpo, e é mais fácil a modificação do projeto da ferramenta e a reafiação, incluindo detalhes como o ângulo de inclinação, largura dos guias cilíndricos e folga radial em relação a um alargador sólido (Metals Handbook, 1989 *apud* Da Silva, 2001).

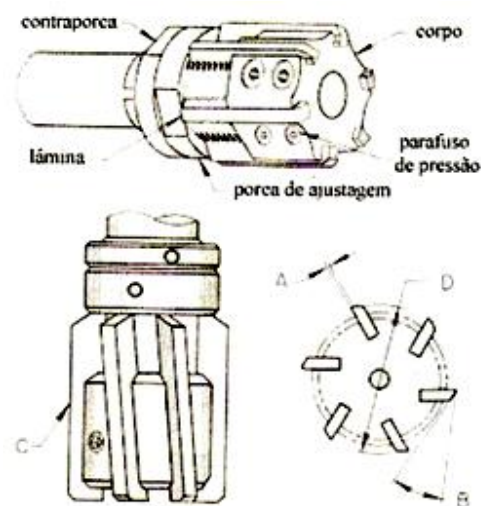


Figura 2.4: Alargadores ajustáveis (Metals Handbook, 1989)

2.2.3. Geometria dos Alargadores

Segundo o fabricante SKF (*apud* Bezerra, 1998), a terminologia usada para os alargadores é detalhada conforme mostra a figura 2.5.

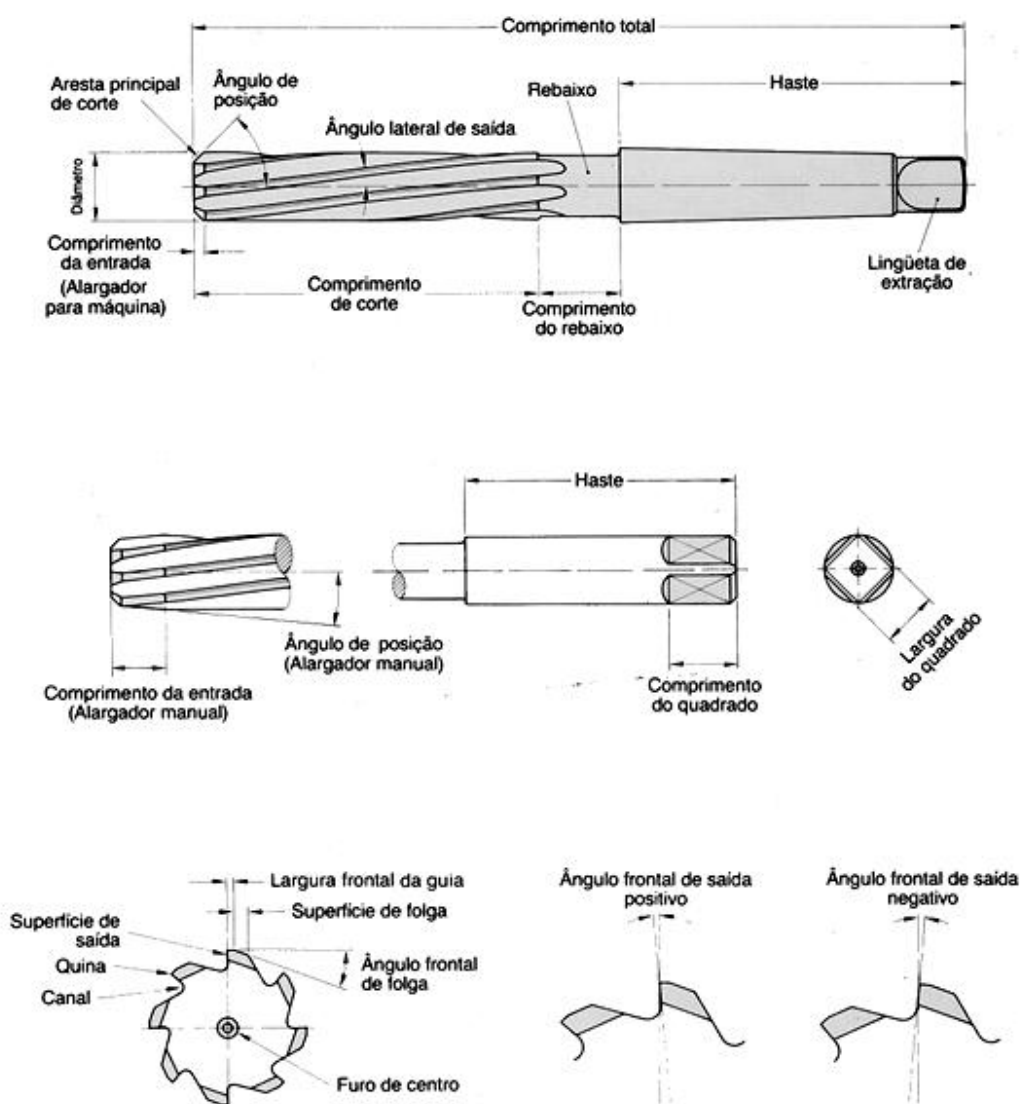


Figura 2.5: Terminologia dos alargadores segundo SKF (*apud* Bezerra, 1998)

A geometria de cada ferramenta é selecionada de acordo com as funções desejadas. Além das características geométricas dos alargadores tais como o tipo de haste, canal, sentido da hélice de um alargador é muito importante o estudo dos ângulos de saída e de folga, do guia cilíndrico e do número de lâminas, pois estes interferem principalmente nos valores dos desvios geométricos (Da Silva, 2001). Os principais ângulos de um alargador são mostrados na figura 2.6 a seguir.

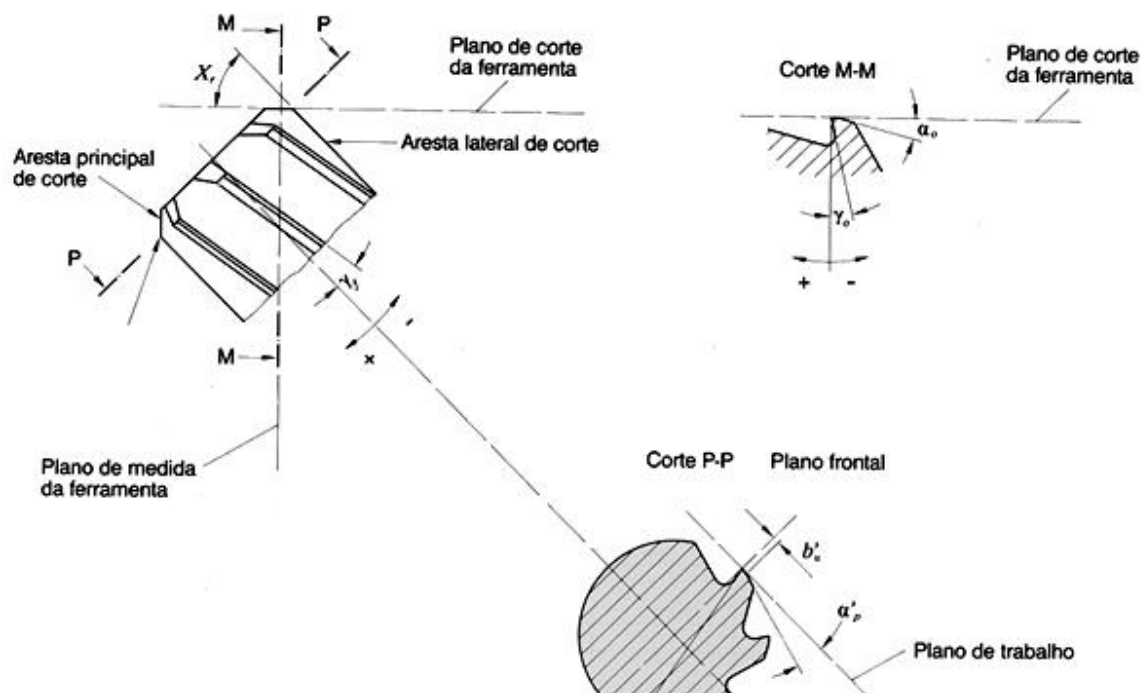


Figura 2.6: Principais ângulos de um alargador (SKF *apud* Bezerra, 1998)

O número de facas ou de arestas de corte, que geralmente varia de 4 a 20, depende do diâmetro e do tipo de alargador. Quanto mais lâminas possuir um alargador, melhor será acabamento da superfície e menores desvios geométricos ele produzirá. Porém, se um alargador tem várias lâminas ele não possuirá espaço suficiente para a saída do cavaco. Por outro lado, se um alargador possui poucas lâminas, poderá induzir vibrações, principalmente se for um alargador de canais retos. Para minimizar erros no processo irregular de corte das lâminas, geralmente fabricam-se alargadores multicortantes com distribuição não uniforme das lâminas, o que reduz as vibrações auto-excitadas. Uma distribuição uniforme das lâminas faz com que as mesmas cortem sempre no mesmo lugar usinado anteriormente (Metals Handbook, 1989 *apud* Da Silva, 2001).

2.3. REVESTIMENTOS DE FERRAMENTAS

Uma ferramenta é revestida quando se desejam garantir características duras, resistentes ao desgaste e quimicamente inertes na superfície, mantendo um núcleo relativamente tenaz. O revestimento das ferramentas de metal duro ganhou grande importância nas últimas décadas porque proporciona desempenho muito superior ao da ferramenta sem revestimento na usinagem de materiais, principalmente dos ferrosos (Machado e Da Silva, 2004).

O TiAlN (nitreto de titânio e alumínio) é um revestimento que tem sido muito utilizado na indústria para a usinagem de ferros fundidos, principalmente no processo de furação. Uma característica relevante dos filmes de TiAlN é quanto a sua dureza a quente durante a usinagem, pois segundo alguns pesquisadores ocorre uma reação de oxidação na superfície do revestimento, dando origem à alumina (Al_2O_3) mantendo a dureza do revestimento mesmo a altas temperaturas e, por conseguinte aumentando a resistência ao desgaste (PalDey e Deevi, 2003, *apud* Viana, 2004).

Nos últimos anos, porém, novos revestimentos foram desenvolvidos e se mostraram bastante competitivos, já que podem elevar os limites de desempenho das ferramentas. Um desses revestimentos, desenvolvidos pela empresa Balzers, é o Balinit Alcrona®, o nitreto de cromo-alumínio (AlCrN). Este revestimento possui uma elevada resistência à oxidação e dureza a quente, ou seja, uma ótima resistência à abrasão e baixo coeficiente de atrito na usinagem de aços. Algumas dessas características estão mostradas na tabela 2.3.

Tabela 2.3: Propriedade do revestimento Alcrona® (Balzers, 2006)

COMPOSIÇÃO QUÍMICA	MICRO-DUREZA	TEMPERATURA MÁXIMA DE SERVIÇO	COR
AlCrN	3200 HV	1100 °C	Azul acinzentado

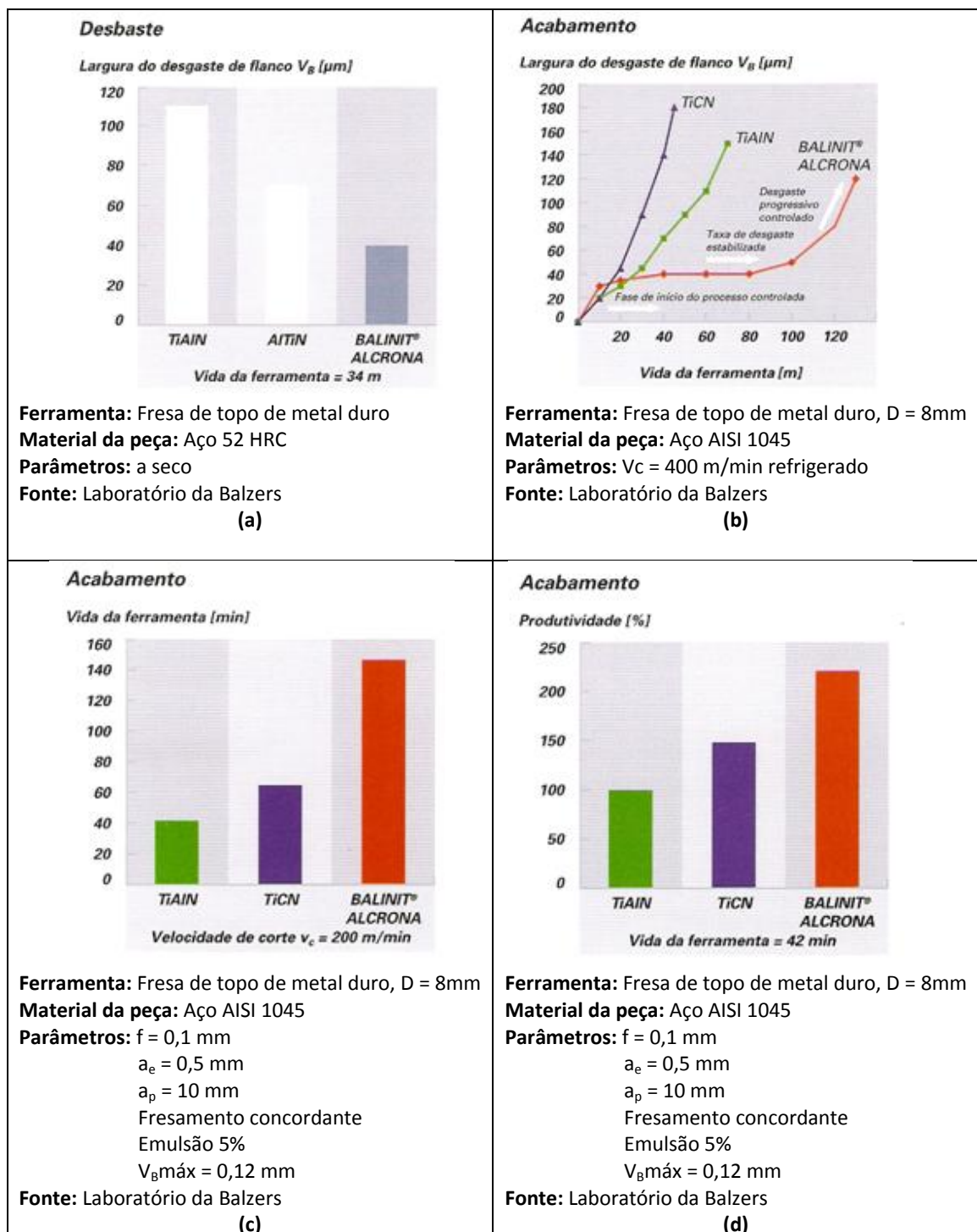


Figura 2.7: Gráficos de comparação da vida útil de ferramentas revestidas com TiAlN e Alcrona®

(Fonte: Balzers, 2006)

Pesquisas realizadas pela empresa Balzers (2006) durante o processo de torneamento de aços endurecidos mostraram um ganho de 60% de produtividade, ou seja, produziram 60% de peças a mais do que ferramentas revestidas com o TiAlN. Durante o fresamento, essas ferramentas também demonstraram que possuem uma vida muito maior, usando como comparação o desgaste de flanco da ferramenta. A figura 2.7 contém alguns gráficos que comparam a vida útil de ferramentas revestidas com TiAlN e Alcrona® durante o operações de fresamento de aços. Pode-se notar que tanto em operações de desbaste como em operações e acabamento, o Alcrona® obteve melhor desempenho. Também foi observado que a vida da ferramenta era maior usando-se fluidos de corte ou na usinagem a seco. Os parâmetros usados para a usinagem estão mostrados em cada gráfico.

Outro revestimento desenvolvido pela mesma empresa é o Balinit Helica®, especialmente utilizado para melhorar a vida de ferramentas de furação, já que proporciona a utilização de velocidades de corte mais elevadas, excelente evacuação dos cavacos e melhor qualidade dos furos (Balzers, 2006). Algumas propriedades desse revestimento estão demonstradas na tabela 2.4.

Tabela 2.4: Propriedade do revestimento Helica® (Balzers, 2006)

COMPOSIÇÃO QUÍMICA	MICRO-DUREZA	TEMPERATURA MÁXIMA DE SERVIÇO	COEFICIENTE DE ATRITO	COR
AlCr	3000 HV	1100 °C	0,25	Cobre

À base de AlCr, o Helica® oferece performance superior à dos revestimentos com base em titânio, e pode ser aplicado em todas as classes de aço e ferro fundido, com refrigeração interna ou externa e ainda em trabalhos a seco ou com mínima quantidade de lubrificante. Comparando-se uma broca revestida com TiAlN e outra com Helica usinando um aço AISI 1045, esta última, além de produzir mais furos, apresentou um desgaste bem menor que o da broca revestida com o TiAlN. A figura 2.8 contém gráficos de comparação da vida útil de brocas de metal duro revestidas com TiAlN e com Helica®, mostrando que o desempenho da Helica® é superior ao do TiAlN, tanto quando usinando aços como quando usinando ferros fundidos (Balzers, 2006).

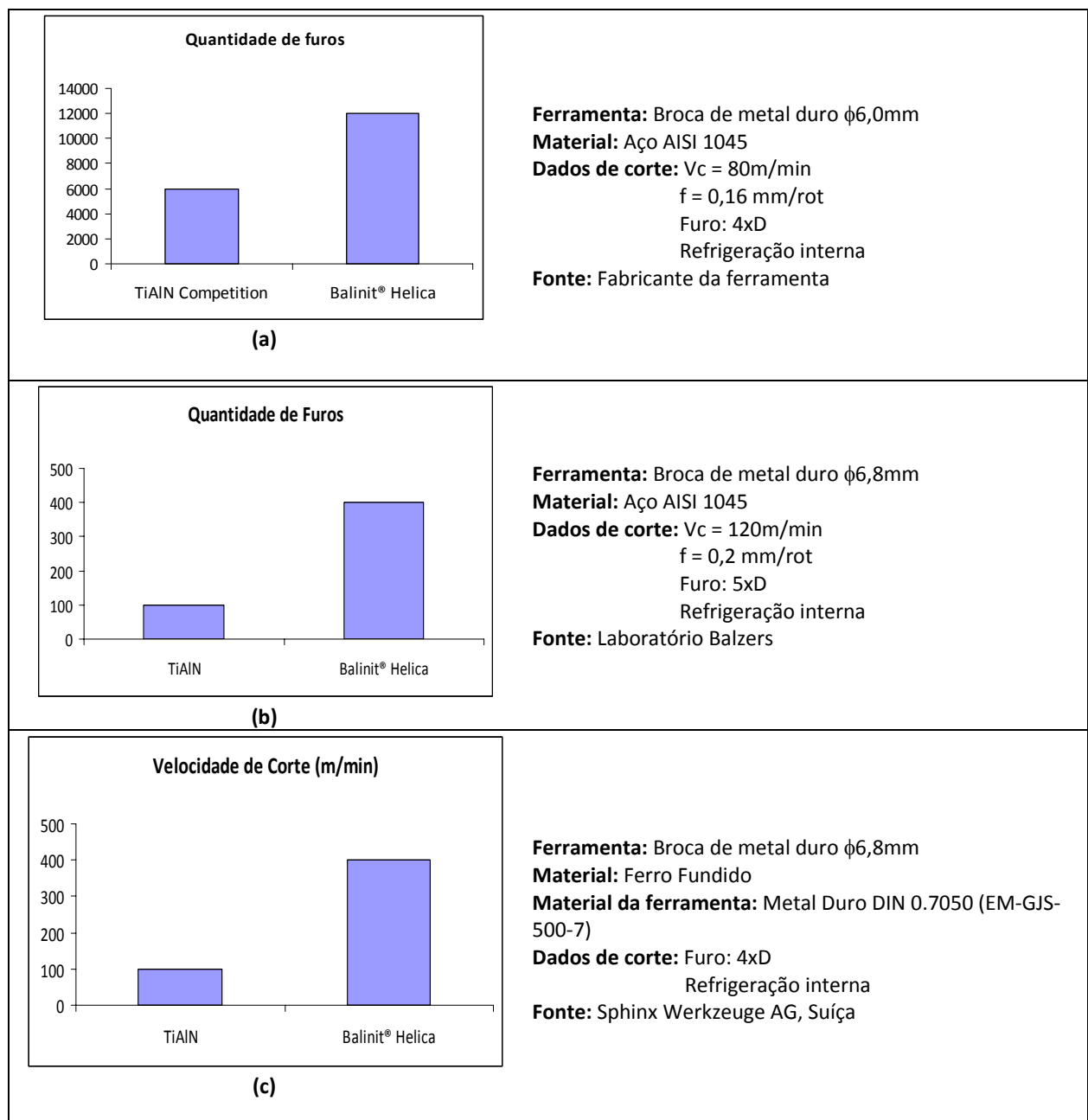


Figura 2.8: Gráficos de comparação da vida útil de ferramentas revestidas com TiAlN e Helica®
(Fonte: Balzers, 2006)

Este revestimento (Helica®) foi desenvolvido quase que exclusivamente para ser usado em ferramentas de furação, e tem alcançado resultados significativos nas propriedades que têm impacto na furação, de acordo com pesquisas desenvolvidas por fabricantes. Por serem

revestimentos relativamente novos (o Alcrona® foi lançado em 2005 e o Helica® em 2006), não foram encontrados trabalhos científicos sobre estes revestimentos na literatura pesquisada, além destas pesquisas feitas pelos fabricantes.

2.4. QUALIDADE DE SUPERFÍCIES USINADAS

Sempre que uma operação de usinagem é realizada, o objetivo principal é produzir componentes com o máximo de funcionalidade e intercambialidade a baixo custo e alta produção. Em outras palavras, isso significa que cada peça ou conjunto de um produto final seja feito de acordo com as especificações definidas quanto às dimensões, forma e acabamento da superfície. Entretanto, esse objetivo não é tão fácil de ser alcançado e vários problemas ocorrem porque muitas variáveis do processo produtivo são ainda pouco conhecidas ou exploradas. Dentre elas se destacam as características e usinabilidade do material da peça, seleção correta do material da ferramenta e os parâmetros de corte (Da Silva, 2001).

Para resolver os problemas de intercambialidade, principalmente os decorrentes das operações de furação e alargamento, torna-se necessário conhecer as particularidades e os parâmetros que estão relacionados com a qualidade das superfícies usinadas e, também, os conceitos e desenvolvimento dos sistemas de tolerâncias.

Em aplicações mecânicas onde é requerida elevada exatidão, as tolerâncias dimensionais nem sempre são suficientes para garantir os requisitos de funcionalidade das peças (Rosas, 1983 *apud* Da Silva, 2001). As medidas do diâmetro, por exemplo, não são suficientes para assegurar que um furo seja totalmente cilíndrico. Na maioria dos casos, as peças são compostas por elementos geométricos, ligados entre si por superfícies de formatos simples, tais como superfícies planas, cilíndricas ou cônicas, que têm formas definidas e são posicionadas entre si. Durante a fabricação, a forma e o posicionamento relativo desses elementos geométricos são desviados da situação ideal. Se estes desvios irão comprometer a funcionalidade da peça, tolerâncias deverão ser aplicadas aos mesmos. As tolerâncias desses desvios (tolerância de

forma, de orientação, de posição e de batimento) constituem as chamadas *tolerâncias geométricas* (Rosas, 1983 *apud* Da Silva, 2001).

Os desvios de forma são definidos como o grau de variação das superfícies reais com relação aos sólidos geométricos que os definem, e podem ser classificados em: retineidade, erro de circularidade, cilindridade, planicidade, etc. Alguns destes desvios também comentados no trabalho de Da Silva (2001) podem ser vistos na figura 2.9.

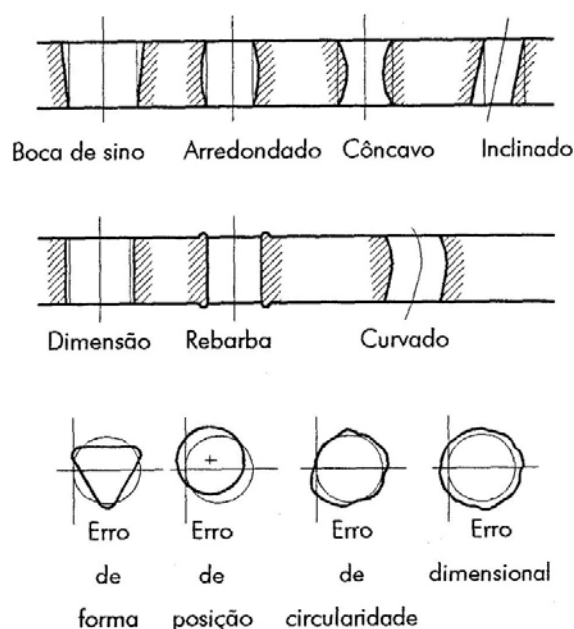


Figura 2.9: Desvios geométricos e dimensionais na furação (Tool and Manufacturing, 1983)

A produção de furos tem alguns desses desvios de forma, erro de circularidade e cilindridade, como os principais obstáculos quando se almeja alta precisão e alta qualidade (Bezerra, 1998). Segundo Da Silva, 2001, as causas dos desvios geométricos devem-se principalmente aos seguintes fatores:

- Defeitos da máquina operatriz: folgas, desgastes, desvios de forma e de posição dos componentes ou más condições de funcionamento e de instalação;

- Deformação elástica: durante a usinagem, ao serem submetidos a cargas, os órgãos da máquina, da ferramenta, dos porta-ferramentas, dos porta-peças ou da peça, geralmente alteram as posições relativas da peça e da ferramenta;
- Fixação incorreta da peça: se a peça não estiver bem fixa e de maneira correta, ela poderá sofrer deformação elástica ao ser retirada ou desprendida;
- Desgaste da ferramenta: produz variação dimensional na parte usinada, além do aumento da força de corte provocar deformações elásticas e plásticas na ferramenta e na peça;
- Temperatura: efeitos de dilatação nos órgãos da máquina, ferramenta e na peça são provocados por variação da temperatura, alterando as dimensões da peça;
- Efeitos metalúrgicos: alterações, como endurecimento da superfície durante a usinagem, provocam variação de tensões superficiais que refletem nas dimensões da peça;
- Tratamento térmico: tratamentos térmicos inadequados podem levar a diferentes formas de estrutura da peça, às quais poderão refletir indesejavelmente no processo de usinagem;
- Rebarbas: geralmente é formada na entrada e saída do furo. A formação ou não de rebarbas e sua altura dependem do material da peça, da ferramenta e dos parâmetros de corte (Rosas, 1983 *apud* Da Silva, 2001).

Os desvios de cilindridade podem acontecer durante a furação, também em decorrência do desvio da broca, devido a arestas não afiadas no mesmo comprimento da mesma, fazendo com que a linha evolvental desvie de uma reta (Bezerra, 1998).

Na fabricação de peças, não é possível produzir superfícies ideais, já que, ao observar num microscópio, as superfícies fabricadas apresentam ondulações e irregularidades, mesmo que a olho nu elas sejam completamente lisas. A rugosidade da superfície é um conjunto dessas irregularidades finas, resultantes da ação inerente do processo de corte. A altura ou profundidade isolada das irregularidades é medida em um pequeno comprimento de amostragem, denominado *cut-off*. A rugosidade média R_a é a média aritmética dos valores absolutos do perfil real ao perfil médio (König, 1981, *apud* Bezerra, 1998). O acabamento dos

furos alargados depende, dentre outros fatores, da dureza das peças de trabalho, das condições das arestas de corte, do avanço e da velocidade de corte (Metals Handbook, 1989).

2.4.1. Erro de Circularidade

O erro de circularidade é medido através da circunscrição do mesmo em um círculo básico onde a área interna formada pelas linhas do furo real e do círculo básico é igual à área externa formada pelas mesmas linhas. Seu valor é a máxima diferença entre o raio maior R e o raio menor r . (Bezerra, 1998). A figura 2.10 mostra essa diferença entre os raios.

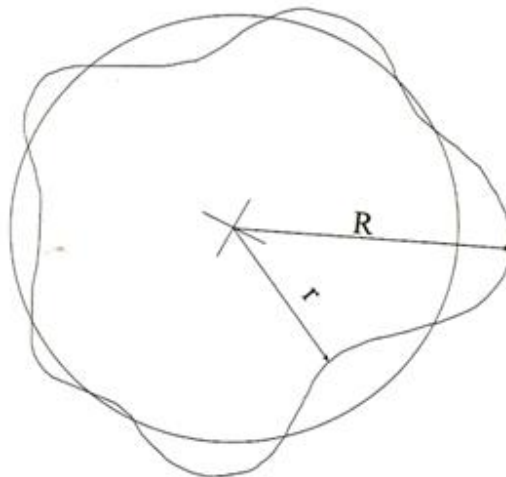


Figura 2.10: Erro de Circularidade (Fonte: Bezerra, 1998)

2.4.2. Erro de Cilindricidade

O erro de cilindridade é medido em um gráfico linear, mostrado de maneira simplificada na figura 2.11. Neste gráfico são traçadas duas retilidades a 180° uma da outra. O valor deste erro será a diferença entre a distância máxima D e a distância mínima d e a linha média entre elas. O erro de circularidade pode ser considerado um caso particular do desvio de cilindridade.

O desvio de cilindridade pode ser medido tanto na seção longitudinal (conicidade, convexidade e concavidade) como na seção transversal do cilindro (ovalização). A conicidade, a

convexidade e a concavidade são mostradas na figura 2.12, e podem ser calculadas usando-se as equações 2.1, 2.2 e 2.3.

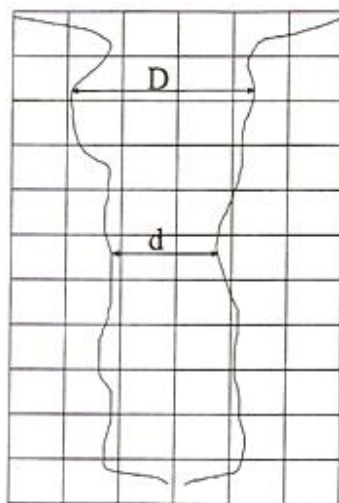


Figura 2.11: Erro de cilindridade (Fonte: Bezerra, 1998)

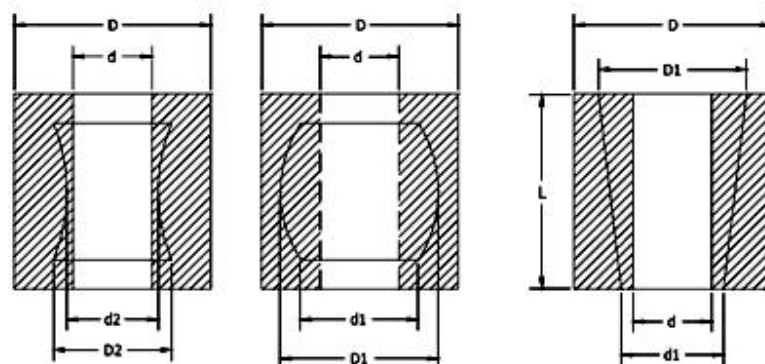


Figura 2.12: Concavidade, Convexidade e Conicidade, respectivamente (Fonte: Palma, 2004)

Equação da Concavidade:

$$T_{ZN} = D_2 - d_2$$

Equação 2.1

Equação da Convexidade:

$$T_{zo} = D_1 - d_1 \quad \text{Equação 2.2}$$

Equação da Conicidade:

$$T_{zc} = \frac{D_1 - d_1}{l} \quad \text{Equação 2.3}$$

2.4.3. Rugosidade

Rugosidade é o conjunto de irregularidades que podem ser avaliadas com aparelhos como o rugosímetro. A rugosidade desempenha um papel importante no comportamento dos componentes mecânicos, já que influi na qualidade de deslizamento, na resistência ao desgaste, na possibilidade de ajuste do acoplamento forçado, na resistência oferecida pela superfície ao escoamento de fluidos e lubrificantes, na qualidade de aderência que a estrutura oferece às camadas protetoras, na resistência à corrosão e à fadiga, na vedação e na aparência da peça (NBR ISO 4287, 2002).

A grandeza, a orientação e o grau de irregularidade da rugosidade podem indicar suas causas que, entre outras, podem ser imperfeições nos mecanismos das máquinas-ferramenta, vibrações no sistema peça-ferramenta, desgaste das ferramentas ou o próprio método de conformação da peça (NBR ISO 4287, 2002).

Tomando-se uma pequena porção da superfície, observam-se certos elementos que a compõem, como mostrado na figura 2.13, e explicados a seguir.

A- *Rugosidade ou textura primária* é o conjunto das irregularidades causadas pelo processo de produção, que são as impressões deixadas pela ferramenta (fresa, pastilha, rolo laminador etc.).

B- *Ondulação ou textura secundária* é o conjunto das irregularidades causadas por vibrações ou deflexões do sistema de produção ou do tratamento térmico.

C- *Orientação das irregularidades* é a direção geral dos componentes da textura, e são classificados como:

- orientação ou perfil periódico - quando os sulcos têm direções definidas;
- orientação ou perfil aperiódico - quando os sulcos não têm direções definidas.

D- *Passo das irregularidades* é a média das distâncias entre as saliências.

- D1: passo das irregularidades da textura primária;
- D2: passo das irregularidades da textura secundária.
- O passo pode ser designado pela frequência das irregularidades.

E- *Altura das irregularidades ou amplitude das irregularidades*.

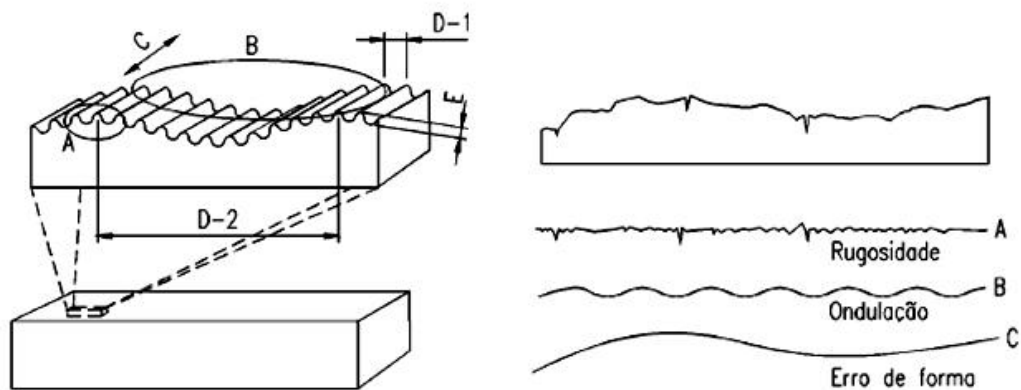


Figura 2.13: Elementos que compõem a superfície

O *comprimento de amostragem (Cut-off)* é definido da seguinte maneira: toma-se o perfil efetivo de uma superfície num comprimento l_m , comprimento total de avaliação. Chama-se o comprimento l_e de comprimento de amostragem. O comprimento de amostragem nos aparelhos eletrônicos, chamado de *cut-off* (l_e), não é a mesma coisa do que a distância total (l_t) percorrida pelo apalpador sobre a superfície. É recomendado pela norma ISO que os rugosímetros devam medir cinco comprimentos de amostragem e devem indicar o valor médio (Rosa, 2005).

2.4.3.1. Rugosidade média R_a

Rugosidade R_a (*roughness average*) significa rugosidade média, e é a média aritmética dos valores absolutos das ordenadas de afastamento (y_i), dos pontos do perfil de rugosidade em

relação à linha média, dentro do percurso de medição (l_m). Essa grandeza pode corresponder à altura de um retângulo, cuja área é igual à soma absoluta das áreas delimitadas pelo perfil de rugosidade e pela linha média, tendo por comprimento o percurso de medição (l_m), como mostra a figura 2.14.

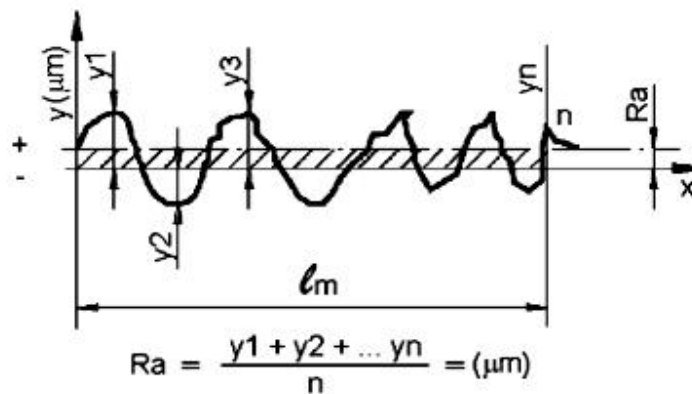


Figura 2.14: Definição da Rugosidade R_a

2.4.3.2. Rugosidade total R_t

Corresponde à distância vertical entre o pico mais alto e o vale mais profundo no comprimento de avaliação (l_m), independentemente dos valores de rugosidade parcial (Z_i). Na figura 2.15, pode-se observar que o pico mais alto está no retângulo Z_1 , e que o vale mais fundo encontra-se no retângulo Z_3 . Ambos configuram a profundidade total da rugosidade R_t .

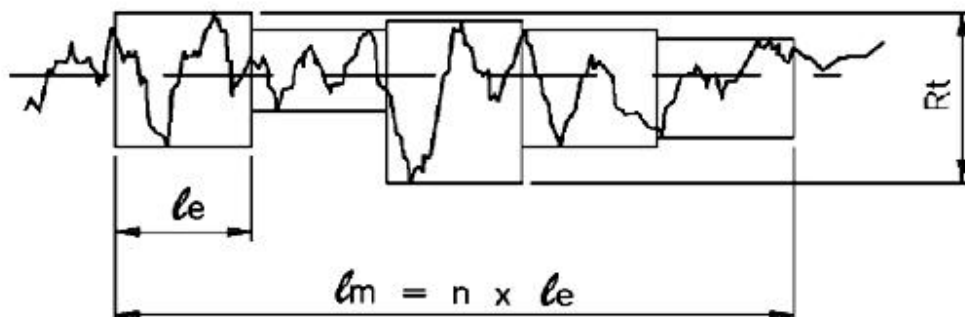


Figura 2.15: Definição da Rugosidade R_t

2.4.3.3. Rugosidade média R_z

Corresponde à média aritmética dos cinco valores de rugosidade parcial. Rugosidade parcial (Z_i) é a soma dos valores absolutos das ordenadas dos pontos de maior afastamento, acima e abaixo da linha média, existentes no comprimento de amostragem (*cut-off*). Na representação gráfica do perfil, esse valor corresponde à altura entre os pontos máximo e mínimo do perfil, no comprimento de amostragem (l_e), como pode ser visto na figura 2.16.

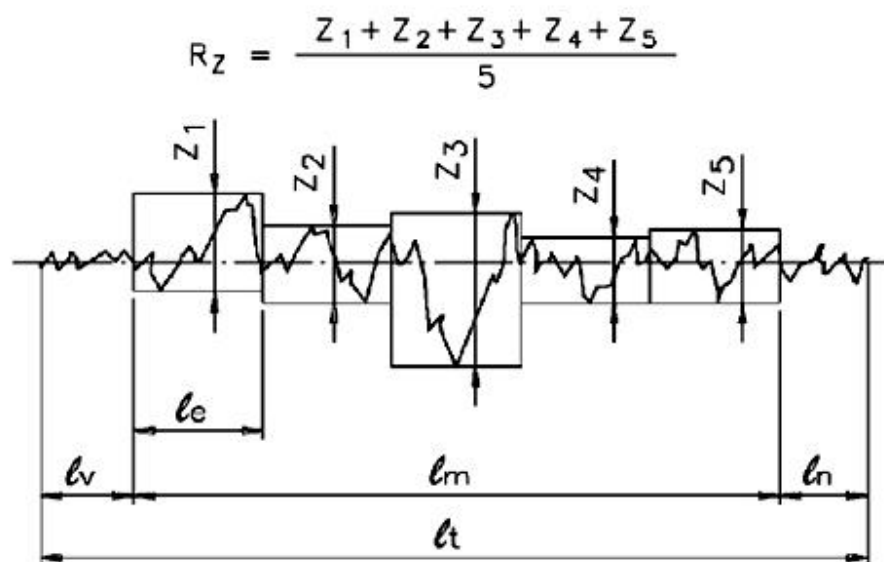


Figura 2.16: Definição da Rugosidade R_z a partir das rugosidades parciais Z_i

O parâmetro R_z pode ser usado em superfícies onde o perfil é periódico e conhecido, e pontos isolados não influenciam na função da peça a ser controlada, como por exemplo, superfícies de apoio ou ajustes prensados (Rosa, 2005).

2.4.4. Influência da Geometria dos Alargadores

As características geométricas dos alargadores tais como o tipo de haste, canal, sentido da hélice, ângulos de saída e de folga, do guia cilíndrico e do número de lâminas interferem na qualidade do furo alargado, principalmente nos valores dos desvios geométricos (erro de cilindridade e erro de circularidade).

De um modo geral, preferem-se ângulos de saída e de folga maiores, o que só pode ser encontrado nos alargadores de aço rápido. Os alargadores de metal duro, cerâmica e outros materiais mais duros possuem pequenos ângulos a fim de garantir maior resistência das arestas de corte, evitando desta forma a ocorrência de fratura. Segundo Machado e da Silva (2004), para a maioria das ferramentas o ângulo mais importante é o de saída. Uma redução deste ângulo tende a aumentar a área de contato cavaco-ferramenta e impor uma maior restrição ao escorregamento do cavaco sobre a superfície de saída, aumentando a força de usinagem. Segundo o Metals Handbook (1989), um ângulo de saída de 3° produz valores de rugosidade (R_a) entre 1,0 e 1,2 μm usinando furos de 13 mm de diâmetro em aço baixa liga com alargadores de aço-rápido. Quanto ao ângulo de folga, recomenda-se utilizar 15° para alargadores com diâmetros menores que 7 mm, e 7° para alargadores com diâmetro superior a este (Metals Handbook, 1989).

A guia cilíndrica tem como função alisar a parede do furo, evitando engripamento da aresta lateral de corte e guiar o alargador durante a operação, sendo recomendada pelo Metals Handbook (1989) a utilização de guias cilíndricas mais finas, a fim de minimizar o atrito entre peça e ferramenta. Segundo Gabor (1982), ao aumentar a largura da guia até certo valor e diminuir o ângulo de folga, dependendo do material a ser usinado, menores desvios de circularidade poderão ser obtidos. Para tanto, sabe-se que quanto melhor a qualidade de reafiação do guia, melhor será o acabamento da superfície (Da Silva, 2001).

Portanto, para que os desvios geométricos sejam minimizados e para que sejam atingidas as tolerâncias especificadas, é necessário que as arestas de corte estejam isentas de fissuras e retificadas à mesma altura da aresta de corte. Furos com má qualidade de acabamento são muitas vezes conseqüência de uma geometria de corte escolhida incorretamente (Da Silva, 2001).

CAPÍTULO III

METODOLOGIA

O fluxograma da figura 3.1 mostra as etapas da metodologia utilizada para a realização do trabalho proposto: primeiro foi feito um planejamento experimental, onde foram previstos os materiais a serem utilizados e as ferramentas. O dimensionamento e o planejamento estatístico do trabalho também foram montados nesta etapa. O próximo passo foi usar os materiais de acordo com esse planejamento feito a priori, e após isso, analisar a qualidade superficial dos furos produzidos, para enfim, discutir os resultados obtidos.

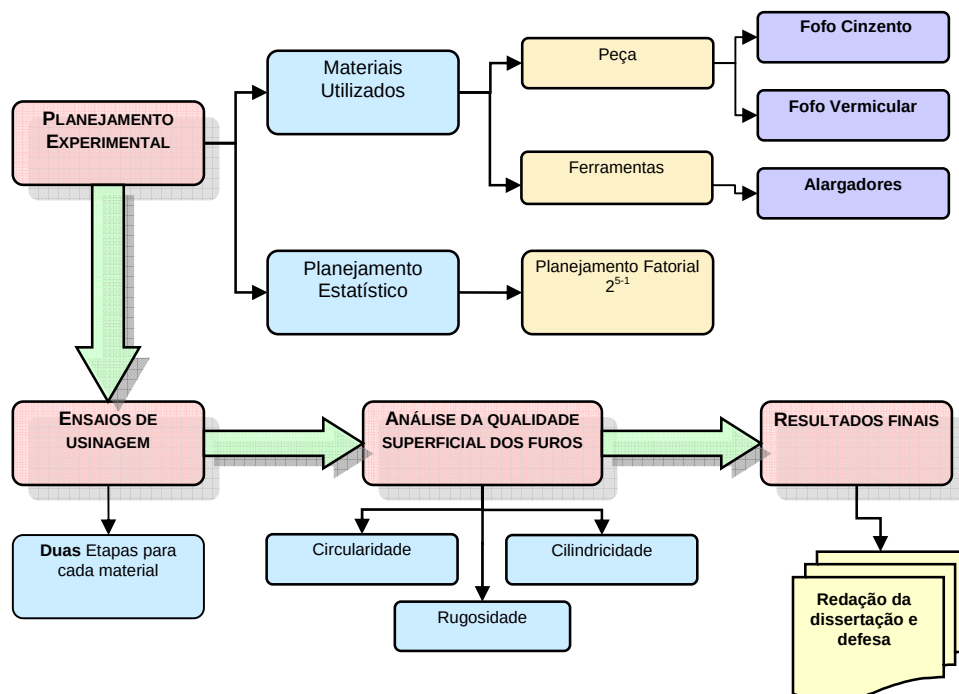


Figura 3.1: Fluxograma para demonstração da metodologia utilizada

3.1. MATERIAL UTILIZADO

Neste trabalho foram usadas barras de ferro fundido cinzento GH190, com a mesma composição do material utilizado por Santos (1999) e fornecidas pela Teksid do Brasil, e barras de ferro fundidas vermicular (CGI), fornecidas pela Fundição Tupy. As características do ferro fundido cinzento estão mostradas na tabela 3.1, e as características do ferro fundido vermicular estão mostradas na tabela 3.2.

Tabela 3.1: Características do ferro fundido cinzento GH 190 (fonte: Santos, 1999)

Composição Química				Características Estruturais			Dureza (HV)
%C	%Cr	%S	%P	Matriz	Grafita	Cementita e Carbono Livre	200
3,2 – 3,5	≤ 0,2	≤ 0,15	≤ 0,10	Perlítico lamelar máx. 5% de ferrita	Tipos B e D	Max. 1%	

Tabela 3.2: Características do ferro fundido vermicular (CGI) (fonte: Viana, 2004)

Matriz	Grafita								Dureza Brinell (HB 5/750)	Microdureza na Perlita (HV 01)
	Forma	Nodular	Partículas p/mm²	Tamanho (%)						
				8	7	6	5	4		
Perlita com ~2% de Ferrita	III-VI	7 %	218	22,0	37,0	33,0	7,0	1,0	237	321 a 366

A micrografia do ferro fundido cinzento está mostrada na figura 3.2 e a do ferro fundido vermicular está mostrada na figura 3.3 a seguir.

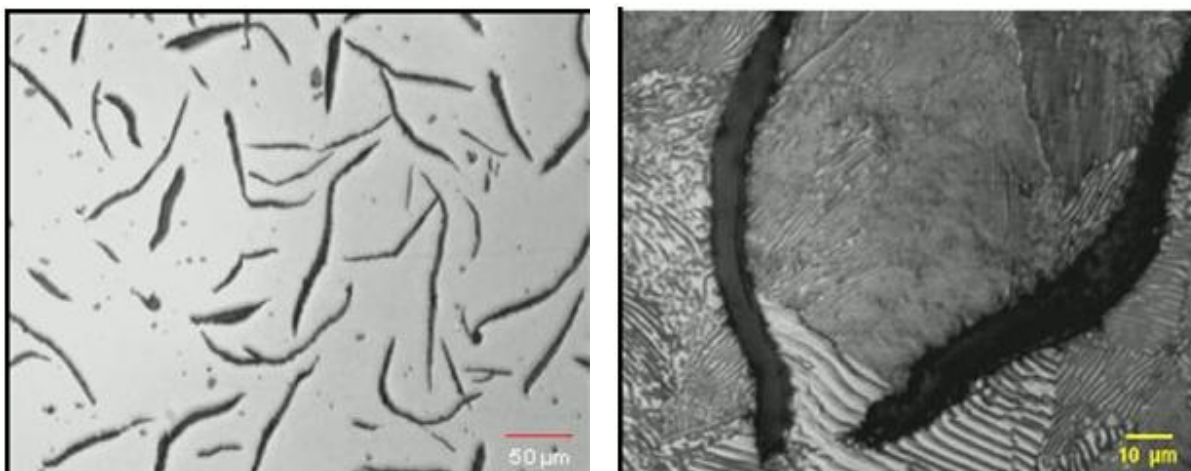
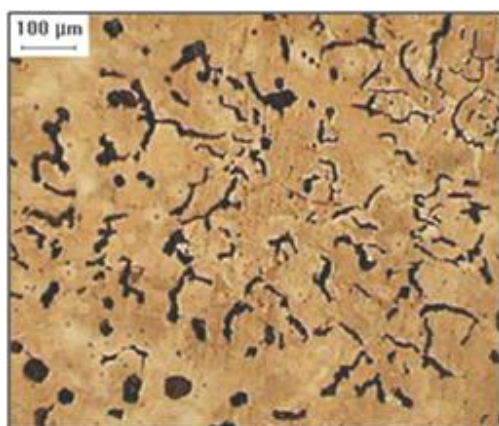
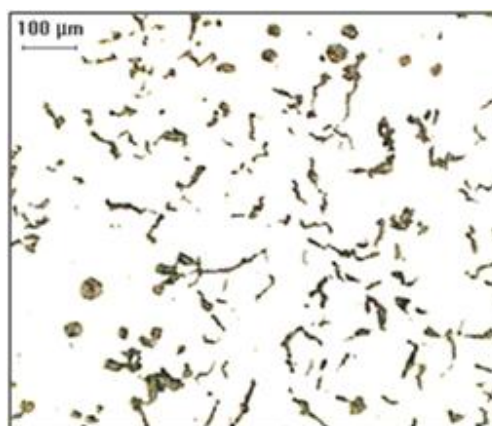


Figura 3.2: Micrografias do ferro fundido cinzento GH-190 (fonte: Da Mota, 2006).



(a) Grafita de vermicular e nodular, matriz metálica. Sem ataque



(b) Grafita de vermicular e nodular, matriz perlítica com pouca ferrita. Ataque Nital 3%.

Figura 3.3: Micrografias representativas do núcleo da amostra de ferro fundido vermicular (fonte: Viana, 2004)

3.2. PLANEJAMENTO EXPERIMENTAL

Os testes experimentais foram divididos em duas etapas, que foram realizadas para os dois materiais. Na primeira etapa, foi feito um planejamento fatorial fracionário 2^{5-1} , objetivando comparar os revestimentos das ferramentas de corte TiAlN e Alcrona® (AlCrN), e foram utilizados os níveis para as variáveis indicados na tabela 3.3.

Tabela 3.3: Planejamento fatorial fracionário da primeira etapa

NÍVEIS:	-1	+1
Revestimento	TiAlN	Alcrona® (AlCrN)
Sobremetal	0,10	0,25
(no raio)	(broca $\phi 11,8$)	(broca $\phi 11,5$)
Guia Cilíndrica	0,10	0,30
Velocidade de corte	40	70
Avanço da ferramenta	0,1	0,5
Total de testes	16 testes + repetições	

Os níveis das variáveis foram escolhidos de acordo com recomendações do fabricante, a OSG Tungaloy Sulamericana de Ferramentas Ltda., e do Machining Data Handbook (1980).

Na segunda etapa, comparou-se o revestimento que obteve melhor resultado nos testes com a Helica®. O planejamento realizado nessa etapa também foi um fatorial fracionário 2^{5-1} , com as variáveis em níveis iguais aos do planejamento anterior, mas agora com revestimentos diferentes, conforme mostrado nas tabelas 3.4 e 3.5.

Tabela 3.4: Planejamento fatorial fracionário da segunda etapa – Ferro Fundido Cinzento

NÍVEIS:	-1	+1
Revestimento	Helica® (AlCr)	TiAlN
Sobremetal	0,10	0,25
(no raio)	(broca $\phi 11,8$)	(broca $\phi 11,5$)
Guia Cilíndrica	0,10	0,30
Velocidade de corte	40	70
Avanço da ferramenta	0,1	0,5
Total de testes	16 testes + repetições	

Tabela 3.5: Planejamento fatorial fracionário da segunda etapa – Ferro Fundido Vermicular

NÍVEIS:	-1	+1
Revestimento	Alcrona® (AlCrN)	Helica® (AlCr)
Sobremetal	0,10	0,25
(no raio)	(broca $\phi 11,8$)	(broca $\phi 11,5$)
Guia Cilíndrica	0,10	0,30
Velocidade de corte	40	70
Avanço da ferramenta	0,1	0,5
Total de testes	16 testes + repetições	

Ao serem realizadas as análises dos resultados da primeira etapa, constatou-se que o melhor revestimento para usinar o ferro fundido cinzento foi o TiAlN, diferente do ferro fundido vermicular, que mostrou melhores resultados ao ser usinado com o Alcrona®. Por esse motivo, na segunda etapa, o revestimento a ser comparado com o Helica® foi diferente para cada material. Tanto o planejamento experimental como a análise dos resultados foi feita utilizando o software *Statistica 6.0*.

3.3. ENSAIOS DE USINAGEM

Os ensaios de furação e alargamento foram realizados em um centro de usinagem ROMI Discovery 760, 11KW, rotação de 10 a 10.000 rpm. Foram utilizados os materiais mostrados no item 3.1. As brocas usadas na furação e os alargadores foram fabricados pela empresa OSG Tungloy Sulamericana de Ferramentas Ltda. Para a furação foram usadas brocas de metal duro revestidas com TiN, fixas por um mandril mecânico e com diâmetros diferenciados de acordo com o sobremetal necessário para realizar cada teste de alargamento, como a mostrada na figura 3.4.

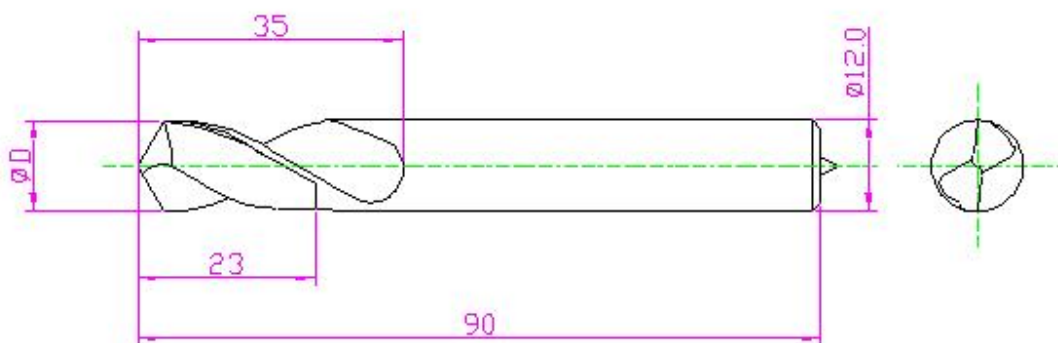


Figura 3.4: Desenho esquemático das brocas utilizadas para fazer os pré-furos

Os alargadores usados possuíam diâmetro nominal de 12 mm e eram de metal duro integral da classe K20 revestidos, com as dimensões mostradas na figura 3.5. As ferramentas fornecidas pela OSG Tungaloy Sulamericana de Ferramentas Ltda. estão mostradas na tabela 3.7. Sempre que o alargador apresentava valores influentes de desgaste ($V_{B_g} \geq 0,1mm$), geralmente visível a olho nu, a ferramenta era substituída por outra nova.

Tabela 3.6: Dimensionamento das ferramentas fornecidas pela OSG Tungaloy Sulamericana de Ferramentas Ltda.

FERRAMENTAS		
BROCAS DE METAL DURO		
Revestimento	TiN (Nitreto de Titânio)	
Diâmetro (mm)	$11,5^{+0,02}_{-0}$	$11,8^{+0,02}_{-0}$
ALARGADORES COM FACAS DE METAL DURO		
Revestimento	TiAlN (Futura TOP®)	
Diâmetro	12 mm	
Número de facas	8	
Guia Cilíndrica	$0,1^{+0,05}_{-0}$	$0,3^{+0,05}_{-0}$
Revestimento	AlCr (Helica®)	
Diâmetro	12 mm	
Número de facas	8	
Guia Cilíndrica	$0,1^{+0,05}_{-0}$	$0,3^{+0,05}_{-0}$
Revestimento	AlCrN (Alcrona®)	
Diâmetro	12 mm	
Número de facas	8	
Guia Cilíndrica	$0,1^{+0,05}_{-0}$	$0,3^{+0,05}_{-0}$

Os alargadores eram presos à máquina através de um mandril hidromecânico de alta precisão Corogrip®, fabricado pela Sandvik Coromant®, para garantir melhor fixação dos mesmos, e evitar o batimento excessivo das ferramentas, o que prejudica a qualidade superficial dos furos alargados. O batimento médio das ferramentas foi de aproximadamente

6,5 μm , e o batimento máximo foi de 10 μm . Esses valores não influenciam significativamente na qualidade superficial dos furos alargados. O mandril pode ser visto na figura 3.6.

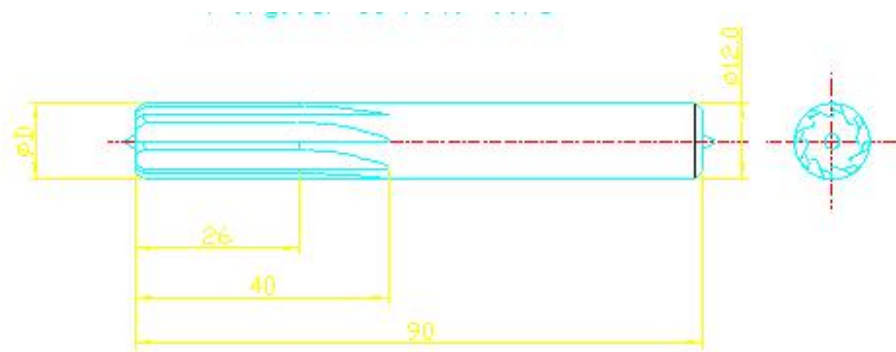


Figura 3.5: Desenho esquemático dos alargadores utilizados durante os testes



Figura 3.6: Mandril hidráulico usado nos ensaios de alargamento

Os furos foram do tipo cego com comprimento de 20 mm, e o comprimento de alargamento foi de 15 mm. Essa folga de 5 mm foi deixada no fundo do furo para que os cavacos se acumulassem ali, e a ferramenta não corresse o risco de quebrar devido a este acúmulo de material. Todos os testes foram realizados sem a utilização de fluidos de corte.

3.3.1. Corpos de Prova

Para os ensaios de usinagem, foram usados corpos de prova diferentes para materiais diferentes. O corpo de prova feito em ferro fundido cinzento era um blanque retangular, com medidas de 510 mm X 190 mm X 45 mm de espessura. Por causa do tamanho e do peso deste corpo de prova não serem compatíveis com as dimensões suportáveis pelo circularímetro, após a usinagem ele foi cortado nas medidas 70 mm X 65 mm, com identificação dos testes. O desenho do blanque com os respectivos cortes está mostrado na figura 3.7, e foi feito utilizando o software AutoCAD 2007.

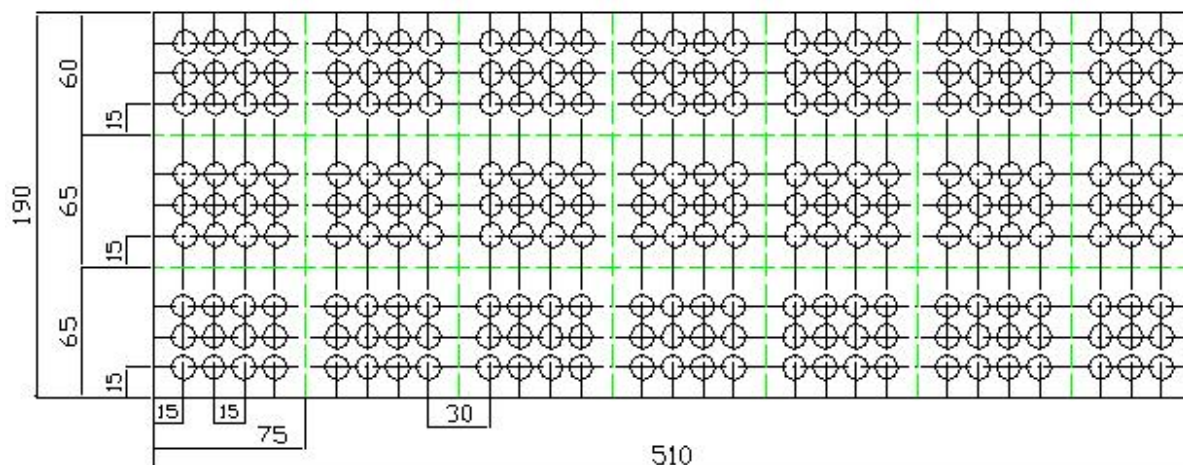


Figura 3.7: Desenho esquemático do corpo de prova de ferro fundido cinzento

Os corpos de prova de ferro fundido vermicular eram blanques retangulares com dimensões de 300 mm X 60 mm X 35 mm de espessura, fundidos em forma de coxins, como mostra a figura 3.8. Da mesma forma, como não era possível posicionar esses corpos de prova no circularímetro, tanto por causa do tamanho quanto por causa do peso, foi necessário deixá-los com as dimensões de 100 mm X 60 mm, após usinagem.

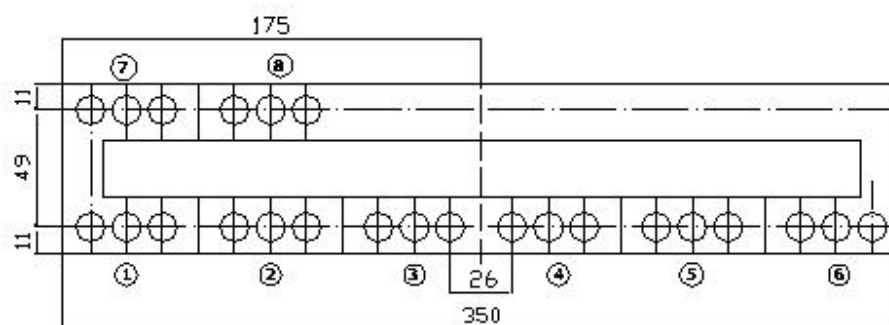


Figura 3.8: Desenho esquemático do corpo de prova de ferro fundido vermicular

As figuras 3.9 e 3.10, respectivamente, são fotos dos corpos de prova de ferro fundido cinzento e ferro fundido vermicular já usinados e medidos.



Apalpador do
circularímetro

Figura 3.9: Foto do corpo de prova de ferro fundido cinzento

Para cada material da peça, o corpo de prova era fixado na máquina, furado com as brocas nos diâmetros pré-determinados em função do sobremetal, e em seguida alargados. Após a usinagem completa de alargamento o corpo de prova era serrado nas dimensões adequadas para medição dos desvios de forma e parâmetros de acabamento.

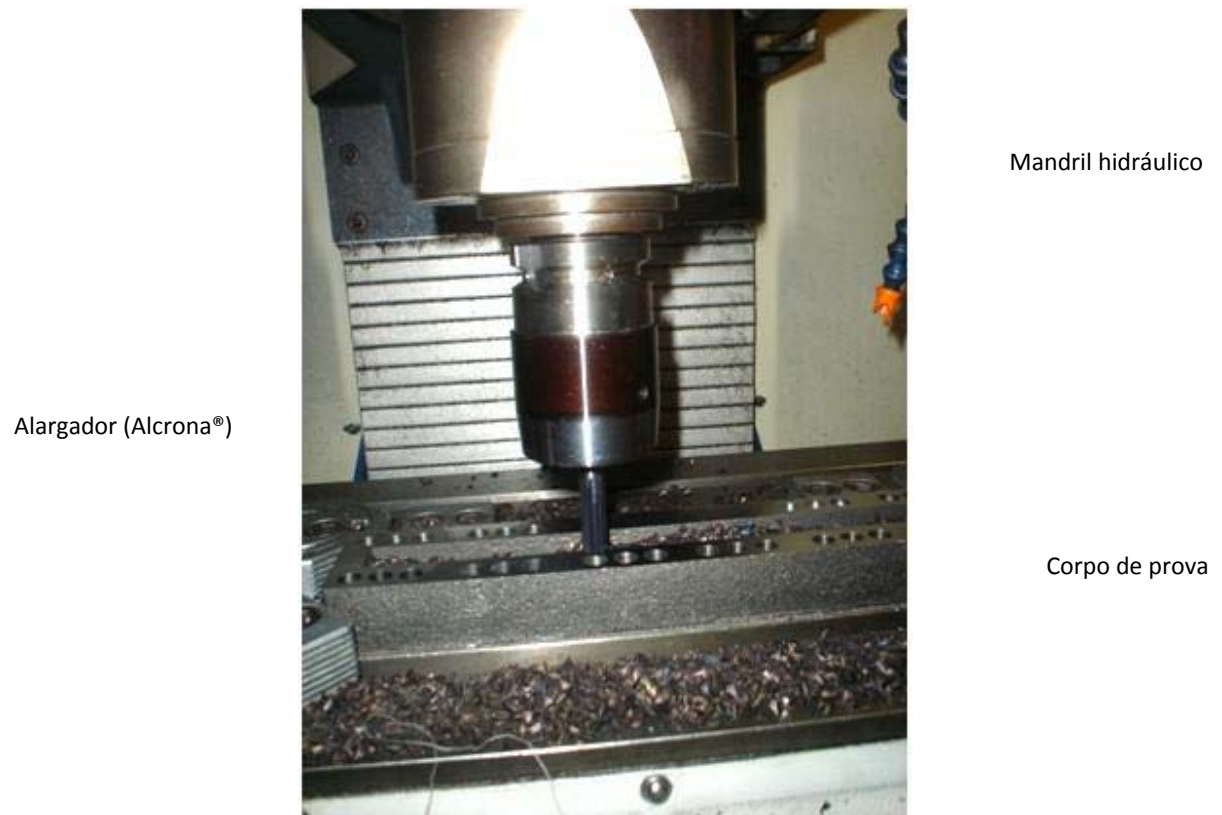


Figura 3.10: Foto do corpo de prova de ferro fundido vermicular

3.4. ANÁLISE DA QUALIDADE DOS FUROS

Para cada furo foi medida a circularidade, a cilindridade e a rugosidade na parede do mesmo. A circularidade e a cilindridade foram medidas em um circularímetro, fabricado pela Taylor Hobson, modelo Talyrond 131 e disponível no Laboratório de Metrologia da UFU. A precisão deste equipamento é de $0,03\ \mu\text{m}$ e sua capacidade máxima de medição é de 370 mm e 225 mm para o diâmetro e altura, respectivamente. Este equipamento está mostrado na figura 3.11.



Figura 3.11: Circularímetro Talyrond 131 – Taylor Hobson

A circularidade foi medida em três posições ao longo do furo alargado: 3 mm, 7,5 mm e 12 mm de profundidade, como pode ser visto na figura 3.12. A partir dessas medições o equipamento fez a medição da cilindridade de cada furo e forneceu ilustrações e os valores das medições, como as mostradas nas figuras 3.12 e 3.13. A figura 3.14 mostra esquematicamente os planos de medição da circularidade, e usados na medição da cilindridade.

A rugosidade da parede dos furos foi medida utilizando-se um rugosímetro portátil Surtronic 3+, modelo 112/1590, fabricado pela Taylor Hobson. Este instrumento possui agulha do apalpador de diamante com raio de ponta de 5 μm , resolução de 0,01 μm e trabalha com carga de 150 a 300 mg. O rugosímetro utilizado pode ser visto na figura 3.15. Foram medidos os parâmetros R_a , R_z e R_t , utilizando um cut-off de 0,8mm.

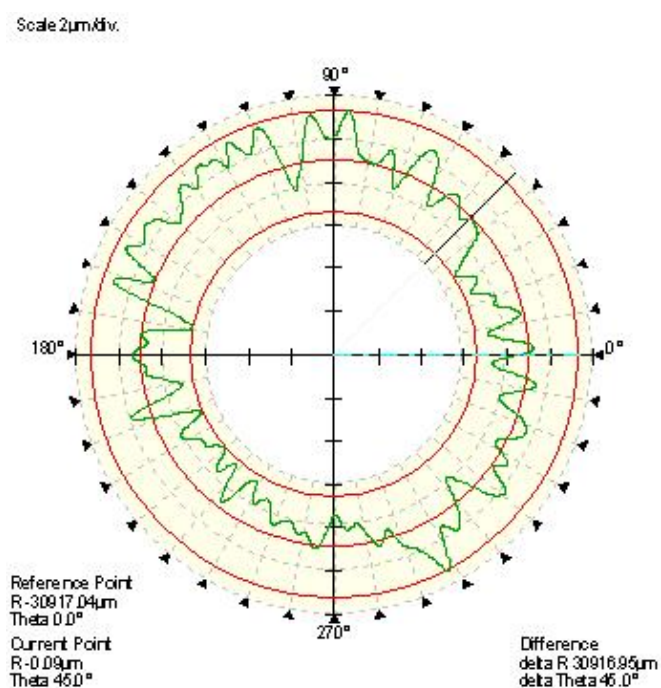


Figura 3.12: Exemplo de gráfico resultante da medição do erro de circularidade de um plano do furo usinado.

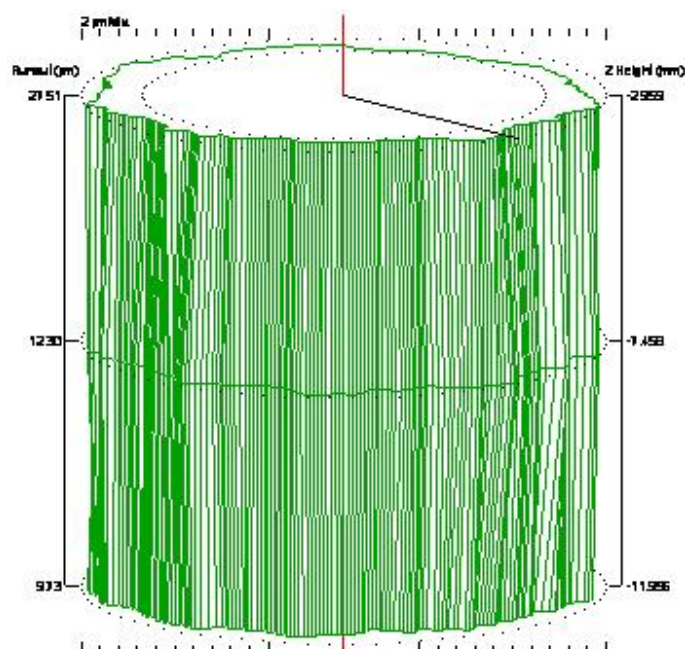


Figura 3.13: Exemplo de gráfico resultante da medição do erro de cilindridade de um furo usinado.

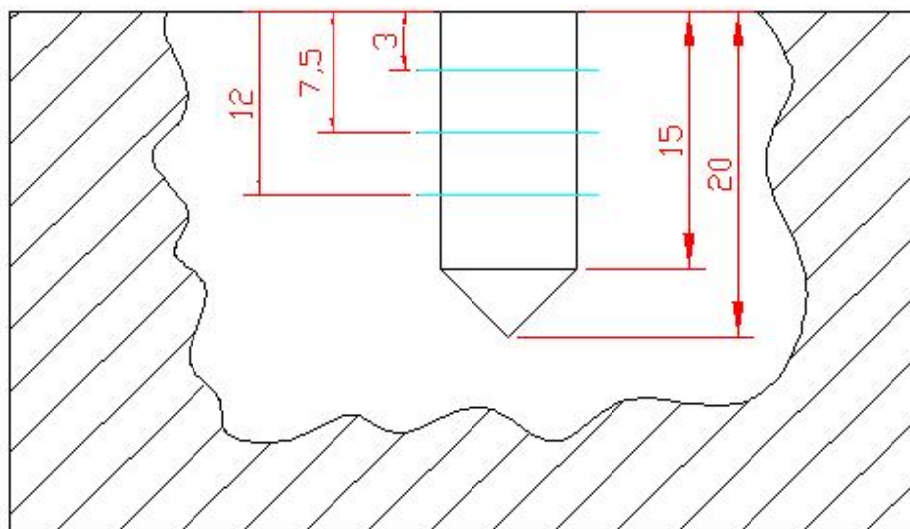


Figura 3.14: Planos de medição da circularidade



Figura 3.15: Rugosímetro Surtronic 3+ da Taylor Hobson

Na análise de todos os parâmetros de qualidade (variáveis de saída) foi utilizada a análise de variância (ANOVA) com índice de confiabilidade de 95%. Os quadros de ANOVA foram gerados utilizando o software *Statistica 6.0*.

CAPÍTULO IV

RESULTADOS E DISCUSSÕES

A análise dos dados obtidos foi feita utilizando-se recursos estatísticos. Como o planejamento dos experimentos foi feito utilizando o software Statistica, este mesmo software foi usado para fazer todas as análises, que são mostradas a seguir.

4.1. FERRO FUNDIDO CINZENTO

4.1.1. Primeira Etapa – Comparação dos revestimentos TiAlN x Alcrona®

Na primeira etapa dos testes, foram comparados os resultados colhidos durante a usinagem com ferramentas revestidas por TiAlN e Alcrona®.

4.1.1.1. Erros de forma – Circularidade e Cilindricidade

A tabela 4.1 contém os parâmetros de corte utilizados durante os testes com o ferro fundido cinzento, de acordo com o planejamento fatorial fracionário. Estes parâmetros foram usados tanto para a primeira etapa dos testes, como para a segunda etapa. Os resultados obtidos para o erro de circularidade durante os testes da primeira etapa, onde eram comparados os revestimentos TiAlN e Alcrona®, são apresentados na tabela 4.2, e os resultados obtidos para o erro de cilindricidade são mostrados na tabela 4.3. Ignorando-se os efeitos de interação das variáveis entre si, obtiveram-se as tabelas 4.4 e 4.5 da ANOVA (Análise de Variância) dos erros de circularidade e cilindricidade, respectivamente.

Tabela 4.1: Parâmetros de Corte – Ferro Fundido Cinzento

<i>Teste</i>	<i>Sobremetal</i>	<i>Guia</i>	<i>Revestimento</i>	<i>Vc</i>	<i>f</i>
Teste 1	0,5	0,10	Alcrons	40	0,5
Teste 2	0,5	0,10	Alcrons	52	0,1
Teste 3	0,5	0,10	TiAlN	40	0,1
Teste 4	0,5	0,10	TiAlN	52	0,5
Teste 5	0,5	0,30	Alcrons	40	0,1
Teste 6	0,5	0,30	Alcrons	52	0,5
Teste 7	0,5	0,30	TiAlN	40	0,5
Teste 8	0,5	0,30	TiAlN	52	0,1
Teste 9	0,2	0,10	Alcrons	40	0,1
Teste 10	0,2	0,10	Alcrons	52	0,5
Teste 11	0,2	0,10	TiAlN	40	0,5
Teste 12	0,2	0,10	TiAlN	52	0,5
Teste 13	0,2	0,30	Alcrons	40	0,5
Teste 14	0,2	0,30	Alcrons	52	0,1
Teste 15	0,2	0,30	TiAlN	40	0,1
Teste 16	0,2	0,30	TiAlN	52	0,5

Tabela 4.2: Resultados do Erro de Circularidade – Primeira Etapa – Ferro Fundido Cinzento

ERRO DE CIRCULARIDADE (μm)									
Furos									
1			2			3			
Planos de medição									
	1	2	3	1	2	3	1	2	3
Teste 1	7,41	7,26	7,33	9,51	8,03	8,03	6,93	7,02	9,70
Teste 2	17,64	24,75	14,43	14,64	18,33	15,06	17,64	12,82	18,43
Teste 3	35,70	29,59	38,81	17,28	14,42	13,06	18,45	19,68	18,33
Teste 4	23,80	23,26	23,84	13,56	14,57	16,01	53,50	44,15	54,59
Teste 5	12,66	10,11	12,83	15,20	15,19	13,62	38,08	39,37	29,76
Teste 6	10,00	10,39	12,34	20,93	16,88	10,10	11,99	15,62	15,82
Teste 7	16,01	16,05	17,84	12,55	8,98	10,37	13,05	10,77	14,49
Teste 8	56,86	45,03	48,12	22,59	34,58	24,63	33,43	43,57	43,12
Teste 9	14,90	16,89	16,47	19,51	21,65	23,02	20,85	20,87	16,53
Teste 10	75,79	75,81	56,68	48,15	37,35	42,11	16,80	18,29	18,49
Teste 11	23,01	22,95	14,16	59,55	49,35	63,28	9,87	10,15	12,39
Teste 12	31,25	29,16	28,59	26,17	20,86	28,34	23,57	16,16	17,11
Teste 13	50,04	37,59	39,83	11,83	18,75	19,00	12,84	10,82	12,82
Teste 14	18,03	17,55	15,66	43,38	28,12	59,42	33,25	33,53	33,55
Teste 15	13,59	9,99	8,15	24,98	26,33	30,08	18,86	33,45	33,46
Teste 16	34,19	32,28	34,11	33,92	28,51	25,48	37,91	33,89	37,98

Tabela 4.3: Resultados do Erro de Cilindricidade – Primeira Etapa – Ferro Fundido Cinzento

Erro de Cilindricidade (μm)			
	Furos		
	1	2	3
Teste 1	8,86	10,45	9,70
Teste 2	28,47	24,88	25,53
Teste 3	38,81	17,28	19,68
Teste 4	23,84	16,01	54,66
Teste 5	12,83	15,20	39,38
Teste 6	18,36	23,82	19,52
Teste 7	17,84	12,55	14,51
Teste 8	56,86	34,58	43,57
Teste 9	16,89	23,24	20,90
Teste 10	75,82	48,15	18,49
Teste 11	23,01	63,28	12,39
Teste 12	31,25	28,34	23,57
Teste 13	50,04	19,01	12,84
Teste 14	18,03	59,42	33,55
Teste 15	13,60	30,22	33,59
Teste 16	34,27	33,92	37,98

Tabela 4.4: ANOVA – Erro de Circularidade – Primeira Etapa – Ferro Fundido Cinzento

	SS	df	MS	F	p
Sobremetal	384,263	1	384,2629	0,869084	0,37317
Guia Cilíndrica	24,016	1	24,0158	0,054316	0,820417
Revestimento	42,485	1	42,4849	0,096088	0,762939
Velocidade de Corte	565,077	1	565,0768	1,27803	0,284651
Avanço	10,012	1	10,0124	0,022645	0,883376
Erro	4421,468	10	442,1468		
Total SS	5463,098	15			

Tabela 4.5: ANOVA – Erro de Cilindricidade – Primeira Etapa – Ferro Fundido Cinzento

	SS	df	MS	F	p
Sobremetal	188,928	1	188,9280	0,465062	0,510753
Guia Cilíndrica	43,864	1	43,8642	0,107975	0,749238
Revestimento	4,529	1	4,5290	0,011148	0,917998
Velocidade de Corte	698,590	1	698,5898	1,719638	0,219050
Avanço	9,388	1	9,3881	0,023110	0,882196
Erro	4062,424	10	406,2424		
Total SS	5010,400	15			

Nenhuma variável apresentou influência significativa nos erros de circularidade e de cilindridade, o que se pode ver claramente pelos valores de p mostrados nas tabelas de ANOVA que, pela hipótese, com 95% de confiança, devem ser menores que 0,05 para que a variável tenha significância. Apesar das análises de variância indicarem influências insignificantes, é interessante observar a influência qualitativa, isto é, como cada parâmetro investigado tende a alterar o erro de circularidade.

Na figura 4.1 é mostrada a tendência de diminuição dos erros de circularidade e cilindridade à medida que se aumenta o sobremetal, ou seja, quando se retirou mais material, esses erros foram menores. Na usinagem de materiais frágeis, como o ferro fundido cinzento, o processo de formação do cavaco é dominado mais intrinsecamente pela nucleação e propagação de trincas com pouca deformação. A propagação dessas trincas na região do plano de cisalhamento primário imposta pela ação da cunha cortante é um processo de pouco controle, podendo invadir a peça, promovendo destacamento de material além do programado. Os resultados demonstram que este controle pode ser mais crítico para menores quantidades de material a ser retirado (menores sobremetais).

A figura 4.2 mostra a ligeira tendência da diminuição dos erros de circularidade e de cilindridade quando se usa uma guia cilíndrica menor. A guia cilíndrica, além de ajudar a ferramenta a avançar, tem a função de ajustar a medida do furo, alisando a superfície. As dimensões das guias cilíndricas são importantes e dependem do material da peça e do avanço por dente. Para as condições testadas, a guia menor, de 0,10 mm, melhora a função da guia, oferecendo furos com menores erros de forma.

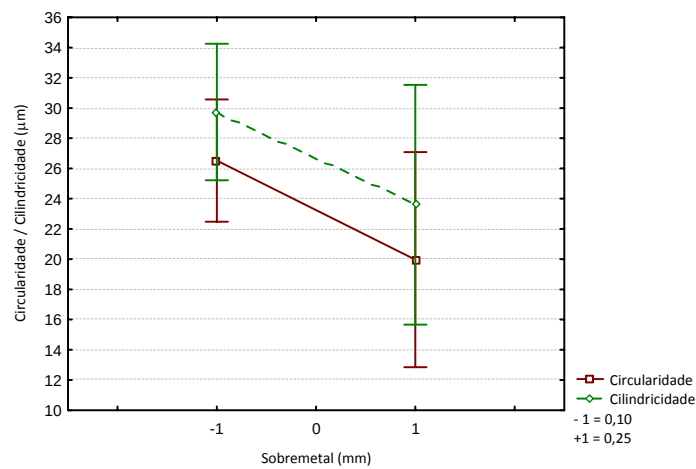


Figura 4.1: Erros de Circularidade e Cilindridade x Sobremetal – Primeira Etapa – Ferro Fundido Cinzento

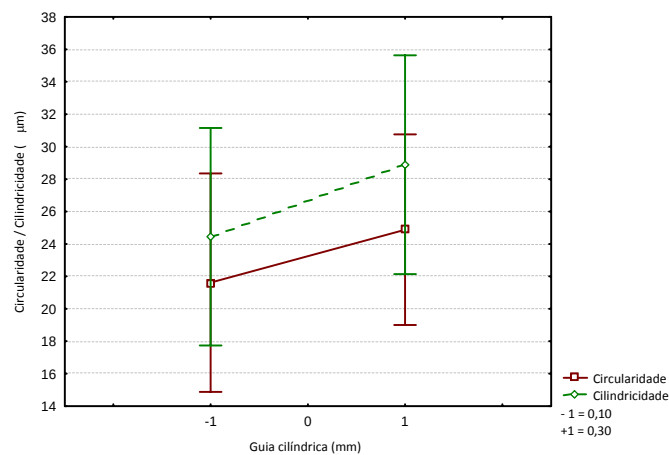


Figura 4.2: Erros de Circularidade e Cilindridade x Guia Cilíndrica – Primeira Etapa – Ferro Fundido Cinzento

Pela figura 4.3 percebe-se que as médias dos erros de circularidade e cilindridade foram ligeiramente maiores quando se usinou com ferramentas revestidas de Alcrona® (AlCrN). Esses resultados não são conclusivos pelo fato dos intervalos de confiança serem muito grandes. Os erros de forma dependem das condições de formação do cavaco, e os revestimentos das ferramentas são muito importantes nesse processo. As condições de menores forças e vibrações tendem a favorecer a qualidade maior do furo. Além disto, o revestimento altera

fortemente a morfologia da aresta postiça de corte, que nas condições testadas deve estar presente.

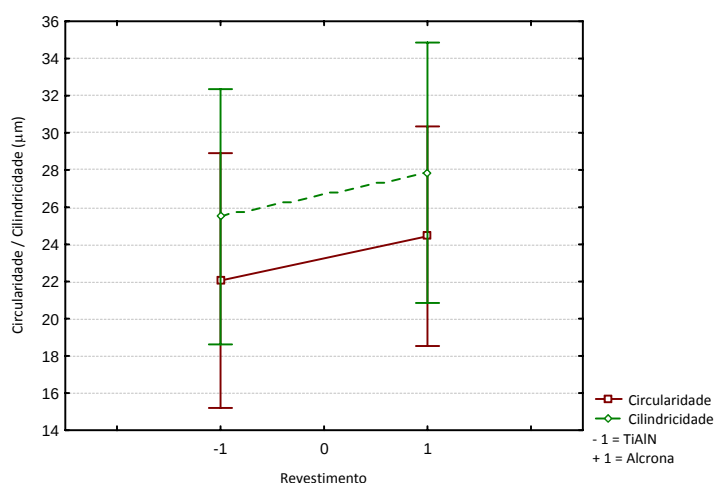


Figura 4.3: Erros de Circularidade e Cilindridade x Revestimento – Primeira Etapa – Ferro Fundido Cinzento

A figura 4.4 mostra o aumento considerável dos erros de circularidade e cilindridade médios com o aumento da velocidade de corte. A maior velocidade de corte pode realçar o efeito de batimento da ferramenta, comprometendo a rigidez do sistema e a qualidade do furo usinado. Entretanto, o fato que mais pode estar contribuindo para estes resultados seria a possível presença de aresta postiça de corte. A APC sempre está presente na usinagem de ferro fundido cinzento, onde suas dimensões, inclusive, são normalmente maiores que na usinagem de aços-carbono, e elas persistem em velocidades de corte superiores às dos aços (Trent e Wright, 2000). Nos testes desta dissertação, as dimensões da APC devem ser mais críticas, ou a APC mais instável, na velocidade de 70 m/min que na menor velocidade de corte, de 40 m/min, oferecendo assim, maiores erros de circularidade e de cilindridade.

A figura 4.5 mostra o comportamento dos erros de circularidade e cilindridade com o aumento do avanço. Como se pode observar, o avanço também não foi uma variável significativa na análise, já que os intervalos de confiança obtidos foram grandes e a diferença

entre as médias foi pequena. Se por um lado o avanço gera forças maiores, por outro lado ele diminui o tempo de corte e a ação alisadora das guias cilíndricas.

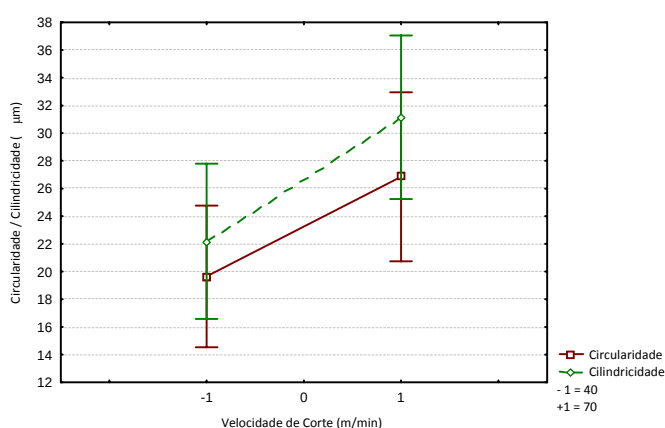


Figura 4.4: Erros de Circularidade e Cilindricidade x Velocidade de Corte – Primeira Etapa – Ferro Fundido Cinzento

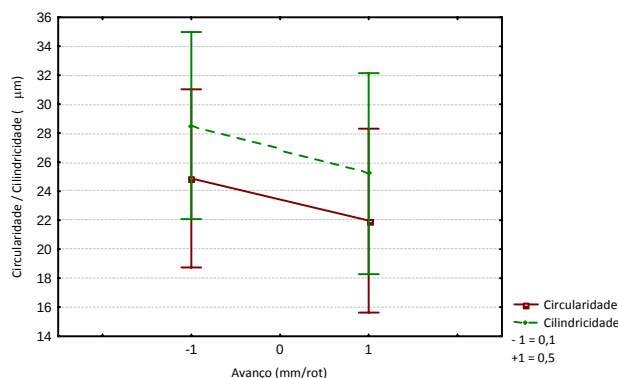


Figura 4.5: Erros de Circularidade e Cilindricidade x Avanço – Primeira Etapa – Ferro Fundido Cinzento

4.1.1.2. Parâmetros de Rugosidade Ra, Rz e Rt

Três parâmetros de rugosidades foram medidos nestes testes: Ra, Rz e Rt. Os resultados médios obtidos para estes parâmetros são mostrados na tabela 4.6. Ignorando os efeitos de interação das variáveis entre si, obteve-se as tabelas 4.7, 4.8 e 4.9 da ANOVA (Análise de Variância) dos três parâmetros de rugosidade, respectivamente.

Tabela 4.6: Resultados das Rugosidades – Primeira Etapa – Ferro Fundido Cinzento

	Rugosidade (μm)		
	Ra	Rt	Rz
Teste 1	0,81	8,1	5,5
Teste 2	2,31	22,3	13,5
Teste 3	1,72	17,9	10,4
Teste 4	2,45	22,4	14,1
Teste 5	2,07	21,0	12,7
Teste 6	1,65	17,2	10,6
Teste 7	3,16	26,4	17,2
Teste 8	4,95	41,5	27,2
Teste 9	2,46	25,4	14,7
Teste 10	2,25	25,3	14,2
Teste 11	1,24	14,4	7,9
Teste 12	2,38	24,8	14,9
Teste 13	1,51	13,0	8,9
Teste 14	2,08	24,3	12,5
Teste 15	2,27	23,7	13,3
Teste 16	3,13	29,8	17,4

Tabela 4.7: ANOVA – Rugosidade Ra – Primeira Etapa – Ferro Fundido Cinzento

	SS	df	MS	F	p
Sobremetal	0,15126	1	0,151260	0,170965	0,687983
Guia Cilíndrica	0,00595	1	0,005951	0,006727	0,936252
Revestimento	0,18847	1	0,188471	0,213024	0,654284
Velocidade de Corte	4,72566	1	4,725660	5,341290	0,043424
Avanço	1,20306	1	1,203061	1,359789	0,270632
Erro	8,84741	10	0,884741		
Total SS	15,88017	15			

Tabela 4.8: ANOVA – Rugosidade Rz – Primeira Etapa – Ferro Fundido Cinzento

	SS	df	MS	F	p
Sobremetal	0,2938	1	0,2938	0,011567	0,916480
Guia Cilíndrica	0,0092	1	0,0092	0,000361	0,985208
Revestimento	1,1972	1	1,1972	0,047132	0,832496
Velocidade de Corte	144,0505	1	144,0505	5,671183	0,038519
Avanço	28,6307	1	28,6307	1,127173	0,313347
Erro	254,0043	10	25,4004		
Total SS	450,0975	15			

Tabela 4.9: ANOVA – Rugosidade Rt – Primeira Etapa – Ferro Fundido Cinzento

	SS	df	MS	F	p
Sobremetal	4,811	1	4,8108	0,072291	0,793496
Guia Cilíndrica	15,435	1	15,4348	0,231934	0,640459
Revestimento	43,330	1	43,3304	0,651114	0,438485
Velocidade de Corte	512,887	1	512,8874	7,707010	0,019580
Avanço	113,480	1	113,4802	1,705234	0,220845
Erro	665,482	10	66,5482		
Total SS	1437,524	15			

Na análise destes parâmetros, pôde-se verificar que apenas a velocidade de corte apresentou influência significativa nos resultados, o que se pode comprovar pelos valores de p mostrado nas tabelas, que foi menor do que 0,05 (nível de confiabilidade de 95%) em todas as análises. Para indicar a tendência de influência de cada variável nos parâmetros de rugosidade, as figuras 4.6 a 4.10 são apresentadas.

A partir da análise do gráfico de médias da figura 4.6 pode-se observar que apenas a rugosidade Rt apresentou ligeira tendência à diminuição com o aumento do sobremetal. As rugosidades Ra e Rz foram maiores quando se aumentou o sobremetal, ou seja, quanto mais material é arrancado, maiores eram os parâmetros de rugosidade Ra e Rz da parede obtida. O resultado oposto para o parâmetro Rt não é surpresa, uma vez que se trata de um parâmetro estatisticamente mais aleatório do que Ra e Rz (Dagnall,1986).

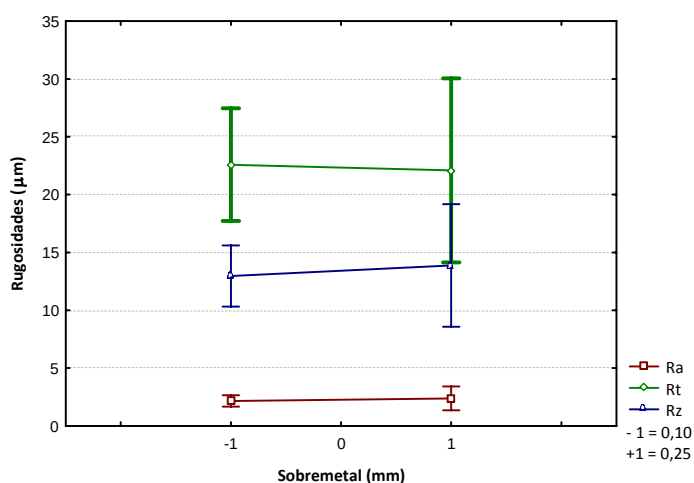


Figura 4.6: Rugosidades x Sobremetal – Primeira Etapa – Ferro Fundido Cinzento

Na figura 4.7 pode-se observar que a guia cilíndrica não influenciou significativamente a rugosidade Ra, mas os comportamentos das rugosidades Rz e Rt foram notáveis, apesar de intervalos de confiança grandes. Esses parâmetros foram menores quando se usinou com guias cilíndricas mais finas, o que pode ser explicado pelo menor contato que a ferramenta teve com a superfície gerada, diminuindo assim o atrito e produzindo superfícies com melhor qualidade.

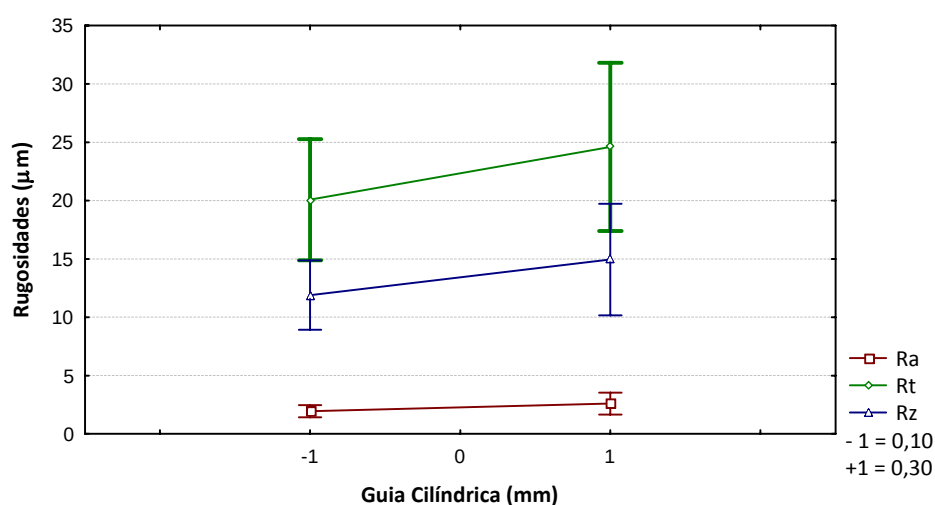


Figura 4.7: Rugosidades x Guia Cilíndrica – Primeira Etapa – Ferro Fundido Cinzento

A figura 4.8 mostra o comportamento dos parâmetros de rugosidade quando se usam revestimentos diferentes nos alargadores. A tendência aqui, como pode ser observado no gráfico, é que os alargadores revestidos com TiAlN proporcionem melhores rugosidades do que os alargadores revestidos com AlCrN, assim como ocorreu com os erros de forma (figura 4.3).

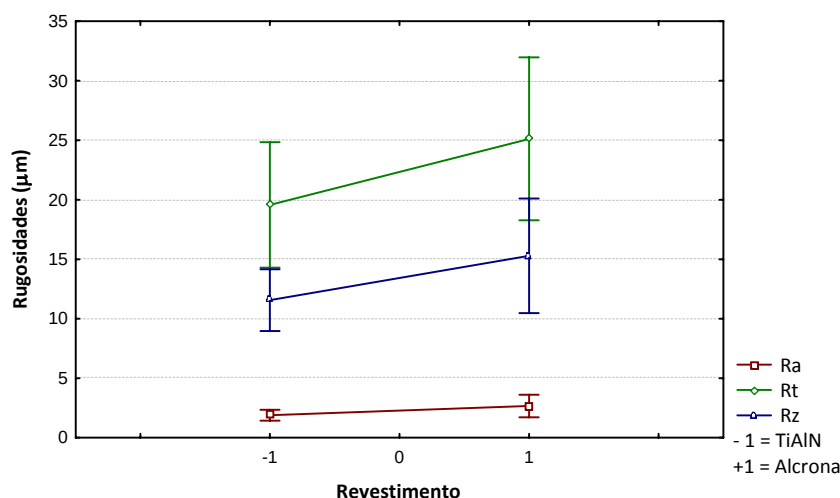


Figura 4.8: Rugosidades x Revestimento – Primeira Etapa – Ferro Fundido Cinzento

A figura 4.9 mostra o comportamento dos parâmetros de rugosidade com o aumento da velocidade de corte, que se tornaram maiores. Este comportamento se explica pela possibilidade de maior vibração da ferramenta ao alargar com velocidades maiores e o menor tempo de ação das guias cilíndricas imposto pela maior rotação da ferramenta. Além desses fatores, a vibração e a presença inquestionável da aresta postiça de corte nesta faixa de velocidade (Trent e Wright, 2000; Machado e Da Silva, 2004) contribuem para explicar os resultados obtidos.

Na figura 4.10 tem-se o comportamento dos parâmetros de rugosidade quando se varia o avanço da ferramenta de 0,1 para 0,5 mm/rotação. Os resultados mostraram que as rugosidades diminuíram, ou seja, a qualidade superficial obtida foi melhor quando se usinou com maiores avanços. O avanço de 0,1 mm/volta implica em um avanço por dente muito diminuto ($f_z = 0,0125\text{mm/dente}$). Este valor é inferior ao raio de aresta, que era de 0,025 mm (ou 25 μm), causando um corte com ângulo de saída muito negativo e prejudicando o processo de formação do cavaco, e, conseqüentemente, o acabamento superficial.

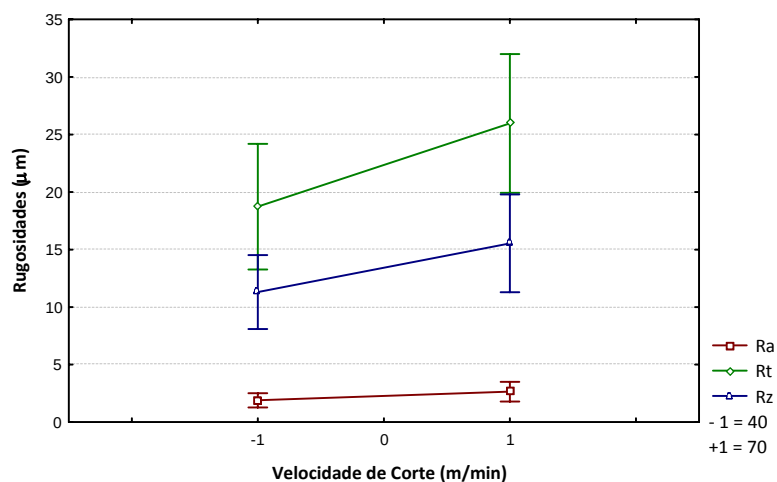


Figura 4.9: Rugosidades x Velocidade de Corte – Primeira Etapa – Ferro Fundido Cinzento

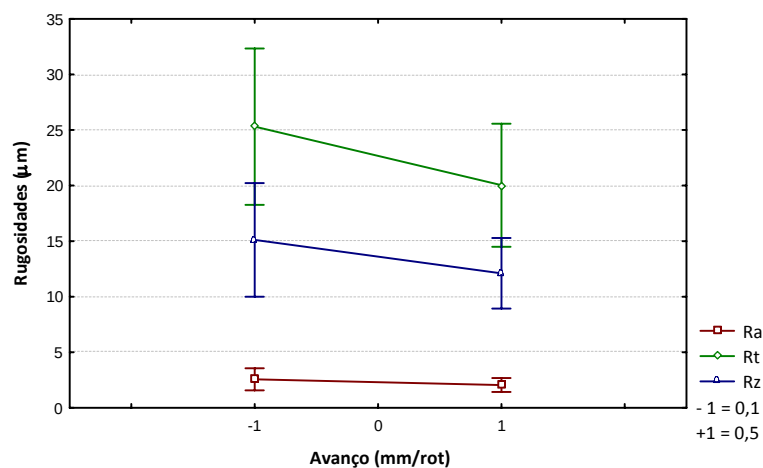


Figura 4.10: Rugosidades x Avanço – Primeira Etapa – Ferro Fundido Cinzento

4.1.2. Segunda Etapa – Comparação dos revestimentos TiAlN x Helica[®]

Na segunda etapa foram realizados testes usando-se ferramentas revestidas com TiAlN e Helica[®], para comparar a performance desses dois revestimentos. O TiAlN foi utilizado na comparação, e não o Alcrona[®] porque, apesar de o revestimento não ter se mostrado influente no nível de confiança adotado (95%), ele proporcionou melhores resultados em todos os parâmetros de qualidade superficial avaliados, considerando as tendências médias.

4.1.2.1. Erros de forma - Circularidade e Cilindricidade

A tabela 4.10 contém as medidas do erro de circularidade nos furos feitos no corpo de prova de ferro fundido cinzento, durante a segunda etapa do experimento, e a tabela 4.11, os resultados das medições dos erros de cilindridade durante essa mesma etapa.

Tabela 4.10: Resultados do Erro de Circularidade – Segunda Etapa – Ferro Fundido Cinzento

Erro de Circularidade (μm)									
Furos:									
1			2			3			
Planos de Medição:									
	1	2	3	1	2	3	1	2	3
Teste 1	4,98	10,77	6,07	6,10	8,40	7,71	7,19	8,49	7,15
Teste 2	12,23	16,31	18,33	15,52	18,35	24,93	17,38	13,41	18,31
Teste 3	10,93	10,83	10,91	7,20	9,17	9,22	8,12	13,19	13,20
Teste 4	22,73	22,76	16,30	26,49	18,49	26,55	18,73	35,02	41,74
Teste 5	27,70	32,69	30,20	38,86	34,60	34,28	15,42	18,82	12,83
Teste 6	15,39	15,62	12,61	18,41	19,59	10,71	52,97	46,54	37,44
Teste 7	28,30	28,34	28,30	41,47	51,08	38,09	23,61	23,93	24,02
Teste 8	46,84	44,81	32,93	48,10	45,36	17,05	45,48	52,98	25,55
Teste 9	27,22	24,21	16,45	46,40	41,88	41,08	23,61	23,63	23,81
Teste 10	43,29	45,53	46,24	22,42	23,41	23,73	16,24	17,38	17,57
Teste 11	14,02	15,57	12,06	14,15	14,52	11,25	20,73	20,29	20,82
Teste 12	23,41	21,36	23,16	35,31	50,50	21,42	22,23	18,75	22,48
Teste 13	23,55	22,20	23,68	13,51	12,91	12,01	16,14	12,52	12,56
Teste 14	22,31	34,33	34,78	27,44	23,87	18,70	16,25	18,38	18,33
Teste 15	19,16	21,52	21,75	21,78	21,67	22,07	17,03	16,91	16,96
Teste 16	94,70	92,31	58,85	47,13	51,65	52,32	65,55	65,47	49,14

Foi possível observar que nenhuma variável teve influência estatística significativa nos resultados do erro de circularidade, como mostra a tabela 4.12 e, que apenas a guia cilíndrica obteve essa influência significativa para o erro de cilindridade, como pode ser visto na tabela 4.13 da análise de variância, com 95% de confiabilidade.

Tabela 4.11: Resultados do Erro de Cilindricidade – Segunda Etapa – Ferro Fundido Cinzento

Cilindricidade (μm)			
Furos			
Testes	1	2	3
1	10,77	8,40	8,55
2	19,64	24,93	18,53
3	11,04	9,29	13,37
4	22,79	26,59	41,75
5	32,69	38,86	18,91
6	17,24	23,49	52,98
7	28,59	51,08	24,05
8	46,84	48,10	54,85
9	27,50	46,40	23,94
10	46,36	23,80	17,57
11	15,66	14,52	21,02
12	23,44	50,50	22,49
13	23,68	15,85	12,82
14	34,79	23,88	18,38
15	21,87	22,12	17,10
16	94,75	52,32	65,56

Tabela 4.12: ANOVA – Erro de Circularidade – Segunda Etapa – Ferro Fundido Cinzento

	SS	df	MS	F	p
Sobremetal	1202,205	1	1202,205	2,309110	0,159583
Guia Cilíndrica	385,717	1	385,717	0,740859	0,409549
Revestimento	98,047	1	98,047	0,188322	0,673530
Velocidade de Corte	1681,291	1	1681,291	3,229306	0,102548
Avanço	689,917	1	689,917	1,325144	0,276452
Erro	5206,353	10	520,635		
Total SS	9527,458	15			

Tabela 4.13: ANOVA – Erro de Cilindricidade – Segunda Etapa – Ferro Fundido Cinzento

	SS	df	MS	F	p
Sobremetal	45,1672	1	45,1672	4,84801	0,052280
Guia Cilíndrica	110,8551	1	110,8551	11,89860	0,006232
Revestimento	16,5510	1	16,5510	1,77650	0,212150
Velocidade de corte	10,2741	1	10,2741	1,10277	0,318375
Avanço	26,6730	1	26,6730	2,86294	0,121515
Erro	93,1665	10	9,3167		
Total SS	313,9289	15			

Ao se avaliar qualitativamente as tendências das médias, a figura 4.11 mostra que o erro de circularidade diminui quando se aumenta o sobremetal, ou seja, quando se retirou mais

material, o erro de circularidade foi menor. Isso se deve ao fato de que a ferramenta ao usinar retirando menos material (menor sobremetal) alisa a parede do furo, fazendo mais uma conformação do que uma usinagem propriamente dita, o que prejudica a qualidade do furo. Este fenômeno também foi observado com o erro de cilindridade. Aqui também se pode lembrar que, por ser um material frágil, o controle do cavaco durante a usinagem do ferro fundido cinzento é mais crítico quando se retira menores quantidades de material, ou seja, quando o sobremetal é menor, já que o processo de formação do cavaco é dominado mais pela propagação de trincas do que pela deformação no plano de cisalhamento primário.

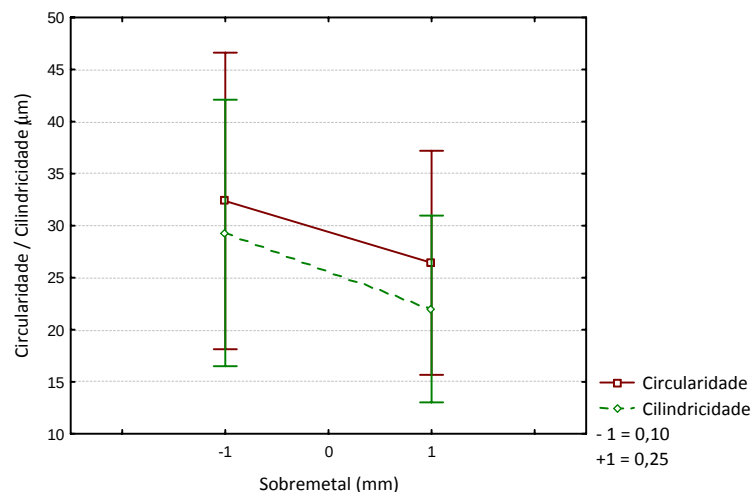


Figura 4.11: Erros de Circularidade e Cilindridade x Sobremetal – Segunda Etapa – Ferro Fundido Cinzento

A figura 4.12 mostra que os erros de circularidade e de cilindridade aumentam quando se usa uma guia cilíndrica maior, uma tendência esperada, já que com a guia mais larga, a ação de conformação e alisamento da superfície do furo é maior, o que ocasiona maior geração de calor, podendo ainda aumentar a vibração do sistema. Todos esses fatores influenciam para que a qualidade do furo seja pior.

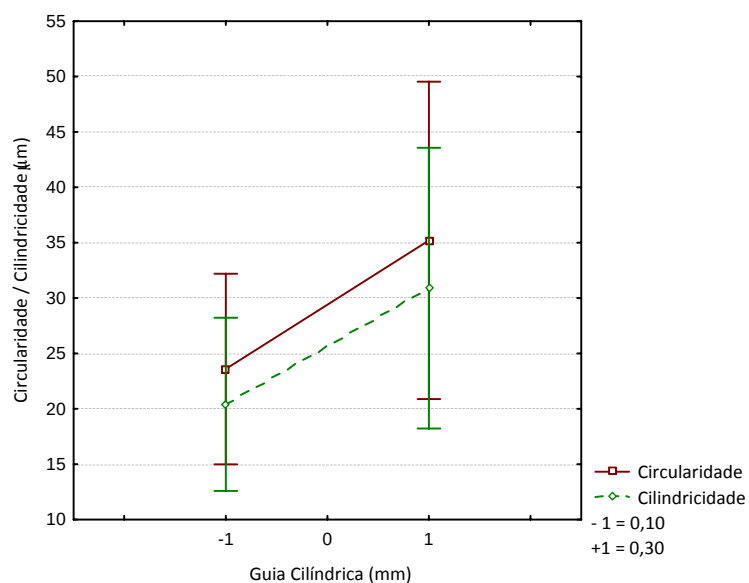


Figura 4.12: Erros de Circularidade e Cilindricidade x Guia Cilíndrica – Segunda Etapa – Ferro Fundido Cinzento

A figura 4.13 mostra que a média dos erros de circularidade foi maior quando se usinou com ferramentas revestidas com TiAlN, o que pode induzir que as ferramentas revestidas com Helica® são melhores para alargar o material em questão. Saliente-se, entretanto, que esses resultados não são conclusivos pelo fato dos intervalos de confiança serem muito grandes.

A figura 4.14 demonstra o aumento dos erros de circularidade e cilindridade médios com o aumento da velocidade de corte, da mesma forma que aconteceu com os testes da primeira etapa. Esses resultados podem ser explicados pela presença de vibração da ferramenta, pelo menor tempo de ação da guia cilíndrica e pela presença da aresta postiça de corte.

A figura 4.15 mostra o comportamento dos erros de circularidade e cilindridade com o aumento do avanço. Ao usinar com avanços menores a qualidade do furo foi melhor, o que era de se esperar. Porém deve-se tomar cuidado ao generalizar, pois o nível de significância estatística dessa variável não foi muito bom, os intervalos de confiança obtidos foram muito grandes e a diferença entre as médias foi muito pequena.

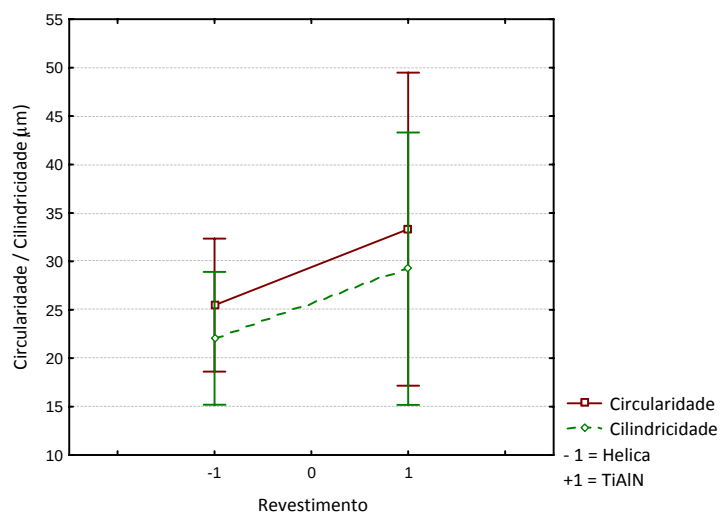


Figura 4.13: Erros de Circularidade e Cilindridade x Revestimento – Segunda Etapa – Ferro Fundido Cinzento

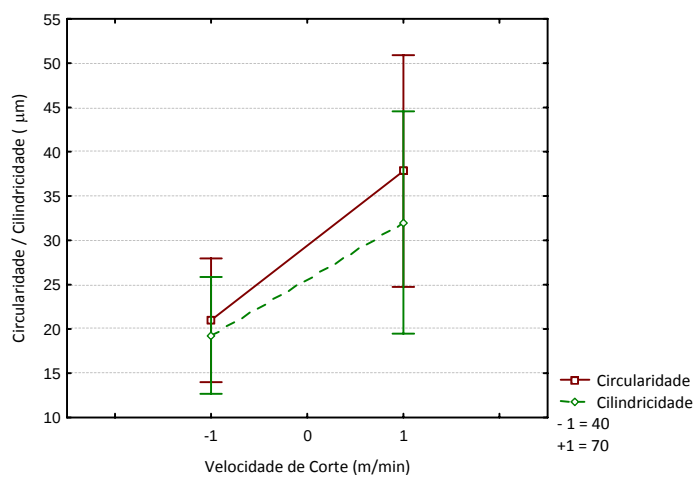


Figura 4.14: Erros de Circularidade e Cilindridade x Velocidade de Corte – Segunda Etapa – Ferro Fundido Cinzento

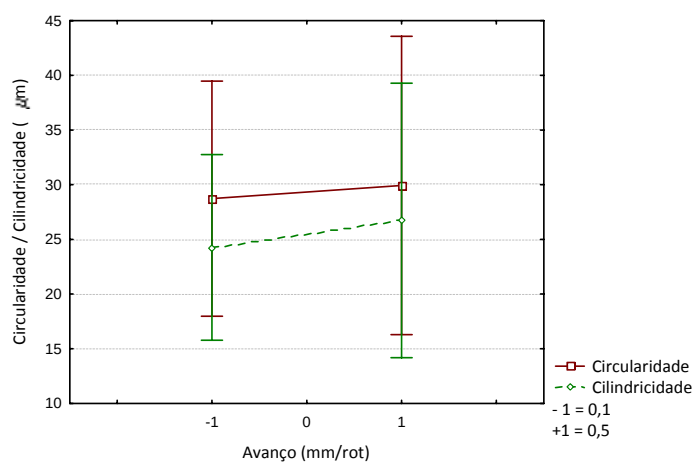


Figura 4.15: Erros de Circularidade e Cilindricidade x Avanço – Segunda Etapa – Ferro Fundido Cinzento

4.1.2.2. Parâmetros de Rugosidade Ra, Rt e Rz

Três parâmetros de rugosidades foram medidos nos testes: Ra, Rz e Rt. Os resultados médios obtidos para esses parâmetros são mostrados na tabela 4.14.

Tabela 4.14: Médias das Rugosidades Ra, Rt e Rz – Segunda Etapa – Ferro Fundido Cinzento

Testes	Rugosidades (μm)		
	Ra	Rt	Rz
1	0,81	8,1	5,5
2	2,31	22,3	13,5
3	1,61	22,5	11,7
4	1,05	10,9	6,5
5	2,07	21,0	12,7
6	1,65	17,2	10,6
7	2,61	38,6	18,5
8	4,58	38,6	21,0
9	2,46	25,4	14,7
10	2,25	25,3	14,2
11	1,72	19,7	10,3
12	1,64	26,1	11,2
13	1,51	13,0	8,9
14	2,08	24,3	12,5
15	1,89	15,0	9,8
16	2,13	20,9	11,5

Ignorando os efeitos de interação das variáveis entre si, obteve-se as tabelas 4.15, 4.16 e 4.17 da ANOVA (Análise de Variância).

Tabela 4.15: ANOVA – Rugosidade Ra – Segunda Etapa – Ferro Fundido Cinzento

	SS	df	MS	F	p
Sobremetal	0,26815	1	0,268151	0,229562	0,642154
Guia Cilíndrica	1,26052	1	1,260520	1,079118	0,323360
Revestimento	0,12198	1	0,121980	0,104426	0,753238
Velocidade de Corte	0,43852	1	0,438520	0,375412	0,553746
Avanço	1,11066	1	1,110661	0,950826	0,352507
Erro	11,68101	10	1,168101		
Total SS	14,62418	15			

Tabela 4.16: ANOVA – Rugosidade Rz – Segunda Etapa – Ferro Fundido Cinzento

	SS	df	MS	F	p
Sobremetal	3,7619	1	3,76191	0,129355	0,726581
Guia Cilíndrica	46,2204	1	46,22041	1,589311	0,236045
Revestimento	0,9717	1	0,97170	0,033412	0,858615
Velocidade de Corte	4,3120	1	4,31203	0,148271	0,708256
Avanço	23,4865	1	23,48645	0,807593	0,389958
Erro	290,8204	10	29,08204		
Total SS	364,8794	15			

Tabela 4.17: ANOVA – Rugosidade Rt – Segunda Etapa – Ferro Fundido Cinzento

	SS	df	MS	F	p
Sobremetal	43,109	1	43,1094	0,338793	0,573414
Guia Cilíndrica	386,331	1	386,3314	3,036144	0,112040
Revestimento	64,854	1	64,8544	0,509685	0,491602
Velocidade de Corte	91,169	1	91,1688	0,716488	0,417094
Avanço	259,246	1	259,2459	2,037390	0,183945
Erro	1272,441	10	127,2441		
Total SS	2040,114	15			

Na análise dos parâmetros de rugosidade, nenhuma variável apresentou influência significativa, o que pode ser comprovado pelos valores de p mostrados nas tabelas, que não foram menores que 0,05 (para uma confiabilidade de 95%). Porém, é interessante observar a tendência do comportamento desses parâmetros, para obter uma análise qualitativa do processo. A partir da análise do gráfico de médias da figura 4.16 pode-se observar que a

tendência das rugosidades é aumentar quando se aumenta o sobremetal, ou seja, quanto mais material é arrancado, pior é a rugosidade da parede obtida.

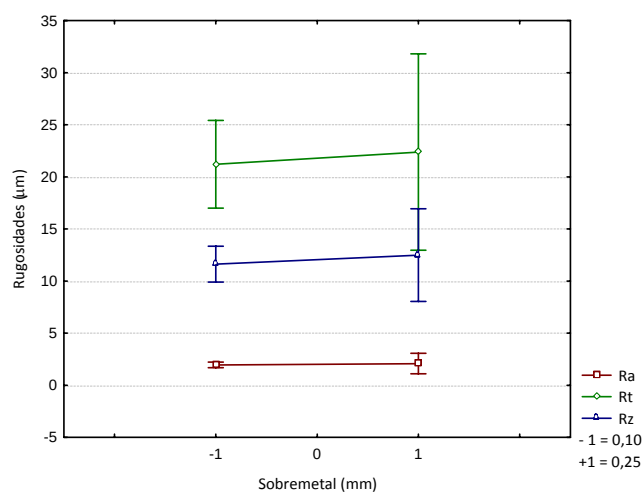


Figura 4.16: Rugosidades x Sobremetal – Segunda Etapa – Ferro Fundido Cinzento

Na figura 4.17 pode-se observar que a guia cilíndrica praticamente não influenciou no parâmetro Ra, mas a qualidade do furo tende a ser melhor quando se usina com guias cilíndricas mais finas. Estes resultados são coincidentes com os da primeira etapa, tendo sido já justificados.

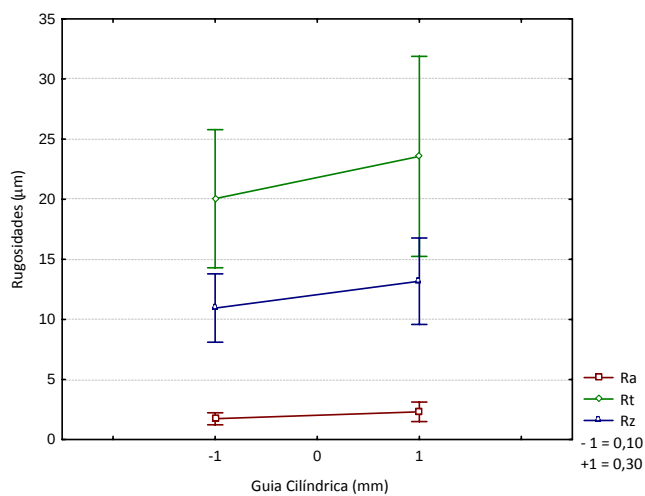


Figura 4.17: Rugosidades x Guia Cilíndrica – Segunda Etapa – Ferro Fundido Cinzento

A figura 4.18 mostra o comportamento dos parâmetros de rugosidades quando se usam revestimentos diferentes nos alargadores. Foi observado que os melhores resultados foram obtidos quando as ferramentas revestidas com Helica® foram usadas, já que as rugosidades obtidas foram menores.

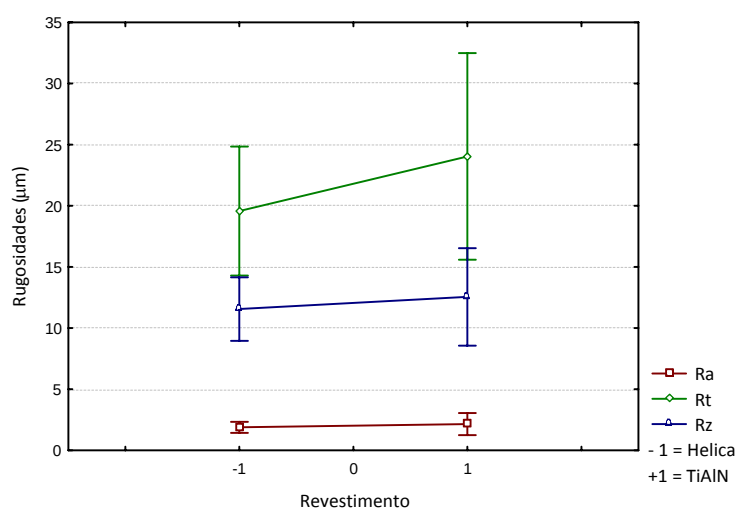


Figura 4.18: Rugosidades x Revestimento – Segunda Etapa – Ferro Fundido Cinzento

A figura 4.19 mostra o comportamento dos parâmetros de rugosidade Ra, Rz e Rt com o aumento da velocidade de corte, que mostrou uma qualidade pior neste caso. Este comportamento se explica pela maior vibração da ferramenta ao alargar com velocidades maiores, pelo menor tempo de ação das guias cilíndricas, e também pela presença da aresta postiça de corte.

Na figura 4.20 tem-se o comportamento das rugosidades Ra, Rz e Rt quando se varia o avanço da ferramenta, comportamento esse que foi idêntico ao observado na primeira etapa do trabalho. A tendência neste caso é diminuir as rugosidades, ou seja, a qualidade do furo obtido é melhor quando se usina com maiores avanços, contrariando a teoria geral da usinagem. Isso se explica pelo fato de que o avanço menor implica em um avanço por dente menor que o raio

de aresta, o que causa um ângulo de saída muito negativo e prejudica a formação do cavaco e, consequentemente, o acabamento superficial, como comentado na primeira etapa.

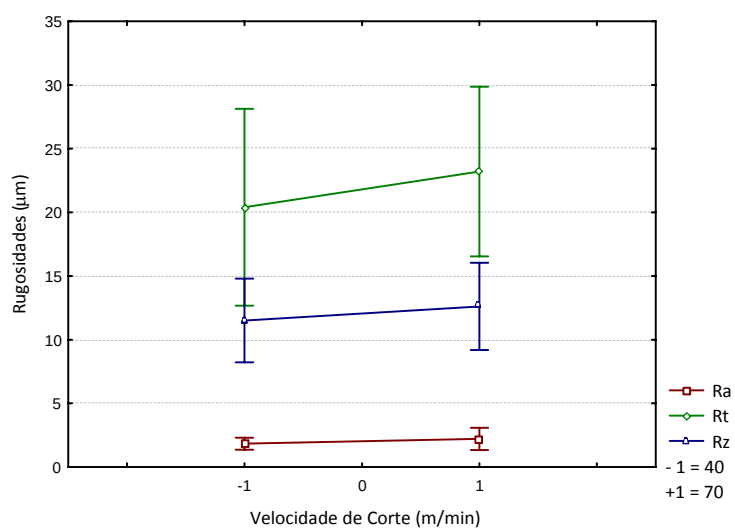


Figura 4.19: Rugosidades x Velocidade de Corte – Segunda Etapa – Ferro Fundido Cinzento

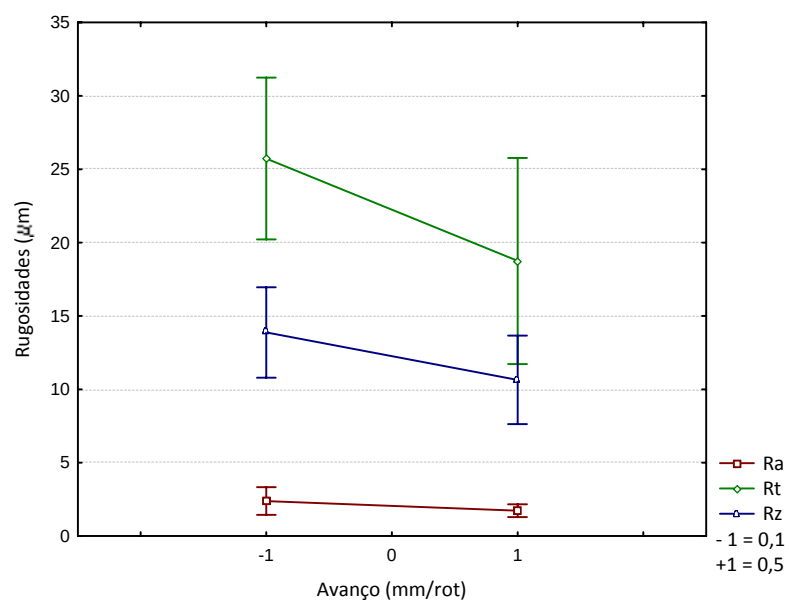


Figura 4.20: Rugosidades x Avanço – Segunda Etapa – Ferro Fundido Cinzento

4.2. FERRO FUNDIDO VERMICULAR

O ferro fundido vermicular apresenta características e propriedades bem diferentes do ferro fundido cinzento, como mostra a tabela 4.17, como maior dureza, maior resistência mecânica e maior ductilidade, devido à morfologia e à distribuição diferenciada da grafita (Mocellin, 2002).

Tabela 4.18: Propriedades mecânicas médias do ferro fundido vermicular, cinzento e nodular (SinterCast, 2001).

Propriedade	Cinzento	Vermicular	Nodular
<i>Resistência à tração (MPa)</i>	235	500	650
<i>Módulo elasticidade (GPa)</i>	110	140	165
<i>Resistência fadiga (MPa)</i>	100	205	265
<i>Condutividade térmica (W/(mK))</i>	48	35	28
<i>Dureza (HB)</i>	200	225	270
<i>Tensão (MPa)</i>	160	380	425

O processo de formação do cavaco, e, conseqüentemente, a usinabilidade, dependem dessas propriedades, por isso alguns parâmetros se comportaram de maneira diferente que a do ferro fundido cinzento durante a usinagem do ferro fundido vermicular, como pode ser visto nos resultados mostrados a seguir.

4.2.1. Primeira Etapa – Comparação dos revestimentos TiAlN x Alcrona®

Na primeira etapa dos testes, foram comparados os resultados colhidos durante a usinagem com ferramentas revestidas por TiAlN e Alcrona®. A tabela 4.19 contém os parâmetros de corte utilizados durante os testes com o ferro fundido cinzento, de acordo com o planejamento fatorial fracionário. Assim como aconteceu na usinagem do ferro fundido cinzento, os parâmetros de corte usados para a primeira etapa dos testes foram os mesmos usados durante segunda etapa.

Tabela 4.19: Parâmetros de corte – Ferro Fundido Vermicular

	<i>Teste</i>	<i>Sobremetal</i>	<i>Guia</i>	<i>Revestimento</i>	<i>Vc</i>	<i>f</i>
Corpo de Prova 1	1	0,5	0,10	Alcrons	40	0,5
	2	0,5	0,10	Alcrons	52	0,1
	3	0,5	0,10	TiAlN	40	0,1
	4	0,5	0,10	TiAlN	52	0,5
	5	0,5	0,30	Alcrons	40	0,1
	6	0,5	0,30	Alcrons	52	0,5
	7	0,5	0,30	TiAlN	40	0,5
	8	0,5	0,30	TiAlN	52	0,1
Corpo de Prova 2	9	0,2	0,10	Alcrons	40	0,1
	10	0,2	0,10	Alcrons	52	0,5
	11	0,2	0,10	TiAlN	40	0,5
	12	0,2	0,10	TiAlN	52	0,5
	13	0,2	0,30	Alcrons	40	0,5
	14	0,2	0,30	Alcrons	52	0,1
	15	0,2	0,30	TiAlN	40	0,1
	16	0,2	0,30	TiAlN	52	0,5

4.2.1.1. Erros de forma - Circularidade e Cilindricidade

Os resultados obtidos para o erro de circularidade durante os testes da primeira etapa com o ferro fundido vermicular estão mostrados na tabela 4.20, e os obtidos para o erro de cilindridade estão mostrados na tabela 4.21. Ao ignorar os efeitos de interação entre as variáveis, obteve-se as análises de variância mostradas nas tabelas 4.22 e 4.23.

Através da análise de variância, foi observado que apenas a guia cilíndrica obteve influência significativa nos erros de circularidade e de cilindridade. Os gráficos mostrados nas figuras 4.21 a 4.25 mostram as tendências do comportamento das médias obtidas para cada variável e os respectivos intervalos de confiança.

Tabela 4.20: Resultados dos Erros de Circularidade – Primeira Etapa – Ferro Fundido Vermicular

ERRO DE CIRCULARIDADE (μm)									
Furos:									
	1			2			3		
	Planos de medição:								
	1	2	3	1	2	3	1	2	3
Teste 1	8,57	6,45	4,81	6,71	5,94	5,24	5,29	5,75	5,02
Teste 2	10,05	9,33	10,50	8,44	8,61	9,10	9,95	7,76	10,10
Teste 3	6,43	7,13	7,24	5,82	5,63	7,26	6,67	7,87	5,94
Teste 4	7,03	7,21	6,66	13,30	9,12	12,41	11,52	14,31	13,64
Teste 5	13,37	12,83	13,32	14,20	10,57	14,20	13,36	14,09	12,71
Teste 6	14,29	12,06	14,95	16,96	16,37	24,04	12,06	13,33	19,16
Teste 7	6,73	10,18	9,35	11,36	8,14	8,78	6,16	7,78	7,43
Teste 8	4,66	6,89	4,45	4,23	5,94	5,51	4,68	5,90	6,20
Teste 9	9,55	12,90	10,44	11,14	10,51	9,84	5,32	7,07	7,53
Teste 10	7,84	8,62	5,74	9,01	7,89	7,14	9,10	10,34	8,31
Teste 11	5,38	6,62	6,64	8,14	7,46	9,00	5,69	6,02	5,44
Teste 12	7,81	5,38	6,79	9,25	7,27	5,80	9,59	8,69	6,75
Teste 13	10,39	11,94	9,54	8,71	10,26	13,03	19,25	17,39	19,23
Teste 14	15,25	16,57	19,98	13,02	17,83	19,56	8,30	11,58	15,82
Teste 15	19,92	19,55	10,97	12,89	8,50	8,11	11,36	9,07	7,40
Teste 16	16,03	15,81	19,25	6,69	7,84	8,81	10,12	11,93	14,47

Tabela 4.21: Resultados do Erro de Cilindricidade – Primeira Etapa – Ferro Fundido Vermicular

Erro de Cilindricidade (μm)			
Testes	1	2	3
1	8,57	7,50	6,32
2	13,29	13,01	10,10
3	7,24	7,28	8,94
4	7,21	13,30	15,15
5	14,18	14,20	14,10
6	14,95	24,05	19,18
7	10,18	11,36	8,75
8	8,87	5,95	6,20
9	12,90	11,14	8,20
10	10,44	12,29	10,34
11	6,65	9,00	6,02
12	7,82	9,25	11,31
13	11,94	13,04	19,25
14	19,98	19,56	15,82
15	19,92	12,96	11,43
16	19,26	8,84	14,49

Tabela 4.22: ANOVA – Erro de Circularidade – Primeira Etapa – Ferro Fundido Vermicular

	SS	df	MS	F	p
Sobremetal	31,5271	1	31,52715	2,205872	0,168313
Guia Cilíndrica	81,2995	1	81,29945	5,688311	0,038283
Revestimento	11,5534	1	11,55339	0,808360	0,389742
Velocidade de Corte	1,0992	1	1,09923	0,076910	0,787178
Avanço	9,5483	1	9,54831	0,668070	0,432767
Erro	142,9237	10	14,29237		
Total SS	285,3926	15			

Tabela 4.23: ANOVA – Erro de Cilindricidade – Primeira Etapa – Ferro Fundido Vermicular

	SS	df	MS	F	p
Sobremetal	45,1672	1	45,1672	4,84801	0,052280
Guia Cilíndrica	110,8551	1	110,8551	11,89860	0,006232
Revestimento	16,5510	1	16,5510	1,77650	0,212150
Velocidade de Corte	10,2741	1	10,2741	1,10277	0,318375
Avanço	26,6730	1	26,6730	2,86294	0,121515
Erro	93,1665	10	9,3167		
Total SS	313,9289	15			

A partir da análise do gráfico da figura 4.21 pode-se observar que os erros de circularidade e cilindricidade são menores quanto menor for o sobremetal, ou seja, quanto maior o diâmetro do pré-furo. Esta tendência é oposta a que ocorreu com o ferro fundido cinzento (ver figura 4.1). Por ser um material um pouco mais dútil, o processo de nucleação e propagação de trincas é mais controlado no ferro fundido vermicular, que não possui lamelas, mas vermículos de grafita para direcionar as trincas. Desta forma, o processo de deformação plástica é relativamente mais dominante que no ferro fundido cinzento, alterando as regras de controle de qualidade dos furos. Aqui, os melhores resultados dos erros de circularidade e de cilindricidade para os menores sobremetals explicam-se porque a ferramenta vai retirar menos material da parede e o processo gastará menos energia durante a usinagem, o que torna melhor a qualidade do furo.

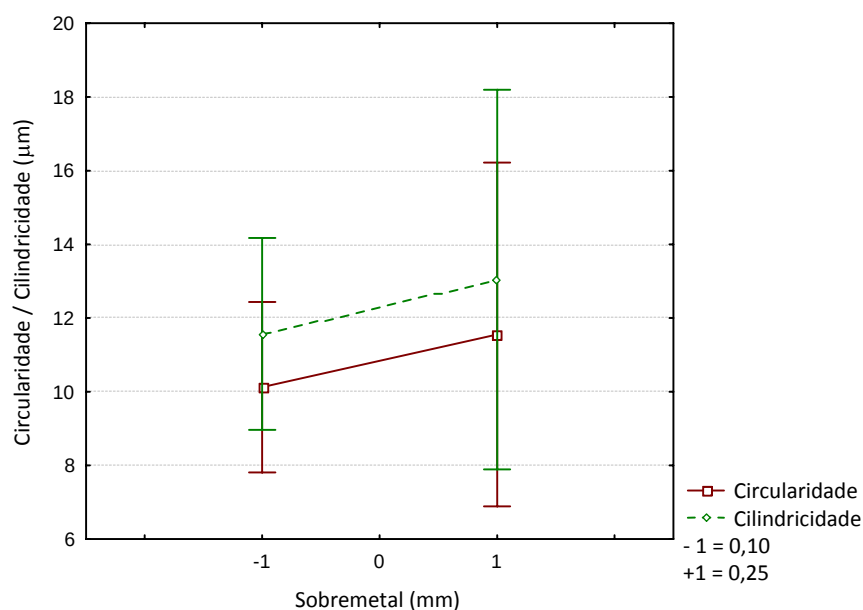


Figura 4.21: Erros de Circularidade e Cilindricidade x Sobremetal – Primeira Etapa – Ferro Fundido Vermicular

O resultado obtido a partir da guia cilíndrica era esperado, pois quanto menor a largura da mesma, melhor será a qualidade da parede obtida, como mostrado no gráfico da figura 4.22. Isso se explica pelo menor atrito que será gerado no processo, já que a guia serve como superfície alisadora e seu contato com a parede do furo gera muito atrito. O atrito aumenta a temperatura e como consequência altera a qualidade da superfície gerada. Estes resultados são opostos aos encontrados na usinagem do ferro fundido cinzento, onde a maior guia cilíndrica promoveu um melhor trabalho de alisamento e ajuste dimensional no material mais frágil.

O revestimento que produziu melhores valores de circularidade foi a Alcrona® (AlCrN), como mostrado na figura 4.23. Como os erros de circularidade e cilindridade dependem das condições de formação do cavaco, o revestimento das ferramentas torna-se muito importante neste processo, já que ele altera a morfologia da aresta postiça de corte, presente nas condições de corte testadas. Este resultado também foi diferente do encontrado na usinagem do ferro fundido cinzento, onde as ferramentas revestidas por TiAlN produziram furos com melhor qualidade. Apesar disso, deve-se atentar para o fato desta análise ser apenas qualitativa, pois esta variável não teve um nível de significância influente nos resultados, como se pode

observar pela pequena diferença entre as médias e pelos grandes intervalos de confiança gerados.

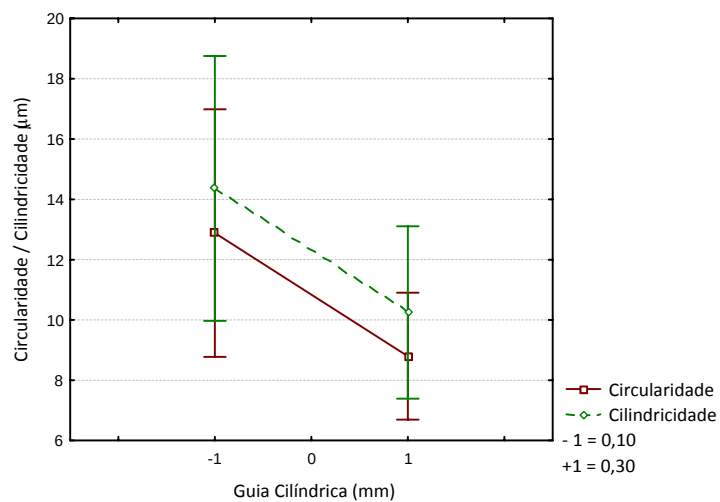


Figura 4.22: Erros de Circularidade e Cilindricidade x Guia Cilíndrica – Primeira Etapa – Ferro

Fundido Vermicular

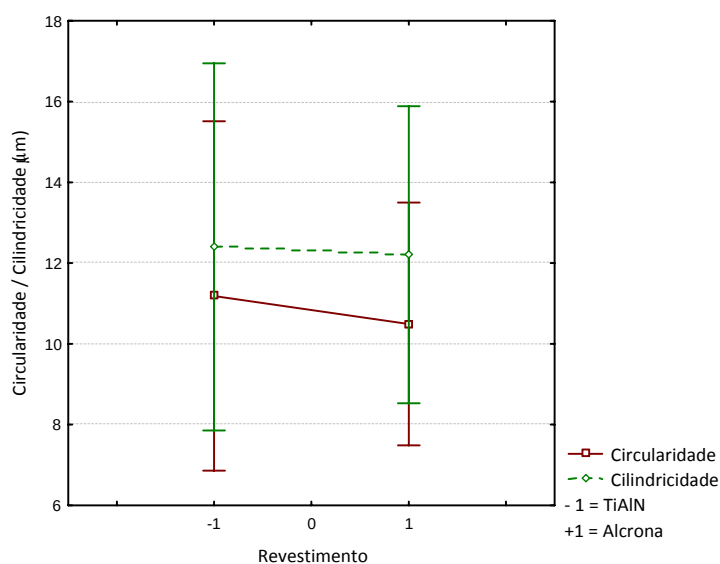


Figura 4.23: Erros de Circularidade e Cilindricidade x Revestimento – Primeira Etapa – Ferro

Fundido Vermicular

A velocidade de corte não foi um parâmetro tão significativo nesta etapa da análise com o ferro fundido vermicular quanto foi para o ferro fundido cinzento. A figura 4.24 mostra que a tendência de comportamento dos erros de circularidade e cilindridade é aumentar com o aumento da velocidade de corte, assim como ocorreu para o ferro fundido cinzento. O aumento da velocidade pode realçar o efeito do batimento da ferramenta, comprometendo a rigidez do sistema e alterar as dimensões e estabilidade da APC (aresta postiça de corte) e, conseqüentemente alterar a qualidade do furo usinado.

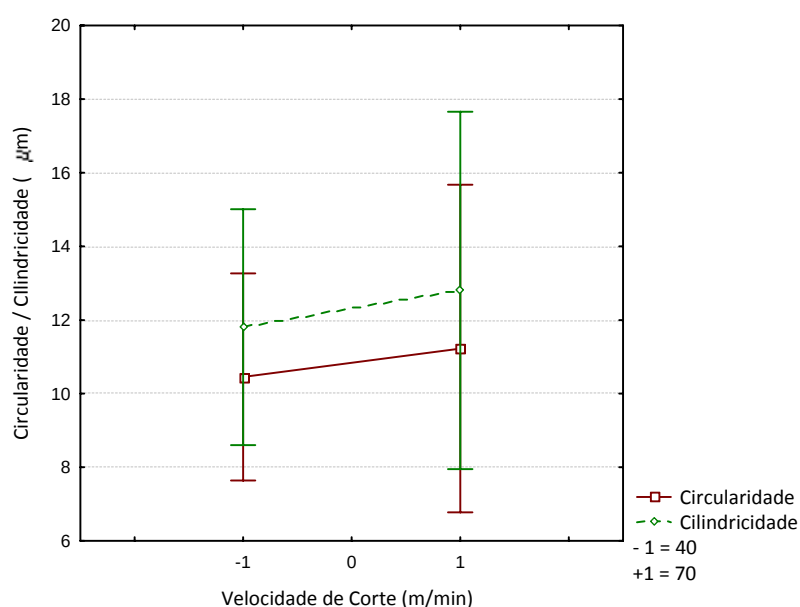


Figura 4.24: Erros de Circularidade e Cilindridade x Velocidade de Corte – Primeira Etapa – Ferro Fundido Vermicular

O avanço teve um comportamento parecido com o observado na usinagem do ferro fundido cinzento: quanto menor o avanço, pior a qualidade do furo, como mostrado no gráfico da figura 4.25. Isso acontece porque o nível inferior de avanço utilizado infere um avanço por dente no alargador de oito facas muito pequeno, a ponto de ser inferior ao raio de aresta, tornando o corte com ângulo de saída muito negativo, prejudicando a qualidade do furo.

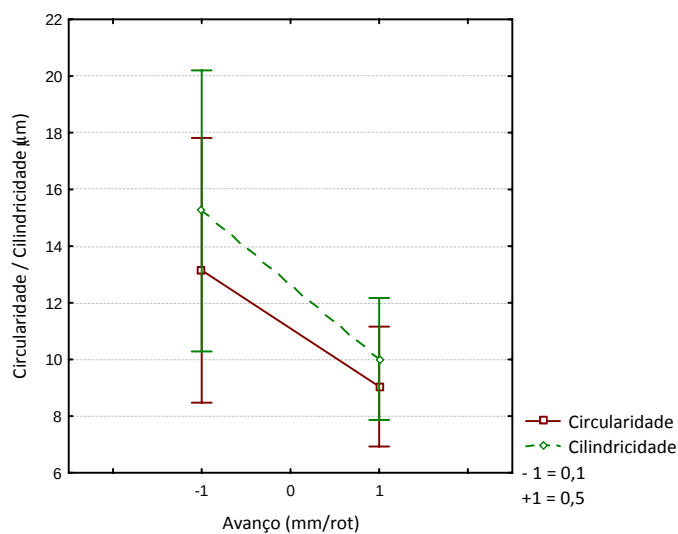


Figura 4.25: Erros de Circularidade e Cilindricidade x Avanço – Primeira Etapa – Ferro Fundido Vermicular

4.2.1.2. Parâmetros de Rugosidade Ra e Rz

No ferro fundido vermicular apenas os parâmetros Ra e Rz foram considerados. Os resultados são mostrados na tabela 4.24.

Tabela 4.24: Resultados das Rugosidades Ra e Rz – Primeira Etapa – Ferro Fundido Vermicular

Rugosidades Ra e Rz (μm)		
Testes	Ra	Rz
1	1,04	7,0
2	1,77	10,6
3	1,07	6,4
4	1,45	9,3
5	1,50	9,4
6	3,59	21,5
7	4,70	25,0
8	1,27	8,1
9	0,75	5,1
10	1,13	6,3
11	1,33	10,6
12	0,97	7,7
13	2,38	15,3
14	1,08	5,4
15	1,04	5,9
16	4,08	27,4

Nas tabelas 4.25 e 4.26 se encontram os resultados das análises de variância feitas para os parâmetros Ra e Rz, respectivamente.

Tabela 4.25: ANOVA – Rugosidade Ra – Primeira Etapa – Ferro Fundido Vermicular

	SS	df	MS	F	p
Sobremetal	3,01029	1	3,010292	4,98492	0,049615
Guia Cilíndrica	5,52171	1	5,521705	9,14372	0,012811
Revestimento	0,02507	1	0,025067	0,04151	0,842644
Velocidade de Corte	0,01671	1	0,016705	0,02766	0,871218
Avanço	7,63201	1	7,632007	12,63830	0,005224
Erro	6,03879	10	0,603879		
Total SS	19,92310	15			

Tabela 4.26: ANOVA – Rugosidade Rz – Primeira Etapa – Ferro Fundido Vermicular

	SS	df	MS	F	p
Sobremetal	34,2200	1	34,2200	1,91620	0,196386
Guia Cilíndrica	117,8859	1	117,8859	6,60120	0,027925
Revestimento	1,3024	1	1,3024	0,07293	0,792611
Velocidade de Corte	4,5490	1	4,5490	0,25473	0,624699
Avanço	259,9800	1	259,9800	14,55798	0,003399
Erro	178,5825	10	17,8582		
Total SS	559,9500	15			

Como mostrado nas tabelas da Anova, as variáveis que influenciaram significativamente nos resultados do parâmetro de rugosidade Ra foram o sobremetal, a guia cilíndrica e o avanço, sendo que o parâmetro Rz foi influenciado significativamente pela guia cilíndrica e pelo avanço apenas. A figura 4.26 mostra que as médias dos parâmetros de rugosidade foram menores quando se usinou com sobremetal maior, ou seja, com o diâmetro inicial dos furos menor. O maior sobremetal para o ferro fundido vermicular aparenta prover uma melhor cunha de corte e, portanto, um corte mais suave, com melhor acabamento da superfície do furo.

A guia cilíndrica teve uma influência menor no parâmetro de rugosidade Ra do que no parâmetro Rz, como pode ser observado na figura 4.27. Esses dois parâmetros foram menores quando se usinou com guias cilíndricas mais finas, o que pode ser explicado pelo menor contato que a ferramenta teve com a superfície gerada, diminuindo assim o atrito e produzindo

superfícies com melhor qualidade. Estes resultados são idênticos aos encontrados na usinagem do ferro fundido cinzento.

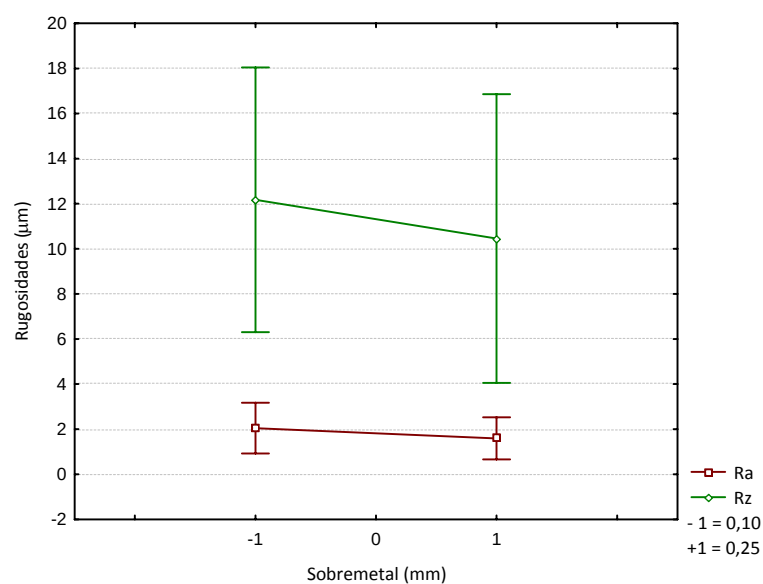


Figura 4.26: Rugosidades x Sobremetal – Primeira Etapa – Ferro Fundido Vermicular

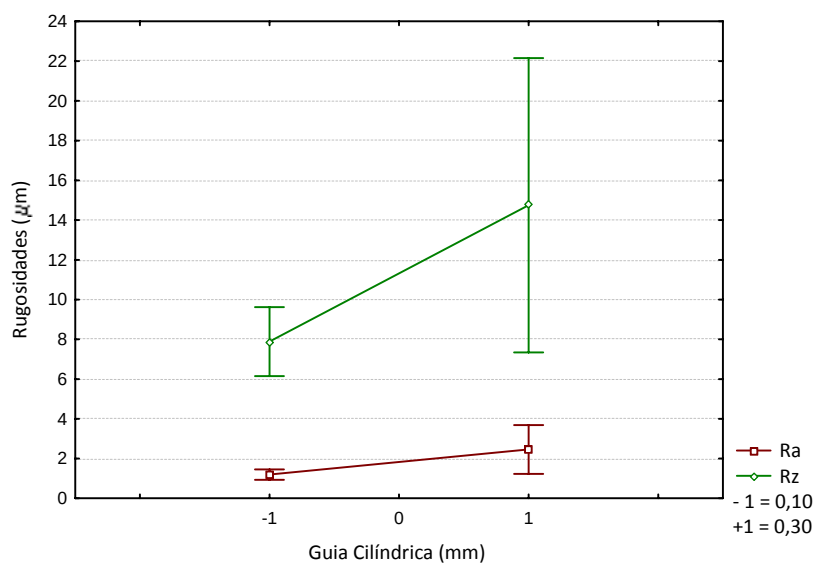


Figura 4.27: Rugosidades x Guia Cilíndrica – Primeira Etapa – Ferro Fundido Vermicular

O revestimento que proporcionou melhores acabamentos foi o TiAlN, como mostra a figura 4.28, mas isso não pode ser generalizado, pois a confiabilidade estatística foi baixa. O gráfico mostra apenas a tendência do comportamento das variáveis.

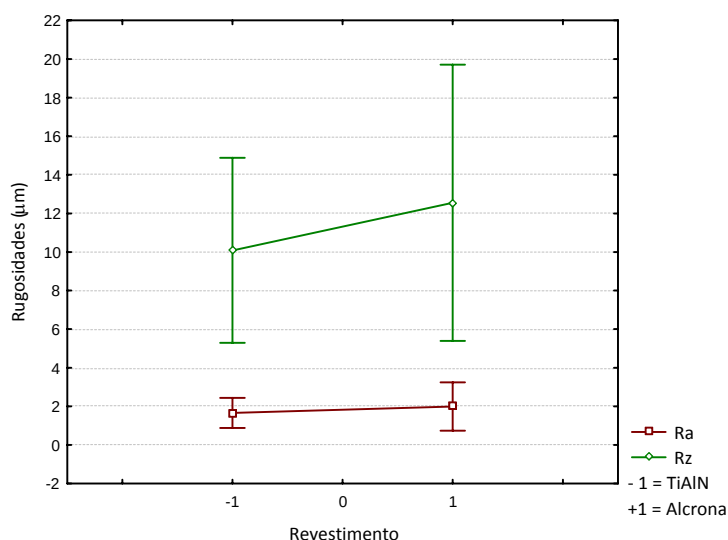


Figura 4.28: Rugosidades x Revestimento – Primeira Etapa – Ferro Fundido Vermicular

A velocidade de corte, como mostra o gráfico da figura 4.29, não obteve influência estatística considerável nos resultados, devido aos grandes intervalos de confiança e à pequena diferença entre as médias observadas. Apesar disso, a tendência é obter superfícies menos rugosas quando usinando com velocidades de corte menores. Isso se deve ao efeito do batimento da ferramenta, que é realçado pela alta velocidade, e à presença de aresta postiça de corte. Também se deve ao menor tempo de ação das guias cilíndricas devido à maior rotação da ferramenta. Estes resultados também são idênticos aos observados ao usar o ferro fundido cinzento.

Ao usinar com maiores avanços, percebeu-se que a qualidade do furo piorou, o que pode ser visto no gráfico da figura 4.30. Ao contrário do que aconteceu com o ferro fundido cinzento (ver figura 4.10), o efeito do avanço diminuto, no seu nível mais baixo, não comprometeu o acabamento da superfície usinada de ferro fundido vermicular (apesar de ter comprometido os erros de forma).

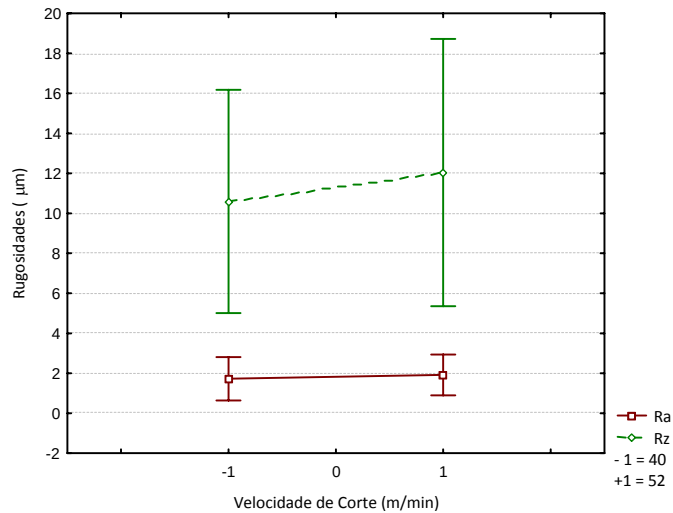


Figura 4.29: Rugosidades x Velocidade de Corte – Primeira Etapa – Ferro Fundido Vermicular

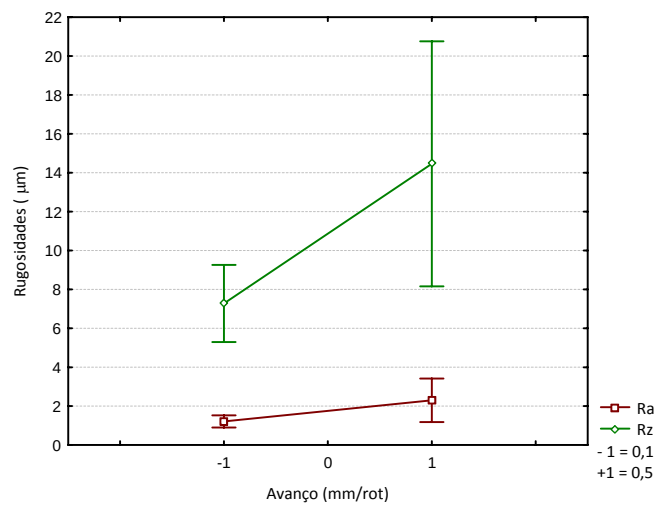


Figura 4.30: Rugosidades x Avanço – Primeira Etapa – Ferro Fundido Vermicular

4.2.2. Segunda Etapa – Comparação dos revestimentos Alcrona® x Helica®

Na segunda etapa foram realizados testes usando-se ferramentas revestidas com Alcrona® e Helica®, para comparar o desempenho desses dois revestimentos. O Alcrona® foi utilizado na comparação porque, apesar de o revestimento não ter se mostrado influente no nível de confiança adotado (95%), ele proporcionou melhores resultados dos erros de forma, e

praticamente nenhuma influência nos parâmetros de rugosidade, considerando-se as tendências médias.

4.2.2.1. Erros de forma - Circularidade e Cilindricidade

Os resultados dos erros de circularidade para os testes da segunda etapa estão mostrados na tabela 4.27, e os resultados dos erros de cilindridade estão mostrados na tabela 4.28.

Foi possível observar que nenhuma variável influenciou significativamente nos resultados dos erros de forma, como mostram as tabelas de análise de variância 4.29 e 4.30, dos erros de circularidade e cilindridade, respectivamente. Apesar disso, é interessante analisar qualitativamente como cada variável tende a alterar esses erros de forma.

Tabela 4.27: Resultados dos Erros de Circularidade – Segunda Etapa – Ferro Fundido Vermicular

Erro de Circularidade (μm)									
Furos									
1			2			3			
Planos de Medição									
Testes	1	2	3	1	2	3	1	2	3
1	8,57	6,45	4,81	6,71	5,94	5,24	5,29	5,75	5,02
2	10,05	9,33	10,50	8,44	8,61	9,10	9,95	7,76	10,10
3	5,09	5,88	6,36	10,92	10,85	8,84	19,27	21,24	21,24
4	7,13	8,59	9,00	7,75	7,83	8,45	10,59	10,59	9,81
5	13,37	12,83	13,32	14,20	10,57	14,20	13,36	14,09	12,71
6	14,29	12,06	14,95	16,96	16,37	24,04	12,06	13,33	19,16
7	14,08	14,07	12,74	14,99	18,15	15,52	15,39	12,20	10,34
8	42,98	42,28	44,36	18,34	17,03	17,78	34,52	33,06	23,52
9	9,55	12,90	10,44	11,14	10,51	9,84	5,32	7,07	7,53
10	7,84	8,62	5,74	9,01	7,89	7,14	9,10	10,34	8,31
11	7,14	7,51	6,16	8,80	10,26	10,45	9,03	7,27	9,24
12	8,12	9,37	9,45	8,90	8,30	8,35	9,44	8,91	9,51
13	10,39	11,94	9,54	8,71	10,26	13,03	19,25	17,39	19,23
14	15,25	16,57	19,98	13,02	17,83	19,56	8,30	11,58	15,82
15	8,30	10,42	11,43	8,95	10,10	8,59	7,74	7,77	8,85
16	5,98	7,89	7,89	9,41	9,26	8,71	7,14	6,68	6,74

Tabela 4.28: Resultados dos Erros de Cilindricidade – Segunda Etapa – Ferro Fundido

Vermicular

Erro de Cilindricidade (μm)			
Testes	1	2	3
1	8,57	7,50	6,32
2	13,29	13,01	10,10
3	6,36	10,92	21,25
4	9,52	8,45	10,59
5	14,18	14,20	14,10
6	14,95	24,05	19,18
7	14,12	19,00	15,39
8	48,40	18,35	34,53
9	12,90	11,14	8,20
10	10,44	12,29	10,34
11	8,12	10,45	9,28
12	9,49	9,08	9,53
13	11,94	13,04	19,25
14	19,98	19,56	15,82
15	11,43	10,44	8,85
16	7,97	9,46	7,19

Tabela 4.29: ANOVA – Erro de Circularidade – Segunda Etapa – Ferro Fundido Vermicular

	SS	df	MS	F	p
Sobremetal	88,537	1	88,5370	1,347986	0,272595
Guia Cilíndrica	193,527	1	193,5275	2,946481	0,116823
Revestimento	13,001	1	13,0015	0,197949	0,665857
Velocidade de Corte	99,244	1	99,2438	1,510999	0,247126
Avanço	93,473	1	93,4732	1,423141	0,260423
Erro	656,809	10	65,6809		
Total SS	1182,371	15			

Tabela 4.30: ANOVA – Erro de Cilindricidade – Segunda Etapa – Ferro Fundido Vermicular

	SS	df	MS	F	p
Sobremetal	54,868	1	54,8684	0,715779	0,417317
Guia Cilíndrica	199,954	1	199,9537	2,608474	0,137368
Revestimento	16,531	1	16,5312	0,215656	0,652316
Velocidade de Corte	176,967	1	176,9673	2,308607	0,159624
Avanço	193,326	1	193,3261	2,522014	0,143351
Erro	766,554	10	76,6554		
Total SS	1444,164	15			

Os gráficos das figuras 4.31 a 4.35 mostram o comportamento das médias obtidas para cada variável e os respectivos intervalos de confiança. A partir da análise do gráfico da figura 4.31 pode-se concluir que o erro de circularidade é menor quanto maior for o sobremetal, ou seja, quanto menor o diâmetro do pré-furo. Estes resultados são opostos aos encontrados na primeira etapa (ver figura 4.21), mostrando que o revestimento tem influência relativamente relevante no processo.

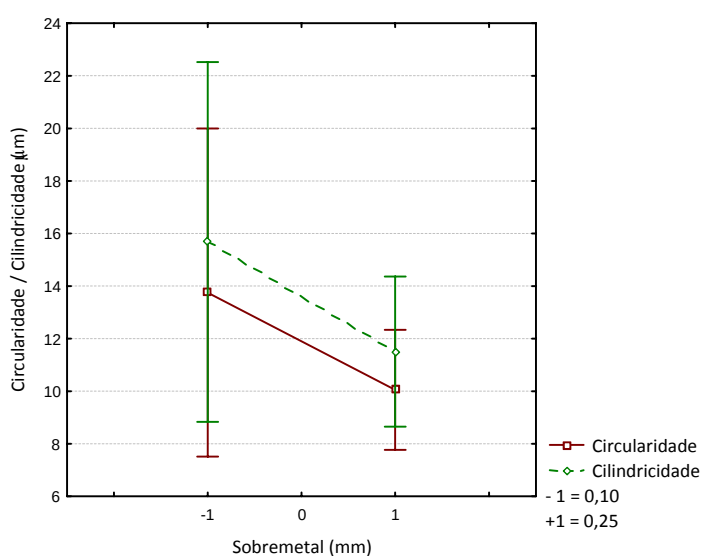


Figura 4.31: Erros de Circularidade e Cilindricidade x Sobremetal – Segunda Etapa – Ferro Fundido Vermicular

O resultado obtido a partir da guia cilíndrica era esperado, pois quanto menor a largura da mesma, melhor será a qualidade da parede obtida, como mostrado no gráfico da figura 4.32. Isso se explica pelo menor atrito que será gerado no processo, já que a guia serve como superfície alisadora e seu contato com a parede do furo gera muito atrito, piorando a qualidade da superfície gerada.

A Alcrona® (AlCrN) produziu melhores valores de erro de circularidade e de cilindridade do que a Helica® (AlCr), como mostrado na figura 4.33, apesar dos grandes intervalos de confiança e pequena diferença entre as médias. Isso acontece porque possivelmente este revestimento proporciona menores forças de usinagem e altera a morfologia da aresta postiça

de corte favoravelmente, fatores esses que interferem na formação do cavaco e na qualidade dos furos gerados.

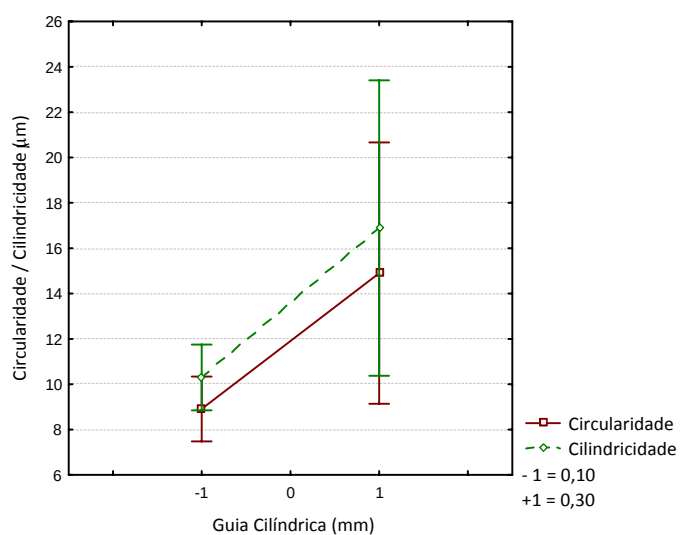


Figura 4.32: Erros de Circularidade e Cilindricidade x Guia Cilíndrica – Segunda Etapa – Ferro Fundido Vermicular

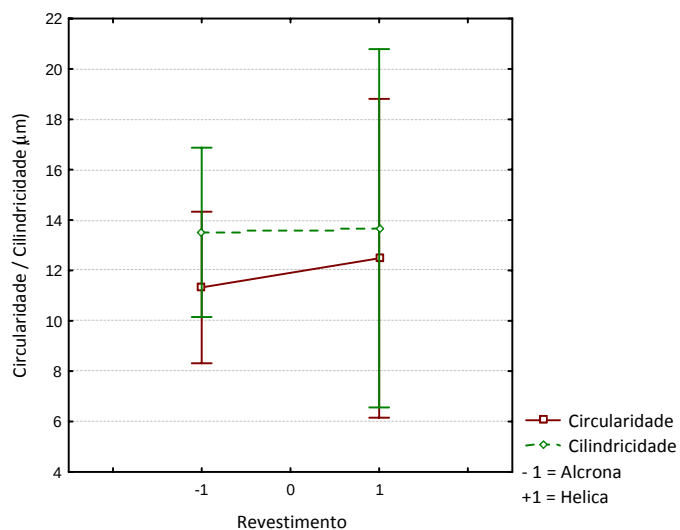


Figura 4.33: Erros de Circularidade e Cilindricidade x Revestimento – Segunda Etapa – Ferro Fundido Vermicular

A velocidade de corte menor produziu menores valores dos erros de circularidade e de cilindridade, mas também não foi um parâmetro significativo estatisticamente, como pode ser visto no gráfico da figura 4.34. Nas condições testadas, a aresta postiça de corte estava presente e fez com que os erros de forma fossem maiores quando a velocidade de corte era maior. Além disso, o efeito do batimento da ferramenta também pode ter sido realçado nas velocidades maiores, o que ajuda a piorar a qualidade dos furos.

O avanço teve um comportamento parecido com o observado na usinagem do ferro fundido cinzento: quanto menor o avanço, pior a qualidade do furo, como mostrado no gráfico da figura 4.35. O avanço de 0,1 mm/rot implica em um avanço por dente muito pequeno, causando um ângulo de saída negativo e prejudicando o acabamento da superfície.

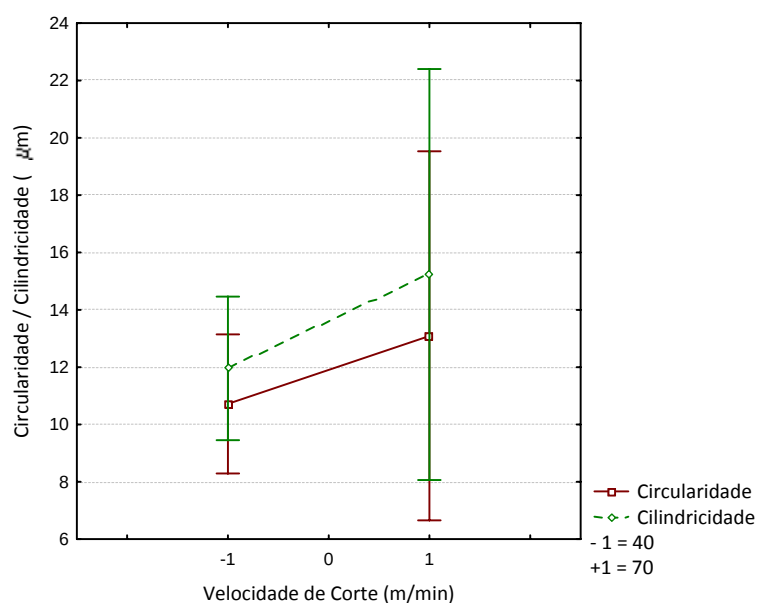


Figura 4.34: Erros de Circularidade e Cilindridade x Velocidade de Corte – Segunda Etapa – Ferro Fundido Vermicular

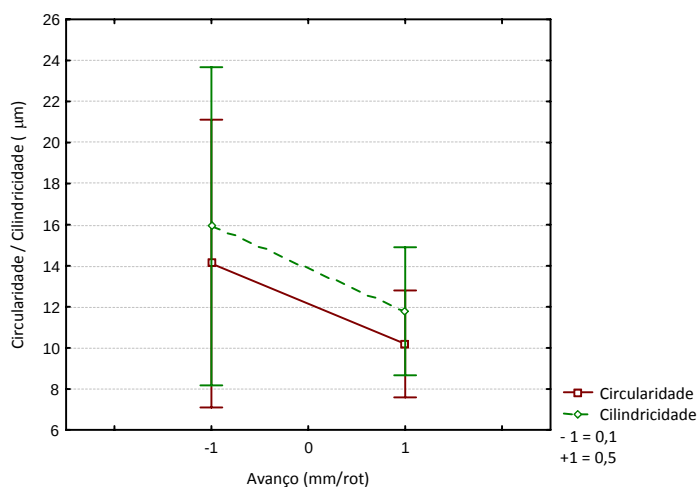


Figura 4.35: Erros de Circularidade e Cilindricidade x Avanço – Segunda Etapa – Ferro Fundido Vermicular

4.2.2.2. Parâmetros de Rugosidade Ra e Rz

Dois parâmetros de rugosidade foram medidas nos testes da segunda etapa com o ferro fundido vermicular: Ra e Rz. Os resultados obtidos para a rugosidade Ra são mostrados na tabela 4.31.

Tabela 4.31: Médias das Rugosidades Ra e Rz – Segunda Etapa – Ferro Fundido Vermicular

Rugosidades (μm)		
Testes	Ra	Rz
1	1,04	7,0
2	1,77	10,6
3	1,15	7,2
4	1,49	9,9
5	1,50	9,4
6	3,59	21,5
7	4,70	25,0
8	1,27	8,1
9	0,75	5,1
10	1,13	6,3
11	1,23	9,5
12	1,01	7,1
13	2,38	15,3
14	1,08	5,4
15	1,04	5,9
16	4,08	27,4

Ignorando os efeitos de interação das variáveis entre si, obtiveram-se as tabelas 4.32 e 4.33 da ANOVA (Análise de Variância) das duas rugosidades, onde se pode ver que duas variáveis tiveram influência significativa nos resultados: a guia cilíndrica e o avanço da ferramenta.

Tabela 4.32: ANOVA – Rugosidade Ra – Segunda Etapa – Ferro Fundido Vermicular

	SS	df	MS	F	p
Sobremetal	1,60300	1	1,602997	1,998528	0,187819
Guia Cilíndrica	7,95043	1	7,950434	9,912162	0,010362
Revestimento	0,12501	1	0,125012	0,155858	0,701288
Velocidade de Corte	0,00681	1	0,006810	0,008491	0,928403
Avanço	6,30031	1	6,300312	7,854881	0,018709
Erro	8,02089	10	0,802089		
Total SS	22,19236	15			

Tabela 4.33: ANOVA – Rugosidade Rz – Segunda Etapa – Ferro Fundido Vermicular

	SS	df	MS	F	p
Sobremetal	38,1549	1	38,1549	1,348126	0,272572
Guia Cilíndrica	247,4231	1	247,4231	8,742185	0,014369
Revestimento	7,7327	1	7,7327	0,273218	0,612564
Velocidade de Corte	0,8954	1	0,8954	0,031637	0,862378
Avanço	242,9166	1	242,9166	8,582959	0,015049
Erro	283,0220	10	28,3022		
Total SS	767,2011	15			

A partir da análise do gráfico de médias da figura 4.36 pode-se observar que a rugosidade diminui quando se aumenta o sobremetal, ou seja, quanto mais material é arrancado, melhor é a rugosidade da parede obtida. Estes resultados são semelhantes aos obtidos na primeira etapa da usinagem do ferro fundido vermicular.

A figura 4.37 mostra as médias das rugosidades Ra e Rz, que aumentaram quando se usaram guias cilíndricas maiores; essa variável apresentou influência significativa nos resultados. O motivo desse comportamento é que a guia cilíndrica, por ser uma superfície alisadora, entra em contato com a superfície gerada; quando ela é maior, o atrito entre as

superfícies também é maior, e o calor gerado neste processo faz piorar a qualidade superficial da peça produzida.

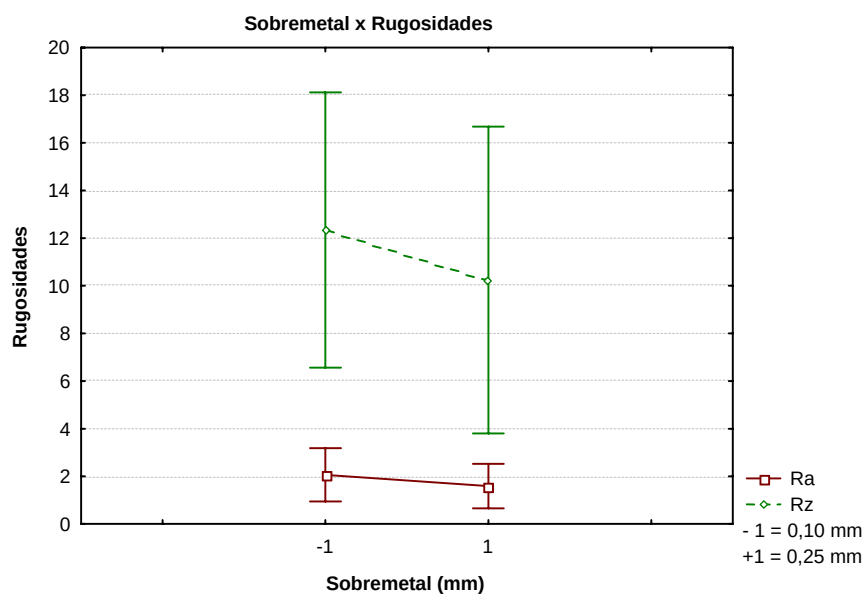


Figura 4.36: Rugosidades x Sobremetal – Segunda Etapa – Ferro Fundido Vermicular

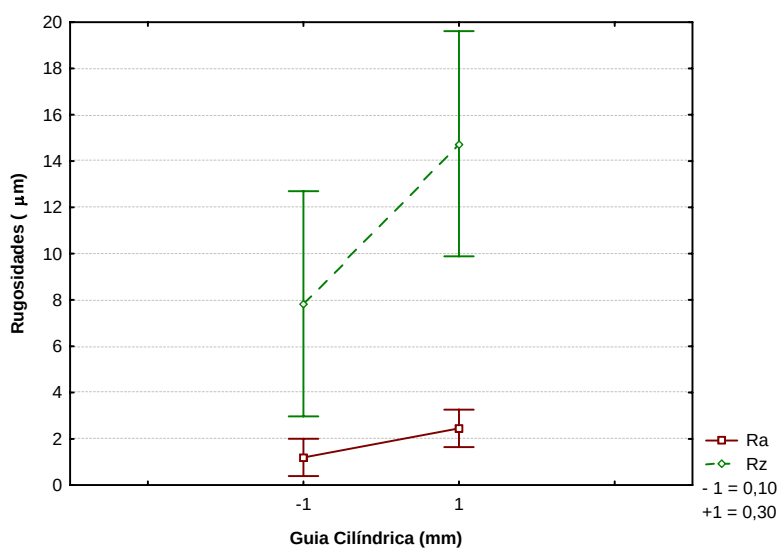


Figura 4.37: Rugosidades x Guia Cilíndrica – Segunda Etapa – Ferro Fundido Vermicular

Na figura 4.38 pode-se visualizar o comportamento das rugosidades Ra e Rz quando são usados revestimentos diferentes nos alargadores. Aqui se verifica que os alargadores revestidos com Alcrona® (AlCrN) proporcionam menores rugosidades do que os alargadores revestidos com Helica® (AlCr), apesar dos grandes intervalos de confiança. Da mesma forma como aconteceu com os erros de circularidade e cilindridade, o revestimento ajudou a alterar a morfologia da aresta postiça de corte, além de alterar também o processo de formação do cavaco, já que diminui as forças de usinagem.

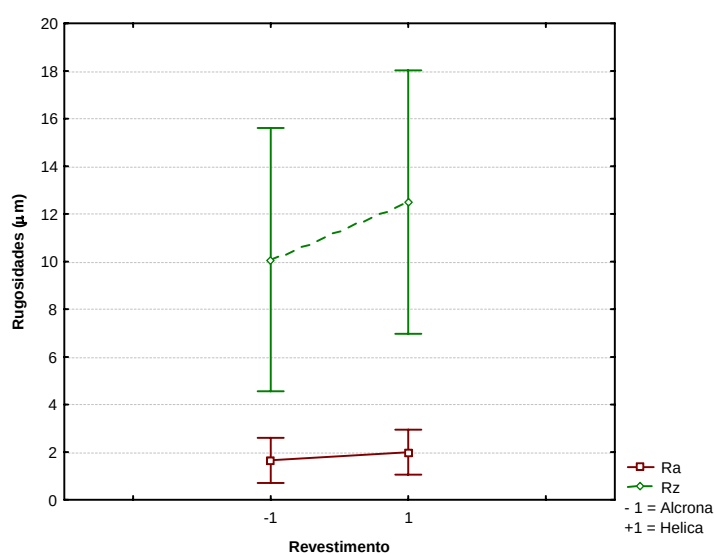


Figura 4.38: Rugosidades x Revestimento – Segunda Etapa – Ferro Fundido Vermicular

Com o aumento das velocidades de corte, as rugosidades se tornaram maiores, como se pode ver na figura 4.39. Este comportamento se explica pela vibração da ferramenta ao alargar com velocidades maiores: quanto maior a velocidade, maior é o efeito do batimento da ferramenta, o que prejudica a qualidade superficial dos furos. Além disso, na faixa de velocidades testada, a aresta postiça de corte se fez presente, e alterou para pior a qualidade dos furos alargados.

Na figura 4.40 a seguir tem-se o comportamento das rugosidades Ra e Rz quando se varia o avanço da ferramenta de 0,1 para 0,5 mm/rotação. O avanço, assim como a guia cilíndrica, foi uma variável significativa na análise estatística. Aqui as rugosidades eram menores

quando o avanço era menor também. Se, por um lado o maior avanço gera forças maiores, por outro lado ele diminui o tempo de corte e a ação alisadora das guias cilíndricas, promovendo um acabamento pior.

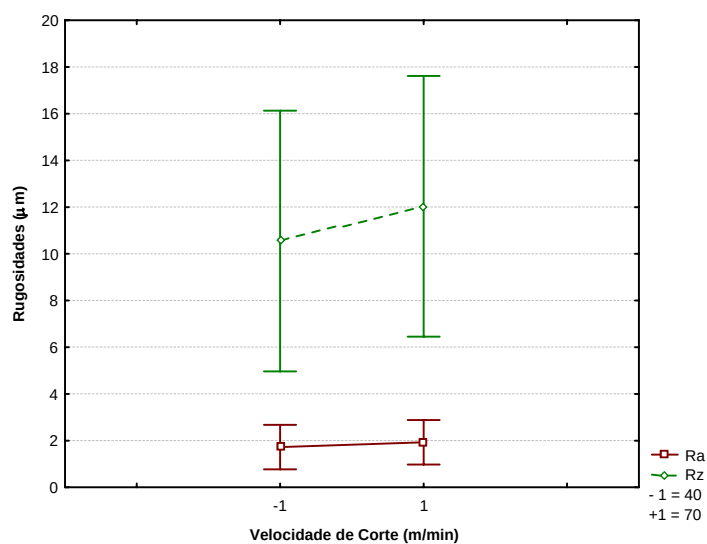


Figura 4.39: Rugosidades x Velocidade de Corte – Segunda Etapa – Ferro Fundido Vermicular

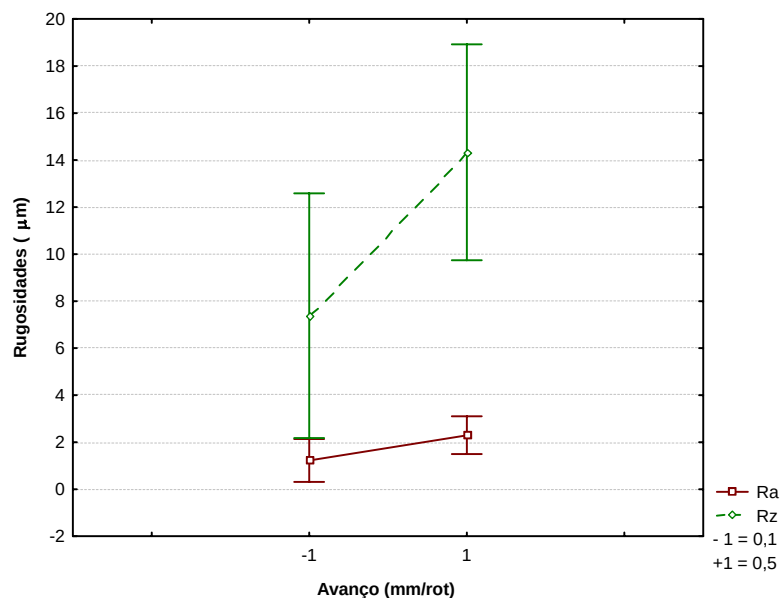


Figura 4.40: Rugosidades x Avanço – Segunda Etapa – Ferro Fundido Vermicular

4.3. Quadro Resumo dos Resultados e Comparações

A tabela 4.34 apresenta um resumo dos resultados obtidos durante os testes realizados com os dois materiais em questão. Os parâmetros que apresentaram influência significativa com 95% de confiabilidade estão destacados em fundo rosa, os demais são resultados das tendências, isto é, sem a significância estatística elevada.

Tabela 4.34: Efeito da mudança de níveis das variáveis nos resultados

	FERRO FUNDIDO CINZENTO				FERRO FUNDIDO VERMICULAR			
	1ª Etapa		2a Etapa		1a Etapa		2a Etapa	
- 1 → +1	Erros Circul. e Cilindr.	Parâmetros Ra, Rz, Rt	Erros Circul. e Cilindr.	Parâmetros Ra, Rz, Rt	Erros Circul. e Cilindr.	Parâmetros Ra, Rz	Erros Circul. e Cilindr.	Parâmetros Ra, Rz
Sobremetal	Melhora	Piora	Melhora	Piora	Piora	Melhora	Melhora	Melhora
Guia Cilíndrica	Piora	Piora	Piora	Piora	Melhora	Piora	Piora	Piora
Revestimento	Piora	Piora	Piora	Piora	Melhora	Piora	Piora	Piora
Velocidade de Corte	Piora	Piora	Piora	Piora	Piora	Piora	Piora	Piora
Avanço	Melhora	Melhora	Piora	Melhora	Melhora	Piora	Melhora	Piora

Ao usar o ferro fundido cinzento, o sobremetal produziu efeitos diferentes nos erros de forma e nos parâmetros de rugosidade, sendo que, tanto na primeira etapa como na segunda, os erros de forma tendiam a ser menores, por volta de 20 a 24 μm , quando usinando com sobremetal maior (0,25mm), e os parâmetros de rugosidade tendiam a piorar, ficando em torno de 3 μm o Ra, 14 μm o Rz e 22 μm o Rt (ao usar com o menor sobremetal esses valores eram menores). Já usinando o ferro fundido vermicular, o sobremetal maior, no geral, tendia a produzir menores erros de forma, por volta de 10 a 12 μm , e menores rugosidades, em torno de 2 μm o Ra e 10 μm o Rz, apesar de ter produzido piores erros de forma na primeira etapa dos testes.

A guia cilíndrica maior piorou os erros de forma, que ficaram entre os valores de 20 a 24 μm , e os parâmetros de rugosidade ($R_a=3\mu\text{m}$, $R_z=12\mu\text{m}$ e $R_t=20\mu\text{m}$) obtidos durante os testes com o ferro fundido cinzento, o que se explica pela própria função da guia, que é de alisar a parede do furo. Portanto, uma guia maior produz mais atrito, o que aumenta a temperatura gerada na usinagem e piora a qualidade dos furos obtidos. Apenas durante a primeira etapa da usinagem do ferro fundido vermicular é que a guia cilíndrica maior produziu melhores resultados dos erros de forma, sendo que o erro de circularidade médio foi de 9 μm e o erro de cilíndricidade em torno de 11 μm . Os parâmetros de rugosidade se mostraram piores tanto durante essa etapa quanto durante a segunda etapa.

No caso da velocidade de corte, sempre que se usavam maiores valores (70 m/min) os parâmetros de qualidade dos furos obtidos ficavam piores. Por exemplo, os erros de forma chegaram a valores em torno de 32 a 36 μm e os parâmetros de rugosidade, R_z , que ficaram em torno de 15 a 25 μm nos casos mais críticos, que se mostraram durante a usinagem do ferro fundido vermicular. Isso é explicado pelo maior efeito do batimento das ferramentas ao usinar com maiores velocidades de corte, e também devido à presença da aresta postiça de corte na usinagem dos dois materiais.

O avanço da ferramenta teve influências diferentes na usinagem do ferro fundido cinzento e do vermicular. Na usinagem do ferro fundido cinzento, no geral, o avanço maior tendia a melhorar a qualidade dos furos, produzindo erros de forma médios aproximadamente iguais a 24 μm e parâmetros de rugosidade médios de $R_a=2\mu\text{m}$, $R_z=11\mu\text{m}$ e $R_t=18\mu\text{m}$, apenas piorando os erros de forma durante a segunda etapa dos testes. Já nos testes do ferro fundido vermicular, o avanço maior (0,5 mm/rot) tendia a melhorar os erros de forma, que apresentaram valores aproximados de 10 μm , e piorar os parâmetros de rugosidade, tanto na primeira como na segunda etapa dos testes.

Ao usinar o ferro fundido cinzento com ferramentas revestidas com Alcrona®, notou-se que os erros de forma e os parâmetros de rugosidade eram piores. Por esse motivo foi utilizado o TiAlN para comparar com a performance da Helica® na segunda etapa dos testes, e este revestimento produziu furos com melhor qualidade. Já na usinagem do ferro fundido vermicular, como a análise dos revestimentos não obteve influência significativa nos resultados,

foi escolhido o revestimento Alcrona® para comparar com a Helica® na segunda etapa, por ele ter mostrado melhores resultados dos erros de circularidade e cilindridade. Na segunda etapa, foi constatado que o melhor revestimento foi o Alcrona®. Isso pode ser explicado pelas propriedades mecânicas dos dois materiais, já que o Alcrona® é um revestimento que foi desenvolvido principalmente para facilitar a usinagem de ferrosos, principalmente os aços, que possuem propriedades como dureza e resistência mecânica parecidas com as do ferro fundido vermicular. Já o Helica® é um revestimento que foi desenvolvido principalmente para usinagem de furos em ferros fundidos (Balzers, 2006).

A influência individual dos parâmetros de entrada para os dois materiais investigados foi apresentada na tabela 4.34, para cada variável de saída. Estes resultados permitem sugerir, para cada material, as condições de corte que oferecem os melhores resultados de qualidade dos furos, resumidos na tabela 4.35. Observa-se que a maioria das variáveis se comportou de maneira semelhante na usinagem dos dois materiais testados. Apenas o comportamento dos revestimentos das ferramentas é que se mostrou diferente na usinagem do ferro fundido cinzento e do vermicular.

Tabela 4.35: Comparação Geral entre os Dois Materiais Testados

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

Logo, para garantir uma maior qualidade dos furos, as recomendações para alargar o ferro fundido cinzento é utilizar um **maior sobremetal**, ou seja, menores diâmetros dos furos iniciais, **guias cilíndricas mais finas**, que proporcionam menor contato entre a ferramenta e a peça, **menores velocidades de corte** e **maiores avanços**. Além disso, o melhor revestimento para alargadores que vão usinar este material é a **Helica®**, à base de AlCr.

Para a usinagem do ferro fundido vermicular, todas as recomendações anteriores são válidas, menos o revestimento para alargadores, que nesse caso deve-se utilizar a **Alcrona®** (AlCrN).

CAPÍTULO V

CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA FUTUROS TRABALHOS

5.1. CONCLUSÕES

A análise dos resultados obtidos nos testes propostos leva a algumas conclusões. A primeira delas é que os planejamentos experimentais são técnicas poderosas, que facilitam a vida do cientista, diminuindo o número de testes a serem realizados e aumentando a confiabilidade dos resultados obtidos.

Para a usinagem do ferro fundido cinzento, as variáveis que se mostraram influentes, com confiabilidade estatística de 95%, foram: a velocidade de corte, para as rugosidades Ra, Rz e Rt, durante a primeira etapa dos testes, e a guia cilíndrica para os erros de forma, durante a segunda etapa dos experimentos.

Para o alargamento do ferro fundido vermicular, as variáveis que apresentaram um nível de significância maior que 95% foram: a largura da guia cilíndrica na análise dos erros de forma, apenas durante a primeira etapa dos testes, e a largura da guia e o avanço, que influenciaram os parâmetros de rugosidade Ra e Rz durante as duas etapas dos experimentos.

As demais variáveis não apresentaram influências significativas, para a produção de furos com qualidade. As tendências, entretanto, indicam que as demais variáveis devem ser escolhidas conforme segue.

- ✓ O nível maior de sobremetal (no caso, 0,25 mm no raio do furo) obteve melhores resultados em praticamente todas as variáveis de saída, tanto na usinagem do ferro fundido cinzento como na do ferro fundido vermicular.

- ✓ A guia cilíndrica influencia na qualidade pelo fato de alisar a superfície do furo, gerando assim um maior atrito entre ferramenta e peça. Por esse motivo, as guias cilíndricas mais finas (0,10mm) se mostraram melhores e proporcionaram furos com melhores parâmetros de qualidade, tanto ao usinar ferro fundido cinzento como ao usinar o ferro fundido vermicular.
- ✓ As velocidades de corte menores, 40 m/min, proporcionaram melhor qualidade nos dois materiais testados, o que se explica pelo fato de estar presente a aresta postiça de corte na usinagem dos dois materiais. Quando a velocidade de corte era menor, ela se mostrava mais estável e prejudicava menos a qualidade superficial dos furos produzidos. Além disso, a maior velocidade de corte (70 m/min) aumentava o efeito da vibração da ferramenta, o que prejudicava a qualidade dos furos.
- ✓ O avanço maior, de 0,5 mm/rot, no geral produziu furos com melhores parâmetros de qualidade, tanto ao usinar o ferro fundido cinzento como o vermicular, o que aconteceu por causa do menor tempo de corte a que foram submetidos os corpos de prova, e consequentemente pela menor ação alisadora das guias cilíndricas.
- ✓ Os revestimentos mostraram comportamentos diferentes ao usinar cada um dos materiais testados: o Helica® se mostrou melhor para usinar o ferro fundido cinzento e o Alcrona® se mostrou melhor na usinagem do ferro fundido vermicular.

As melhores condições para a usinagem dos materiais estudados são: para alargar o ferro fundido cinzento, ficou claro que devem ser utilizadas velocidades de corte menores e sobremetal maior, como no caso estudado, velocidade de 40 m/min, e sobremetal de 0,25 mm no raio. Além disso, o revestimento que mostrou melhores resultados foi o Helica® (AlCr).

Já o ferro fundido vermicular apresentou melhor comportamento quando usinado com ferramentas revestidas por Alcrona® (AlCrN). Os resultados da análise da qualidade superficial das peças usinadas desse material, mostrou que devem ser usadas ferramentas com guias cilíndricas menores (0,10 mm) e avanços maiores, no caso estudado, de 0,5 mm/rot. Isso se deve ao fato do ferro fundido vermicular ser mais dútil que o ferro fundido cinzento, e, portanto, mais difícil de usinar. Essa dificuldade também foi notada durante os testes, pelo fato

de algumas ferramentas terem apresentado desgaste maior após a usinagem do material em questão.

5.2. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

- Elaborar um estudo da qualidade dos furos alargados com diferentes estados de desgaste das ferramentas, para verificar a influência do mesmo em parâmetros como cilindricidade, circularidade e rugosidade da superfície.

- Elaborar um estudo da qualidade dos furos alargados utilizando diferentes condições de lubrificação, com fluidos em concentrações variadas e MQL (mínima quantidade de lubrificante).

- Realizar ensaios de longa duração, para determinar a vida de um alargador ao usinar o ferro fundido vermicular, já que este material é cada vez mais utilizado na produção de componentes automotivos, onde a operação de alargamento é mais usada, já que nos testes deste trabalho observou-se maior desgaste de ferramentas ao usinar este material. Dessa forma, seria possível determinar uma curva de vida da ferramenta.

- Estudar as forças de avanço e momentos de torção envolvidos no processo de alargamento, utilizando-se de uma plataforma dinamométrica, já que estudos sobre o assunto são bem reduzidos.

- Investigar a influência dos parâmetros de corte estudados neste trabalho em outros materiais, como aços endurecidos, ou ligas de alumínio.

CAPÍTULO VI

REFERÊNCIAS

ABELE, E., SAHM, A., SCHULZ, H., 2002, **Wear Mechanism when Machining Compacted Graphite Iron**. CIRP Annals - Manufacturing Technology, Volume 51, Issue 1, pp. 53-56.

AGOSTINHO, O.L., RODRIGUES, A.C.S. E LIRANI, J., 1977, **Tolerâncias, Ajustes, Desvios e Análise de Dimensões**, São Paulo, Ed. Edgard Blücher, 312 p.

ASM, 1996, **Speciality handbook: cast irons**. Estados Unidos: ASM International, p. 33-267.

Associação Brasileira de Normas Técnicas, 1988, **Norma NBR 6405**, Rio de Janeiro.

BALZERS, 2006, **Catálogo de produtos G6 Generation**. Jundiaí, SP.

BARROS NETO, B, SCARMINIO, I.S. E BRUNS, R.E., 1995, **Planejamento e Otimização de Experimentos**, Editora da Unicamp, 2a. Edição, Campinas-SP, 229 p.

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

CALADO, V., MONTGOMERY, D. C., 2003, **Planejamento de Experimentos Usando o Statistica**, Rio de Janeiro: E-Papers Serviços Editoriais, 260p.

CHIAVERINI, V., 1988, **Aços e ferros fundidos**, 6ª Ed., São Paulo: Editora ABM.

COLPAERT, H., 1977, **Metalografia dos produtos siderúrgicos comuns**. 2ª. Ed. São Paulo: Editora Edgard Blücher, 412 p.

COSTA, E.S., 2004, **Furação de Aços Microligados com Aplicação de Mínima Quantidade de Fluido de Corte – MQF**, Tese de Doutorado, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 311 pp.

DA MOTA, P.R., 2006. **Investigação do Comportamento de Ferramentas de Aço Rápido no Processo de Rosqueamento Interno em Alta Velocidade de Corte**. 142 f. Dissertação de Mestrado – Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia.

DA SILVA, R.B., 2001, **Alargamento Cônico do Ferro Fundido Nodular GGG40**, Dissertação de Mestrado - Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte.

DAGNALL M.A., H., 1986, **Exploring Surface Texture**, 2nd Edition, Rank Taylor Hobson Limited, Leicester, England, p. 69.

DE ANDRADE, C.L.F., 2005, **Análise da Furação do Ferro Fundido Vermicular com Brocas de Metal-duro com Canais Retos Revestidas com TiN e TiAlN**. 148 f. Dissertação de Mestrado – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis.

DE BENEDICTS, K., 1997, **A Short Course in Cast Iron Turning**, Manufacturing Engineering, vol. 119, n.3, pp. 48-54.

DORÉ, C., BAGETTI, J., BOEHS, L., GUESSER, W.L., BRESSIANI, A.H.A, **Avaliação do Desempenho de Ferramentas de Cerâmica $Al_2O_3+Y_2O_3+NbC$ na Usinagem de Ferro Fundido Vermicular**. In: Anais do IV COBEF, Abril de 2007, Estância de São Pedro, SP.

GABOR, H., 1982, **Como atuam os alargadores**, Revista Máquinas e Metais, MM Editora Ltda, Ano XVIII, n. 205, pp. 16-21.

HEISEL, U., LUTZ, M., SPATH, D. WASSMER, R.E WALTER, U, 1998, **A Técnica da Quantidade Mínima de Fluidos e sua Aplicação nos Processos de Corte**, Máquinas e Metais, Ed. Aranda, fevereiro, pp. 22-38.

HURTH-INFER - Indústria de Máquinas e Ferramentas Ltda, 1998, **Processo de furação e alargamento**, apostila, 1ª edição, Sorocaba, SP.

IL'IN, V.M., 1975, **Cutting Properties of Solid Cemented-Carbide Reamers**, Russian Engineering Journal, vol. 55, n.4, pp. 48-49.

KALHÖFER, E., 1997, **Dry machining – Principles and Applications**, 2º Seminário Internacional de Alta Tecnologia, UNIMEP, Santa Bárbara D'Oeste –SP.

KLOCKE, F. AND EISENBLÄTTER, G., 1997, **Presented at the Opening Session Dry Cutting**, Annals of the Cirp, Vol. 46 (2), pp. 519-526.

KÖNIG, W., 1981, **Tecnologia da Fabricação – Tornear, Fresar e Furar**. Volume 1, Universidade Técnica de Aachen, Alemanha, 419 p., Tradução de Weingaertner, W.L., UFSC.

KOPKA, F., ELLERMELER, A., 2005, **O Ferro Fundido de Grafita Vermicular Ajuda a Dominar as Altas Pressões de Combustão**. Revista Máquinas e Metais, p 26-41.

KRESS, D., 1974, **El escariado con altas velocidades**. Tese de Doutorado - Universidad de Stuttgart, Stuttgart.

KRESS, D., 1987, **CNC – Tooling for finish machining high precision bores**, Carbide and Tool Journal, vol. 19, n. 5, pp. 10-13.

KUBEL, E., 1998, **Coatings Crank up Tool Performance**, Manufacturing Engineering, janeiro, pp. 40-46.

LINDBERG, R.A., 1990, **Processes and materials of manufacture – Hole making and related operations**, fourth edition, Editora Prentice Hall International, Englewood Cliffs, pp. 264-301.

MACHADO, A.R. AND WALLBANK, J., 1997, **The effect of extremely low lubricant volumes in machining**, Wear, 210, pp. 76-82.

MACHADO, A.R. E DA SILVA, M.B., 2004, **Usinagem dos Metais**, apostila, Universidade Federal de Uberlândia – Uberlândia, 224 pp.

MACHADO, A.R. E DINIZ A.D., 2000, **Corte a Seco, com Mínima Quantidade de Fluido e com Fluido em Abundância: Usos, Aplicações, Vantagens e Desvantagens**, In: Congresso Usinagem 2000, São Paulo-SP.

MACHINABILITY DATA CENTER, **Machining Data Handbook**, 3rd Edition, Volume 1, Institute of Advanced Manufacturing Sciences Inc., 1980, Cincinnati, Ohio, USA , p. 171-221.

MARI, D. & GONSETH, D.R., 1993, **A new look at carbide tool life**, Wear, vol. 165, n. 1, ISSN 0043-1648, pp. 9-17.

MARQUARD, R., HELFRIED, S. E MCDONALD, M., 1988, **Crank it up: New materials create new possibilities**. Engine technology international, v. 2, p.58-60.

METALS HANDBOOK, 1989, **Machining**, Ninth Edition, ASM International, vol.16.

MOCELLIN, Fabiano, **Estudo da Usinabilidade do Ferro Fundido Vermicular em Ensaio de Furação**. 2002. 94p. Dissertação de Mestrado – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis.

MONTGOMERY, D. C., 2001, **Design and Analysis of Experiments**, Ed. John Wiley, New York, 5th Edition

NBR ISO 4287, 2002, **Especificações Geométricas do Produto (GPS) – Rugosidade: Método do perfil – Termos, definições e parâmetros da rugosidade**. ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas, Rio de Janeiro, 2002.

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

PALMA, Ernani Sales, 2004. **Metrologia**, Apostila, PUC Minas, Belo Horizonte, 236 pp.

PEREIRA, A.A., **The influence of sulfur on the machinability of grey cast iron FC25**. Journal of Materials processing Technology, p.1-7, 2006.

PEREIRA, Adriana Ana, 2005. **Influência do teor de enxofre na microestrutura, nas propriedades mecânicas e na usinabilidade do ferro fundido cinzento FC-25**. 138p. Dissertação de Mestrado – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis.

POLLACK, H.W., 1988, **Tool Design – Geometric Control**, Ed. Prentice Hall International, 2º Ed., Englewood Cliffs, pp. 404-408.

ROSA, Luiz Carlos, 2005, **Acabamento de Superfícies – Rugosidade Superficial**, OMA – Oficina Mecânica para Automação, Unesp, Sorocaba.

ROSAS, N., 1983, **Tolerâncias geométricas**, Apostila de treinamento de empregados da Embraer, 82 p.

SAHM, D. AND SCHNEIDER, 1996, **A Produção sem Refrigeração é Interessante e Deve ser mais Conhecida**, Máquinas e Metais, Editora Aranda, agosto, pp. 38-55.

SANTOS, A.B.S ET AL. **Ferro Fundido Vermicular: Obtenção, Microestruturas e Propriedades Mecânicas**. 1998. Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo, pp 1-4.

SANTOS, Rodrigo Gonçalves dos., 2004, **Avaliação Do Processo De Alargamento De Guias De Válvulas**, 107 f. Dissertação de Mestrado - Universidade Federal do Paraná, Curitiba.

SANTOS, S.C. **Furação de ferro fundido cinzento com brocas de metal duro integral**.1999. 105 f. Dissertação de Mestrado - Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia.

SCHROETER, R.B, 1989, **Alargamento de precisão em alumínio aeronáutico com ferramentas de gume único regulável**, Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, UFSC.

SHUNMUGAM, M.S. & SOMASUNDARAM, G., 1990, **Investigation into reaming processes using a frequency decomposition techinque**, International Journal Prod. Res., vol. 28, n. 11, pp. 2065-2074.

SINTERCAST, **Compacted Graphite Iron**. Catálogo de produtos. SinterCast S.A., 2001.

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

TEETER, F.J., 1999, **Coating takes place of coolant**, American Machinist, pp. 50-52.

THOLL, M., MAGATA, A. AND DAWSON, S., 1996, **Practical Experience with Passenger Car Engine Blocks Produced in High Quality Compacted Graphite Iron**. In: International Congress & Exposition, Detroit, Anais.

TOOL AND MANUFACTURING ENGINEERS HANDBOOK, 1983, **Machining**, 4. Ed., v.1, Society of Manufacturing Engineers, Dearborn, Michigan, pp 10.1-10.76.

TRENT, E. M., WRIGHT, P.K., 2000, **Metal Cutting**, 4th Edition, Butterworth Heinemann.

VAN VLACK, L.H. **Princípios de ciência e tecnologia dos materiais**. 5^a. Ed. Rio de Janeiro: Editora Campus, 1984.

VIANA, Rhander, 2004. **Desempenho de brocas de HSS revestidas na furação de ligas de Al-Si**. 81 p. Dissertação de mestrado – Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia.

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

XAVIER, F. A. et al. **Estudo da viabilidade Técnica e Econômica para a Utilização de Insertos de Metal Duro no Torneamento de Ferro Fundido Vermicular**. In: Anais II COBEF – Congresso Brasileiro de Engenharia de Fabricação, Uberlândia, 2003.

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