

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

ANÁLISE DO ALARGAMENTO DE FERRO FUNDIDO CINZENTO GG25 COM  
FERRAMENTAS DE METAL-DURO

Dissertação submetida à

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA

para a obtenção do grau de

MESTRE EM ENGENHARIA MECÂNICA

ANDERSON VICENTE BORILLE

Florianópolis, março de 2005.

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

**ANÁLISE DO ALARGAMENTO DE FERRO FUNDIDO CINZENTO GG25 COM  
FERRAMENTAS DE METAL-DURO**  
ANDERSON VICENTE BORILLE

Esta dissertação foi julgada adequada para a obtenção do título de

MESTRE EM ENGENHARIA

ESPECIALIDADE ENGENHARIA MECÂNICA  
sendo aprovada em sua forma final.

\_\_\_\_\_  
Prof. Rolf Bertrand Schroeter, Dr. Eng. – Orientador

\_\_\_\_\_  
Prof. Rodrigo Lima Stoeterau, Dr. Eng. – Co-orientador

\_\_\_\_\_  
Prof. José Antonio Bellini da Cunha Neto, Dr. - Coordenador do Curso

BANCA EXAMINADORA

\_\_\_\_\_  
Prof Dr.-Ing. Walter Lindolfo Weingaertner - Presidente

\_\_\_\_\_  
Prof. João Carlos Espíndola Ferreira, PhD.

\_\_\_\_\_  
Prof. Cleiton Rodrigues Teixeira, Dr. Eng.

*"A maior recompensa do nosso trabalho não é o que nos pagam por ele, mas aquilo em que ele nos transforma."*

John Ruskin

Aos meus pais, Gentil e Elisabeth, minha irmã  
Dayane e sobrinho Arthur e minha namorada  
Giovanna.

## AGRADECIMENTOS

Aos meus pais, pelo companheirismo, dedicação, incentivo e investimento incessante nos estudos.

À minha irmã, pelos momentos de compreensão, dicas e todas as formas de ajuda.

À minha namorada, pelo companheirismo e amizade, tolerância e paciência durante estes dois últimos anos.

Ao orientador Rolf Bertrand Schroeter, pela confiança em mim depositada, exemplo de profissionalismo, além das ajudas durante todo o tempo do trabalho.

Ao co-orientador Rodrigo Lima Stoeterau, pelas colaborações ao trabalho.

Ao professor Walter Lindolfo Weingaertner, pelo apoio e confiança depositados, principalmente nos momentos em que fomos mais solicitados.

Ao Laboratório de Mecânica de Precisão, pela infra-estrutura disponibilizada, e aos colegas e amigos que contribuíram direta e indiretamente para a realização deste trabalho e ficarão na lembrança, principalmente ao William, Jonas, Vincenzo, David, Rovadir, Domitila e Jakson, companheiros de projeto. Também ao Helton, Sérgio, Cleyzer, Eduardo, Leonardo, Rafael, Daniel, Polli, Marco, Sunada, Eriberto, Wagner, Tiagão, Hugo, Fred, Gustavo, Livia, Ana, Elis, Guilhermina, Helio, Seu Paulo em fim todos que estão ou já estiveram no LMP, e o ajudaram a formar um excelente ambiente de trabalho.

A todos os professores e ao programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Santa Catarina.

Ao CNPq pela concessão da bolsa de estudos. À Finep pelo financiamento ao projeto de pesquisa e ao IEL pelo gerenciamento dos recursos.

À empresa Titex Plus pelo fornecimento de ferramentas e à empresa Dormer Tools pelas colaborações técnicas.

À Metalúrgica Riosulense pelo fornecimento dos materiais e infra-estrutura para os ensaios, pela colaboração de todos seus funcionários, especialmente ao Alfonso, Fabiano, Márcio e Rubens, que sempre auxiliaram quando necessário.

# SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS.....	9
LISTA DE TABELAS .....	13
SIMBOLOGIA.....	15
RESUMO.....	18
<i>ABSTRACT</i> .....	19
<b>1 INTRODUÇÃO.....</b>	<b>20</b>
<b>2 ESTADO DA ARTE.....</b>	<b>22</b>
<i>2.1 O Processo de Alargamento.....</i>	<i>22</i>
<i>2.2 Alargadores.....</i>	<i>24</i>
2.2.1 Nomenclatura dos alargadores .....	25
2.2.2 Geometria dos alargadores.....	26
2.2.3 Classificação dos alargadores.....	28
2.2.4 Parâmetros de corte no alargamento .....	34
<i>2.3 Materiais para Alargadores .....</i>	<i>36</i>
2.3.1 Metal-duro.....	36
<i>2.4 Revestimentos para Alargadores .....</i>	<i>37</i>
2.4.1 Tipos de Revestimentos .....	38
<i>2.5 Meios Lubri-refrigerantes.....</i>	<i>39</i>
2.5.1 Funções:.....	40
2.5.2 Tipos de fluidos de corte .....	41
<i>2.6 Força de Usinagem no Alargamento.....</i>	<i>43</i>
<i>2.7 Qualidade da Peça Usinada .....</i>	<i>45</i>
2.7.1 Erros geométricos.....	46
2.7.2 Qualidade da superfície gerada .....	47
<i>2.8 Critérios de Fim de Vida no Alargamento.....</i>	<i>49</i>
2.8.1 Mecanismos de desgaste .....	49
2.8.2 Tipos de desgaste.....	50
2.8.3 Critérios de fim de vida.....	53
<i>2.9 Ferros Fundidos.....</i>	<i>54</i>
2.9.1 Tipos de ferro fundido.....	55

2.9.2	Ferros Fundidos Cinzentos.....	56
<b>3</b>	<b>MATERIAIS E MÉTODOS .....</b>	<b>62</b>
3.1	<i>O Processo Atual.....</i>	<i>62</i>
3.1.1	A peça.....	64
3.1.2	A Máquina-ferramenta.....	64
3.1.3	As ferramentas de corte .....	65
3.2	<i>Ferramentas de Corte .....</i>	<i>67</i>
3.2.1	Ferramentas fabricadas pela própria empresa .....	67
3.2.2	Ferramentas fornecidas pelo fabricante A.....	68
3.2.3	Ferramentas fornecidas pelo fabricante B .....	69
3.3	<i>Máquinas-ferramentas .....</i>	<i>69</i>
3.4	<i>Meio Lubri-refrigerante Utilizado .....</i>	<i>70</i>
3.5	<i>Corpo de Prova.....</i>	<i>70</i>
3.5.1	Fixação do corpo de prova .....	71
3.6	<i>Sistema de Avaliação da Qualidade dos Furos.....</i>	<i>71</i>
3.6.1	Equipamentos .....	72
3.6.2	Metodologia de avaliação .....	72
3.7	<i>Sistema de Avaliação da Força de Usinagem .....</i>	<i>73</i>
3.7.1	Equipamentos .....	73
3.7.2	Metodologia de avaliação .....	74
3.8	<i>Avaliação do Desgaste.....</i>	<i>75</i>
3.8.1	Equipamentos .....	75
3.8.2	Metodologia de avaliação .....	76
3.9	<i>Ensaio de Variação de Parâmetros de Corte.....</i>	<i>76</i>
3.9.1	Ferramentas fabricadas pela empresa .....	77
3.9.2	Ferramentas fornecidas pelo fabricante A.....	78
3.9.3	Ferramentas fornecidas pelo fabricante B .....	79
3.10	<i>Ensaio de Vida de Ferramentas .....</i>	<i>79</i>
<b>4</b>	<b>ANÁLISE DOS RESULTADOS.....</b>	<b>82</b>
4.1	<i>As ferramentas de corte.....</i>	<i>82</i>
4.2	<i>Ensaio de Vida de Ferramentas .....</i>	<i>86</i>
4.2.1	Avaliação da ferramenta de diâmetro 11,011 mm.....	87
4.2.2	Avaliação da ferramenta de diâmetro 9,011 mm.....	91

4.3	<i>Ensaio de Variação de Parâmetros de Corte</i> .....	96
4.3.1	Ferramentas Fabricadas pela Empresa .....	96
4.3.2	Ferramentas do Fabricante A.....	100
4.3.3	Ferramentas do Fabricante B.....	111
4.3.4	Análise dos Perfis das Superfícies Alargadas .....	113
4.4	<i>Ensaio com Ferramentas de Geometrias Modificadas</i> .....	115
<b>5</b>	<b>CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA NOVOS TRABALHOS</b> .....	<b>122</b>
5.1	<i>Sugestões para Trabalhos Futuros</i> .....	124
<b>6</b>	<b>REFERÊNCIAS</b> .....	<b>126</b>
	Anexo A – Considerações sobre o processo .....	132
	Anexo B – Informações complementares sobre as ferramentas de corte .....	142
	Anexo C – Materiais e equipamentos utilizados.....	152

## LISTA DE FIGURAS

### Capítulo 2

Figura 2.1 – Ferramentas de alargamento [8] .....	23
Figura 2.2 – Alargador de um gume com três réguas na periferia [1] .....	24
Figura 2.3 – Nomenclatura de alargadores [11] .....	26
Figura 2.4 – Geometria de alargadores [11, 12] .....	27
Figura 2.5 – Tipos de canais em alargadores [11].....	29
Figura 2.6 – Tipos de fixação de alargadores .....	30
Figura 2.7 – Alargadores de máquina e manual [6] .....	31
Figura 2.8 – Alargamento cilíndrico e cônico.....	31
Figura 2.9 – Alargador de gume único e de múltiplos gumes.....	32
Figura 2.10 – Divisão com passos desiguais entre os gumes [6].....	33
Figura 2.11 – Formas de entrada de alargadores [6, 11] .....	34
Figura 2.12 – Forças no processo de alargamento.....	44
Figura 2.13 – Relações que envolvem a qualidade de um peça usinada, König [28] <i>apud</i> Stoeterau [29].....	46
Figura 2.14 – Erros comuns na geometria de furos [1, 3] .....	47
Figura 2.15 – Perfil de rugosidade e parâmetro $R_a$ .....	49
Figura 2.16 – Tipos de desgastes em ferramentas de corte [20] .....	51
Figura 2.17 – Largura da marca de desgaste no flanco da ferramenta[32] .....	51
Figura 2.18 – Tipos de desgaste de guias [33].....	52
Figura 2.19 – Grafita envolta pela matriz ferrítica [35].....	56

### Capítulo 3

Figura 3.1 – Mesa da máquina-ferramenta utilizada no processo de alargamento .....	65
Figura 3.2 – Rebaixo guia na ponta dos alargadores.....	66

Figura 3.3 – Esquema de um mandril flutuante, com deslocamento radial e angular [39] .....	66
Figura 3.4 – Alargadores de fabricação própria .....	68
Figura 3.5 – Alargadores helicoidais fornecidos pelo fabricante A .....	68
Figura 3.6 – Alargador de canais retos fornecidas pelo fabricante A .....	69
Figura 3.7 – Alargador de canais retos fornecidas pelo fabricante B .....	69
Figura 3.8 – Aplicação de fluido de corte .....	70
Figura 3.9 – Esquema dos equipamentos para a medição de forças de usinagem .....	74
Figura 3.10 – Exemplo da aquisição de dados .....	75

## Capítulo 4

Figura 4.1 – Falha na região oposta da face de cada inserto .....	83
Figura 4.2 – Marcas decorrentes do contato entre a base dos insertos e a superfície usinada da peça .....	84
Figura 4.3 – Detalhe das ferramentas: nem todos os gumes pertencem à mesma circunferência .....	84
Figura 4.4 – Perfil de um alargador helicoidal do fabricante A .....	85
Figura 4.5 – Os dois perfis diferentes das ferramentas de diâmetro 9,011 .....	85
Figura 4.6 – Evolução do desgaste de flanco da ferramenta 11,011#2 .....	88
Figura 4.7 – Evolução das forças de usinagem da ferramenta 11,011#2 .....	88
Figura 4.8 – Variação do diâmetro dos furos produzidos pela ferramenta 11,011#2 ....	89
Figura 4.9 – Variação da rugosidade dos furos produzidos pela ferramenta 11,011#2 .....	90
Figura 4.10 – Variação da cilindridade e circularidade em relação à vida da ferramenta 11,011#2 .....	90
Figura 4.11 – Evolução do desgaste de flanco da ferramenta 9,011#2 .....	92
Figura 4.12 – Evolução das forças de usinagem da ferramenta 9,011#2 .....	93
Figura 4.13 – Evolução do diâmetro das peças produzidas pela ferramenta 9,011#2 .....	94

Figura 4.14 – Evolução da rugosidade das peças produzidas pela ferramenta 9,011#2 .....	95
Figura 4.15 – Evolução da cilindricidade e circularidade das peças produzidas pela ferramenta 9,011#2 .....	95
Figura 4.16 – Rugosidade obtida por duas ferramentas de diâmetro 9,011 .....	96
Figura 4.17 – Rugosidade obtida por duas ferramentas de diâmetro 7,011 .....	97
Figura 4.18 – Rugosidade em função da velocidade de corte - LMP.....	97
Figura 4.19 – Largura de guia e ângulo de incidência - ferramentas 9,011 mm.....	98
Figura 4.20 – Largura de guia e ângulo de incidência - ferramentas 7,011 mm.....	98
Figura 4.21 - Ângulo de incidência – ferramenta 9,011#1 mm .....	99
Figura 4.22 – Variação de rugosidade da ferramenta 9,011#10 (fabricante A não-revestidas) .....	101
Figura 4.23 – Variação de rugosidade da ferramenta 9,011#12 (fabricante A não-revestidas) .....	101
Figura 4.24 – Variação da força de avanço com a velocidade de corte.....	102
Figura 4.25 – Variação do momento torçor com a velocidade de corte.....	102
Figura 4.26 – Variação da força de avanço com o avanço.....	103
Figura 4.27 – Variação do momento torçor com o avanço .....	103
Figura 4.28 – Variação do diâmetro do furo em função da velocidade de corte.....	104
Figura 4.29 – Variação do diâmetro do furo em função do avanço.....	104
Figura 4.30 – Variação da rugosidade do furo em função da velocidade de corte .....	105
Figura 4.31 – Variação da rugosidade do furo em função do avanço .....	105
Figura 4.32 – Variação da rugosidade do furo para ferramenta sem revestimento.....	106
Figura 4.33 – Variação da rugosidade do furo para ferramenta com revestimento .....	106
Figura 4.34 – Variação do diâmetro do furo para ferramenta sem revestimento .....	107
Figura 4.35 – Variação do diâmetro do furo para ferramenta com revestimento .....	107
Figura 4.36 – Marcas deixadas pela ferramenta durante o seu retorno.....	108
Figura 4.37 – Adesão na ferramenta .....	108
Figura 4.38 – Erro de forma encontrado em uma peça usinada por um alargador com revestimento.....	109

Figura 4.39 – Esforços de usinagem para ferramentas revestidas .....	109
Figura 4.40 – Rugosidade obtida pela ferramenta do fabricante A de gumes retos.....	110
Figura 4.41 – Rugosidade obtida pelas ferramentas do fabricante B.....	111
Figura 4.42 – Vibrações na entrada do furo com ferramentas sem rebaixo guia.....	112
Figura 4.43 – Esforços de usinagem gerados pela ferramenta do fabricante B .....	112
Figura 4.44 – Perfil de rugosidade de uma peça gerado por uma ferramenta de fabricação própria .....	113
Figura 4.45 – Perfil de rugosidade gerado por uma ferramenta helicoidal do fabricante A sem revestimento .....	113
Figura 4.46 – Perfil de rugosidade gerado por uma ferramenta helicoidal do fabricante A com revestimento .....	114
Figura 4.47 – Perfil de rugosidade gerado por uma ferramenta de gumes retos do fabricante A.....	114
Figura 4.48 – Perfil de rugosidade gerado por uma ferramenta do fabricante B.....	114
Figura 4.49 – Alterações de geometria dos alargadores .....	116
Figura 4.50 – Rugosidade obtida por ferramentas sem e com rebaixo guia.....	118
Figura 4.51 – Variação de esforços de usinagem com e sem rebaixo .....	118
Figura 4.52 – Rugosidade obtida com ferramenta com guias de 1,4 mm de largura ...	119
Figura 4.53 – Rugosidade obtida com ferramenta com guias de 0,6 mm de largura ...	120
Figura 4.54 – Diâmetro obtido com ferramenta com guias de 1,4 mm de largura.....	121
Figura 4.55 – Diâmetro obtido com ferramenta com guias de 0,6 mm de largura.....	121

## LISTA DE TABELAS

### Capítulo 2

Tabela 2.1 – Sobremedidas recomendadas para alargamento de furos [6] .....	23
Tabela 2.2 – Ângulos de inclinação da hélice [10] .....	29
Tabela 2.3 – Número de gumes em alargadores de acabamento [10] .....	33
Tabela 2.4 – Faixa de composição de ferros fundidos típicos comuns [36].....	56
Tabela 2.5 – Resistência das classes de ferro fundido [34] .....	57
Tabela 2.6 – Composição química das classes de ferro fundido [34].....	57
Tabela 2.7 – Correlações para classificação em diferentes norma [37].....	58

### Capítulo 3

Tabela 3.1 – Situação do processo atual (descrito pelos funcionários da empresa).....	63
Tabela 3.2 – Tamanho das peças utilizadas por diâmetro de ferramentas.....	71
Tabela 3.3 – Parâmetros de corte regulados pelo operador no pré-teste.....	77
Tabela 3.4 – Parâmetros de corte - Diâmetro $\phi$ 7,011 .....	77
Tabela 3.5 – Parâmetros de corte – Diâmetro $\phi$ 9,011 .....	78
Tabela 3.6 – Parâmetros de corte – Diâmetro $\phi$ 11,045 .....	78
Tabela 3.7 – Parâmetros de corte ensaiados com as ferramentas de diâmetro 9,011 e número 10, 12, 14 e 15 .....	79

### Capítulo 4

Tabela 4.1 – Avarias encontrados nas ferramentas novas fabricados pela própria empresa.....	82
Tabela 4.2 – Situação geral das ferramentas do ensaio de vida .....	86
Tabela 4.3 – Seqüência de fotos da face e guia .....	91
Tabela 4.4 – Comparação entre ferramenta nova e desgastada .....	92

Tabela 4.5 – Comparação entre rugosidade e diâmetros obtidos com e sem o uso de fluido lubri-refrigerante ( $v_c= 28$ m/min, $f=0,48$ mm) .....	100
Tabela 4.6 – Quadro comparativo entre as ferramentas modificadas .....	117

## SIMBOLOGIA

### Alfabeto Latino – letras minúsculas

a	Sobremedida no alargamento (no diâmetro)	[mm]
b <sub>a</sub>	Largura da guia	[mm]
d	Diâmetro do alargador	[mm]
f	Avanço por rotação da ferramenta	[mm]
v <sub>c</sub>	Velocidade de corte	[m/min]
v <sub>f</sub>	Velocidade de avanço	[mm/min]
y	Ordenada do perfil de rugosidade	[μm]

### Alfabeto Latino – letras maiúsculas

Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Óxido de alumínio	
C	Carbono	
Cr	Cromo	
F <sub>1</sub>	Força de usinagem em um dente	[N]
F <sub>c</sub>	Força de corte	[N]
F <sub>c1</sub>	Força de corte por dente	[N]
Fe	Ferro	
Fe <sub>3</sub> C	Cementita (Carboneto de ferro)	
Fe <sub>3</sub> P	Fosfeto de Ferro	
F <sub>f</sub>	Força de avanço	[N]
F <sub>f1</sub>	Força de avanço por dente	[N]
F <sub>p</sub>	Força passiva	[N]
HB	Dureza Brinell	[HB]
IT	Classes de tolerâncias normalizadas	
L	Comprimento total do furo	[mm]

$l_m$	Percurso de medição de rugosidade	[mm]
$M_t$	Momento torçor	[N.cm]
P	Fósforo	
$R_a$	Desvio médio aritmético (rugosidade $R_a$ )	[ $\mu$ m]
Si	Silício	
$SV_\alpha$	Deslocamento do gume medido sobre o flanco da ferramenta	[mm]
TiC	Carboneto de titânio	
TiCN	Carbonitreto de titânio	
TiN	Nitreto de titânio	
TiAlN	Nitreto de alumínio titânio	
V	Vanádio	
VB	Largura da marca de desgaste de flanco médio	[mm]
$VB_{max}$	Largura da marca de desgaste de flanco máximo	[mm]

### Alfabeto Grego

$\gamma'_p$	Ângulo de saída passivo do gume secundário	[°]
$\alpha'_p$	Ângulo de incidência passivo do gume secundário	[°]
$\alpha_0$	Ângulo de incidência ortogonal	[°]
$\gamma_0$	Ângulo de saída ortogonal	[°]
$\gamma_f$	Ângulo de saída lateral (ângulo de hélice)	[°]
$\kappa_r$	Ângulo de direção do gume	[°]
$\sigma_t$	Limite de resistência à tração	[kg/mm <sup>2</sup> ]

### Abreviaturas

UFSC	Universidade Federal de Santa Catarina
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas

ASTME *American Society of Tool and Manufacturing Engineers*

CAD *Computer Aided Design*

CVD *Chemical vapor deposition*

DIN Deutsches Institut für Normung

Finep Financiadora de Estudos e Projetos

IEL Instituto Euvaldo Lodi

ISO International Organization for Standardization

LMP Laboratório de Mecânica de Precisão

OECD *Organisation for Economic Co-operation and Development*

## RESUMO

Alargamento é uma operação de usinagem de acabamento, que visa melhorar a qualidade geométrica, dimensional e de textura da superfície de furos gerados por um processo anterior. Por ser uma operação de acabamento é geralmente realizada nas etapas finais da produção do componente, de modo que refugos nessa etapa provocam o desperdício de todos os processos anteriores. Neste trabalho foi realizada uma análise do processo de alargamento de ferro fundido cinzento de uma empresa fornecedora de autopeças. Um de seus principais produtos possui exigências na tolerância de diâmetros e rugosidade que não são atendidos pelo processo alargamento. De modo a conhecer o processo, realizaram-se ensaios de vida de ferramentas, onde se observou a evolução do desgaste das ferramentas, evolução das forças de usinagem, sendo também realizado o acompanhamento da qualidade das peças produzidas. Os ensaios foram realizados no chão-de-fábrica, exceto as medições de esforços de usinagem. Verificou-se que o processo empregado era muito instável, e não havia repetitividade de resultados. Com o objetivo de identificar as possíveis causas, foram realizados ensaios complementares avaliando os resultados obtidos por diferentes tipos de alargadores. Foram utilizadas ferramentas produzidas pela própria empresa com haste de aço e insertos de metal-duro, e ferramentas comerciais inteiriças de metal-duro, com e sem revestimento (TiNAl). Em relação às ferramentas produzidas pela própria empresa, observou-se falta de padronização de afiações. Isso resultou em diferentes níveis de rugosidade e número de peças produzidas por ferramenta. Os resultados de rugosidade obtidos pelas ferramentas comerciais sem revestimento não foram satisfatórios, e visando reduzi-los, a geometria destes alargadores foi alterada. O aumento da largura das guias mostrou-se efetivo, reduzindo os valores do parâmetro de rugosidade  $R_a$  em quase 50%. Em relação às ferramentas comerciais revestidas, observou-se pequena redução de rugosidade em relação aos alargadores não revestidos, entretanto, foram observados furos com erros de cilíndricidade excessivamente elevados. Esta característica decorre provavelmente dos maiores esforços de usinagem gerados pelo maior raio de arredondamento dos gumes, devido à deposição da camada de revestimento.

**Palavras-chave:** alargamento, ferro fundido GG25, geometria de alargadores.

## **ABSTRACT**

*An analysis of gray cast iron reaming process of an automotive supplying company is carried out in this work. In some products the diameter and surface roughness tolerances are difficult to achieve using reamers. Tool life tests had been done, observing the evolution of the tool wear, cutting forces, in addition of the measurement of the produced parts quality. To reproduce the conditions used in a company, tests had been performed in the shop floor, except the measurements of cutting forces. It was verified that the employed process was very unstable, with poor repeatability of results. In order to identify the possible causes, complementary tests had been carried out, evaluating the results obtained with different types of reamers. Tipped carbide tools manufactured by the company and also commercial cemented carbide tools, coated and without coating (TiNAl) were tested. The tools produced by the company, low standardization of sharpening was observed, causing different levels of surface roughness and number of parts produced per tool. The results of surface roughness of the uncoated commercial tools weren't satisfactory, and in order to reduce them, the geometry of these reamers was modified. The increase of the guides width revealed effective, reducing the values of the parameter Ra in almost 50%. Related to coated commercial tools, small reduction of surface roughness in relation to the reamers without coating was observed, however, holes with excessive errors of cylindricity had been observed. This characteristic elapses probably because of the higher levels of machining forces generated by the bigger cutting edges radius, due to deposition of the coating layer.*

**Keywords:** *reaming, GG25 gray cast iron, reamers geometry*

# 1 INTRODUÇÃO

A operação de alargamento é uma alternativa para proporcionar melhor qualidade ao furo em relação ao que é possível de se obter pelo processo de furação. É utilizado na produção de componentes que exigem boa qualidade com custo relativamente baixo, comparado aos demais processos de obtenção de furos de precisão. Um exemplo da aplicação do processo de alargamento é a produção de blocos e cabeçotes de motores para veículos, onde diversos furos necessitam deste processo.

Sendo uma operação de acabamento, é realizada nas etapas finais da linha de produção. Assim, problemas nesta etapa levam à perda de todos os processos anteriores de fabricação de um determinado componente.

O presente trabalho foi realizado em parceria com uma empresa metalúrgica, que tinha por objetivo melhorar o processo utilizado na fabricação de um de seus produtos. O alargamento é uma das operações empregadas para que possam ser atingidos os requisitos exigidos pelos seus clientes. Entretanto, verificam-se algumas dificuldades para manter a estabilidade do processo, em função da qualidade das peças e consumo de ferramentas.

As ferramentas utilizadas são produzidas pela ferramentaria da própria empresa, que objetiva substituí-las por alargadores comerciais. Contudo, fabricantes especializados não têm tido sucesso na confecção de ferramentas adequadas, pois não atingem os requisitos de rugosidade.

Diante destas dificuldades, concretizou-se uma parceria com a Universidade Federal de Santa Catarina, através do Laboratório de Mecânica de Precisão – LMP, para a realização de um estudo sobre o processo.

Neste sentido, o objetivo deste trabalho é buscar um melhor entendimento do processo em questão, avaliando a contribuição de fatores que alteram a qualidade das peças e estabilidade do processo. Avaliando principalmente os fatores que atuam na obtenção dos requisitos de rugosidade, visando a substituição de ferramentas de fabricação própria por alargadores comerciais. Este trabalho apresenta uma metodologia para a abordagem de um problema real, onde são propostos e realizados alguns ensaios experimentais.

O enfoque principal deste trabalho é estudar a influência da geometria e padronização das ferramentas sobre o resultado dos ensaios. Entretanto são apresentados outros aspectos e deficiências observadas no processo.

Apesar de ter grande influência sobre a qualidade das peças, não é objetivo deste trabalho a avaliação da influência de diferentes tipos de meios lubri-refrigerantes. Foi utilizado apenas um tipo de fluido de corte em todos os ensaios realizados.

Foram também realizados ensaios de vida de ferramentas e ensaios com variação de parâmetros de corte. Nos ensaios de vida, foram monitoradas as componentes da força de usinagem (Força de avanço e Momento torçor), e as marcas de desgaste foram registradas por imagens digitais. Nos ensaios de variação de parâmetros de corte, foram analisadas 5 diferentes tipos de alargadores, sendo um fabricado pela própria empresa, e os restantes produzidos por duas empresas fornecedoras de ferramentas de corte.

A qualidade dos furos produzidos foi avaliada em função da circularidade, cilindricidade, diâmetro e rugosidade (parâmetro  $R_a$ ). Foi dada atenção especial aos dois últimos, pois são os parâmetros de controle da linha de produção. A faixa de tolerância para os valores testados de diâmetro é de  $22 \mu\text{m}$  e o valor máximo de rugosidade  $R_a$  admissível é  $2 \mu\text{m}$ .

Também foram levantadas algumas informações importantes, quantificando dados como, por exemplo, o número de peças produzidas por ferramenta, e motivo da sua troca (critério de fim de vida da ferramenta).

Foi realizada uma avaliação das ferramentas produzidas pela própria empresa, sendo verificada falta de repetitividade de algumas características. Em relação às ferramentas comerciais, foi identificado que uma das principais falhas é a falta de estabilidade na capacidade de atender às exigências de rugosidade.

Com base nos ensaios realizados, observações nas ferramentas e relações com a qualidade das peças, foi possível sugerir mudanças nas ferramentas. Tais alterações foram implementadas e mostraram-se eficientes, reduzindo-se significativamente os valores de rugosidade.

Neste trabalho descreve-se a metodologia empregada em cada uma das análises realizadas, bem como a avaliação dos resultados. Com isso, tem-se um potencial a ser explorado no sentido de melhorar o processo ou adequá-lo a eventuais novas necessidades.

## 2 ESTADO DA ARTE

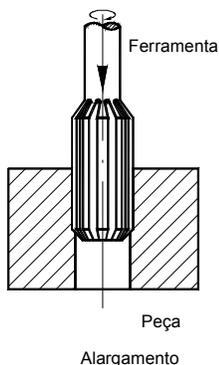
### 2.1 O Processo de Alargamento

Alargamento é um processo de usinagem de precisão, com ferramenta de geometria definida, que tem por objetivo proporcionar um aumento no diâmetro e a melhoria na qualidade da superfície e na geometria dos furos, sem que a sua forma e posição sejam alterados. Nas operações de alargamento, o movimento de rotação da ferramenta (alargador) e/ou da peça associado a um avanço relativo entre elas produz uma pequena remoção de material das paredes do furo [1-5].

A precisão dos furos e a qualidade da superfície alargada dependem das condições iniciais do furo, da rigidez da máquina e das fixações da peça e da ferramenta, da velocidade de corte e avanço corretos, do emprego de fluido de corte conveniente aplicado de maneira adequada, do material e da geometria do gume da ferramenta apropriados ao material da peça e do estado de afiação da ferramenta [6].

Os furos a serem alargados devem possuir circularidade, reticidade e acabamento adequados, já que a remoção de material deve ser pequena e uniforme. A tendência da ferramenta é seguir a linha de centro do furo. Furos mal preparados resultam em desgaste ou até quebra da ferramenta [6].

Os alargadores, ferramentas de corte empregadas no alargamento (Figura 2.1), possuem a capacidade de se “auto-posicionarem” durante a usinagem. Essa característica permite que o alargamento de furos muito longos e de pequeno diâmetro possam ser realizados na maior parte das máquinas disponíveis, reduzindo o investimento em maquinário [2, 6, 7].



**Figura 2.1 – Ferramentas de alargamento [8]**

Embora o alargamento e a furação possam ser realizados no mesmo tipo de equipamento [3, 8, 9], recomenda-se a utilização de suportes pendulares para compensar um eventual desalinhamento entre o furo e o alargador em caso de troca da fixação entre a execução das duas operações [8].

O diâmetro final usinado nos furos será maior do que o diâmetro do alargador e diretamente proporcional à espessura de material retirada. A quantidade de metal a ser removida exerce influência sobre a precisão dimensional dos furos. A remoção de grandes espessuras pode resultar em furos acima do diâmetro ou com excessiva rugosidade [3, 6]. A Tabela 2.1 indica os valores recomendados para as sobremedidas de furos em cada diâmetro. Os valores citados referem-se a alargadores fixos de aço-rápido. Para alargadores ajustáveis as sobremedidas sugeridas devem ser reduzidas à metade [6].

**Tabela 2.1 – Sobremedidas recomendadas para alargamento de furos [6]**

Diâmetro do furo [mm]	Sobremedida [mm] (aço e ferro fundido)	Sobremedida [mm] (zinco, cobre e ligas de alumínio)
até 5	0,1 – 0,2	0,5
5 - 20	0,2 – 0,3	0,6 – 0,8
20 – 50	0,3 – 0,5	--
mais que 50	0,5 – 1,0	--

## 2.2 Alargadores

Os alargadores são as ferramentas de corte utilizadas no alargamento. Podem ser produzidos com uma diversidade de materiais e de formas, sendo constituídos de dois elementos fundamentais: os de usinagem e os de guia da ferramenta no furo.

Os materiais mais utilizados são o aço-rápido e o metal-duro, sendo possível o emprego de insertos de PKD, Cermets etc, de modo que existem alargadores maciços, com insertos brasados e com insertos intercambiáveis. A intercambialidade do inserto pela escolha adequada do substrato, revestimento e geometria permite a adequação da ferramenta aos mais diversos materiais e tarefas de usinagem [1].

Quanto à forma, distinguem-se os alargadores de gume único e os de múltiplos gumes. Nas ferramentas de gume único as tarefas de corte e guia do alargador no furo são divididas em dois elementos distintos (Figura 2.2), enquanto que nos de corte múltiplo a ferramenta é guiada pelos gumes [2, 8]. Os alargadores de acabamento apresentam um número maior de gumes, o qual depende do tipo de ferramenta e do diâmetro e material da peça [10].

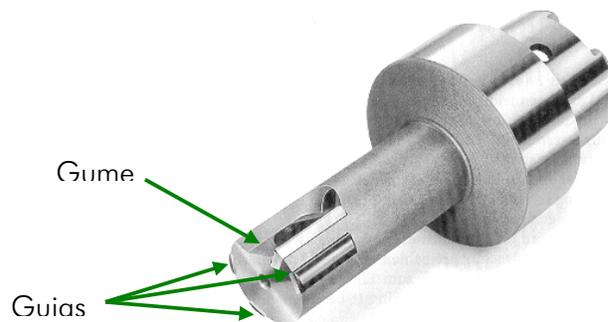


Figura 2.2 – Alargador de um gume com três réguas na periferia [1]

As guias dos alargadores têm a função de compensar a ação da força de corte e da força passiva. Os elementos de guia se apóiam na parede do furo e assim impedem a deflexão da ferramenta decorrente da força de usinagem. As guias podem apresentar afiação circular ou chanfrada. Embora a afiação chanfrada permita um melhor acabamento do furo, o maior desgaste na superfície de saída (passagem do gume principal para secundário) acarreta uma vida mais curta [10]. As velocidades de corte para os alargadores de gume único se situam acima das empregadas em alargadores convencionais de gumes múltiplos [2].

Como forma de evitar o “engripamento” do gume secundário e melhorar o acabamento da superfície, o diâmetro de corte dos alargadores se reduz da entrada em direção à haste. Esta redução depende do material da peça, das dimensões do furo e do comprimento do alargador, e geralmente é da ordem de 0,015 a 0,025 mm para cada 100 mm de comprimento de corte no caso de alargadores convencionais [10, 8] e de 0,070 a 0,100 mm para cada 100 mm de comprimento de corte, no caso de alargadores de gume único regulável com inserto intercambiável.

Neste processo, os furos apresentam valores de diâmetro maiores do que o diâmetro das ferramentas. Este fato deve ser levado em consideração durante a escolha do valor do diâmetro da ferramenta. O maior diâmetro admissível para o alargador é em torno de 15% abaixo da dimensão máxima da respectiva tolerância do furo (0,15 IT), e o menor diâmetro fica em torno de 35% abaixo do diâmetro máximo da respectiva tolerância do furo (0,35 IT) [8].

Stemmer [6] observa que um acabamento refinado do gume em ferramentas de alargar tem notável efeito sobre a vida das mesmas, sendo observado um aumento da vida na ordem de dez vezes para ferramentas lapidadas em relação às retificadas.

### **2.2.1 Nomenclatura dos alargadores**

A Figura 2.3 apresenta um desenho esquemático de um alargador, representando a nomenclatura de suas partes [11].

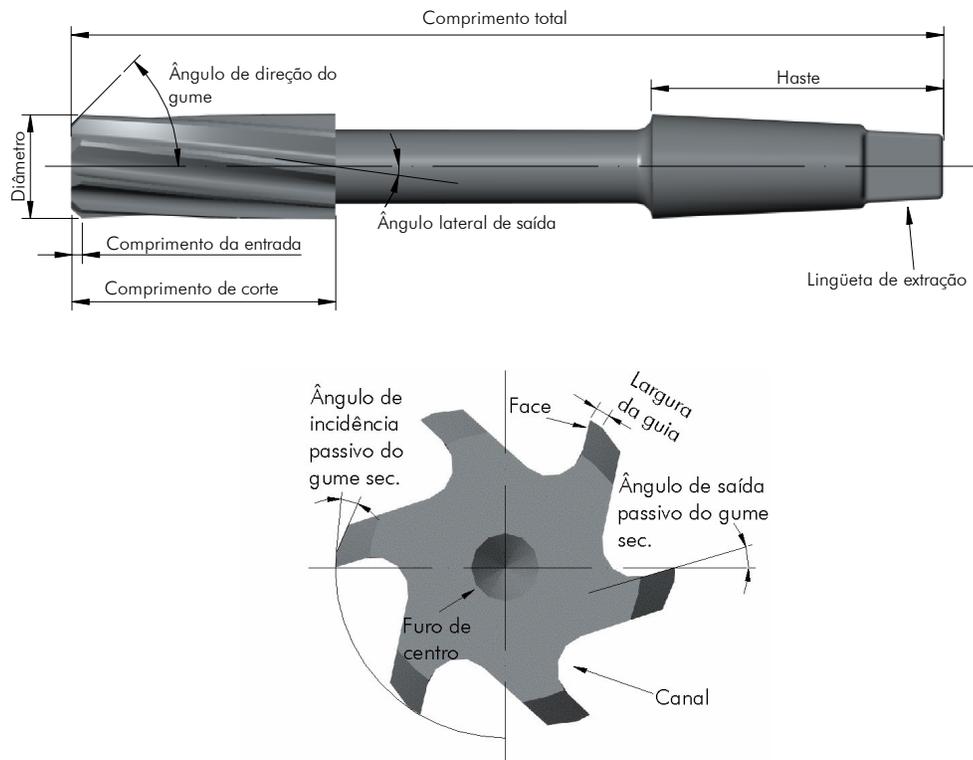


Figura 2.3 – Nomenclatura de alargadores [11]

## 2.2.2 Geometria dos alargadores

A seguir são apresentados os principais ângulos presentes nos alargadores, e suas representações, na Figura 2.4.

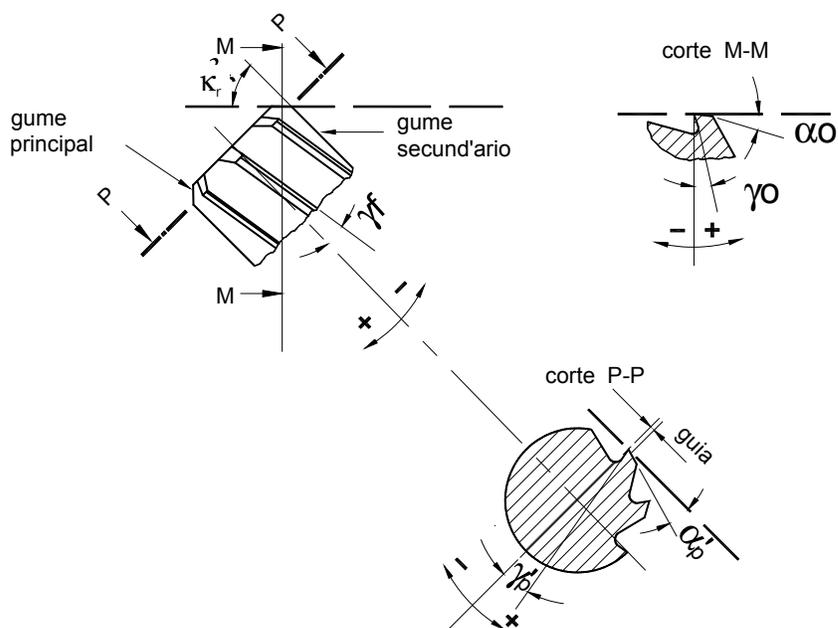


Figura 2.4 – Geometria de alargadores [11, 12]

a) **Ângulo de saída ortogonal ( $\gamma_0$ )** – forma-se do ângulo de direção do gume  $\kappa_r$ , do ângulo de saída do gume secundário  $\gamma'_p$  e do ângulo de saída lateral  $\gamma_f$ .

b) **Ângulo de direção do gume ( $\kappa_r$ )** – varia de 20' a 30' para alargadores manuais, de 1° a 2° para alargadores de desbaste e nos alargadores para máquinas é de 45°.

c) **Ângulo de saída passivo do gume secundário ( $\gamma'_p$ )** – varia geralmente entre 0 e 15°.

d) **Ângulo de saída lateral (ângulo de hélice) ( $\gamma_f$ )** – varia de 0° nos alargadores de gumes retos a mais de 30° em alargadores helicoidais de desbaste.

e) **Ângulo de incidência ortogonal ( $\alpha_0$ )** – deve ser suficiente para que com um avanço normal a cunha cortante tenha um corte livre.

f) **Ângulo de incidência passivo do gume secundário ( $\alpha'_p$ )** - deve ter aproximadamente de 8° a 10°. A sua grandeza depende da largura da guia e do diâmetro do alargador.

### 2.2.3 Classificação dos alargadores

Os alargadores podem ser classificados conforme apresentados a seguir.

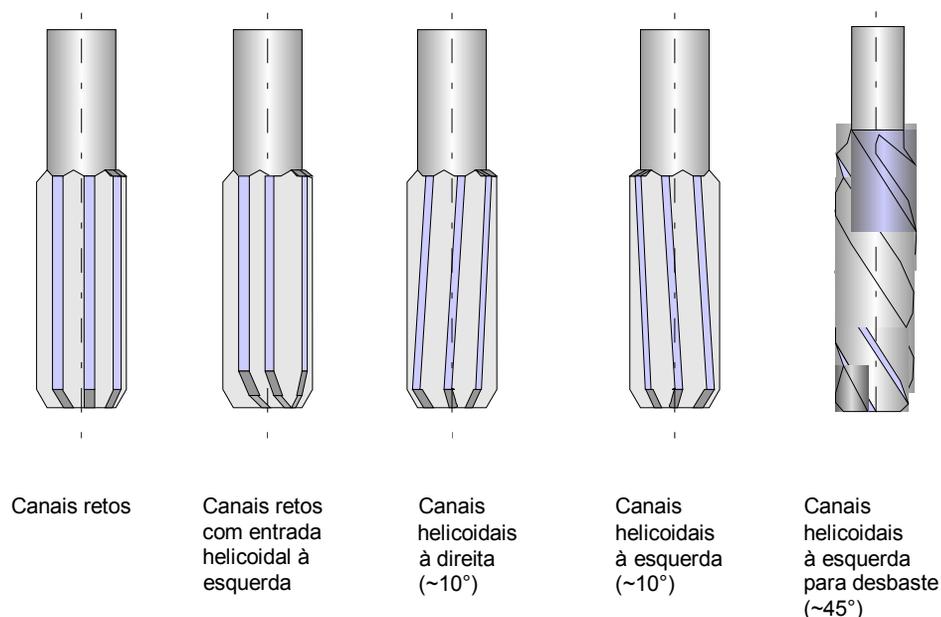
#### a) Quanto ao tipo de operação

Podem ser de desbaste ou acabamento. Os alargadores de desbaste são empregados no alargamento de furos em bruto, como os obtidos por fundição ou forjamento, com o objetivo de melhorar as tolerâncias e o acabamento. A sua forma é semelhante à das brocas helicoidais, mas sem a presença do gume transversal, e o número de gumes varia de 3 a 4 [10, 6].

Os alargadores de acabamento proporcionam furos calibrados, com exigências quanto ao acabamento e à tolerância de forma e de medida. Outros processos de acabamento, como a furação de precisão e a retificação são capazes de proporcionar superfícies de qualidade superior. Assim sendo, a utilização de alargadores de acabamento se justifica na produção em série, já que com um alargador pode ser sucessivamente acabado um grande número de furos [10] e o trabalho pode ser feito em centros de usinagem [9].

#### b) Quanto ao tipo de dentes (canaís)

Podem ser de dentes retos ou helicoidais (Figura 2.5). Os alargadores de dentes retos apresentam menores custo e maior facilidade de afiação, e seu uso traz melhores resultados nos trabalhos de precisão [1, 6, 8].



**Figura 2.5 – Tipos de canais em alargadores [11]**

Os alargadores de dentes helicoidais devem ser utilizados no caso de alargamento de furos com interrupções na parede (rasgos de chaveta, furos, fendas). Os alargadores helicoidais podem ter a hélice à direita ou à esquerda. A hélice é direita quando, olhando-se o alargador de cima, na direção normal ao eixo, a hélice se desenvolve para a direita [6, 10].

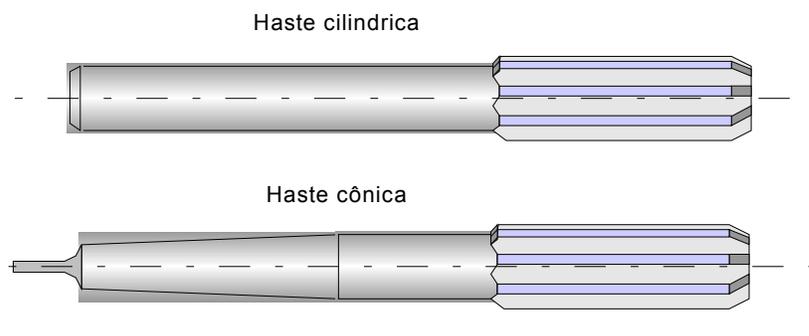
O sentido da hélice, em relação ao sentido de rotação da ferramenta, exerce influência no valor da força de avanço da ferramenta (sentidos concordantes reduzem a força de avanço). Assim, é aconselhável adotar sentidos discordantes para metais leves e aço baixo carbono e sentido concordante para aços duros. Na usinagem de ferro fundido e bronze devem ser empregados dentes retos [10]. A Tabela 2.2 apresenta os valores de ângulo de inclinação da hélice para alargadores de acabamento.

**Tabela 2.2 – Ângulos de inclinação da hélice [10]**

Material	Ângulo de hélice [°]	Sentido da hélice	Sentido da rotação
Metais leves	20	Esquerda	direita
Aço ( $\sigma_t$ 40 kg/mm <sup>2</sup> )	8	Esquerda	direita
Aço ( $\sigma_t$ 50 – 90 kg/mm <sup>2</sup> )	6	Direita	direita
Aço ( $\sigma_t$ 90 kg/mm <sup>2</sup> )	9	Direita	direita
Ferro fundido e bronze	0	Reta	direita

### c) Quanto à fixação

Podem ter haste cônica ou cilíndrica, conforme a Figura 2.6.



**Figura 2.6 – Tipos de fixação de alargadores**

#### **d) Quanto ao sentido de corte**

Podem ser de corte à direita ou à esquerda. O sentido de corte é verificado olhando o alargador de topo, posicionando-o horizontalmente com relação ao observador. Se o dente inferior corta da esquerda para a direita, o corte é à direita. Neste caso, o alargador observado de topo corta em sentido anti-horário. Caso contrário, o corte é à esquerda [2].

Geralmente os alargadores são de corte à direita. Dessa maneira, o uso de uma hélice esquerda faz com que o cavaco seja empurrado para frente, evitando danos à superfície já usinada. Além disso, ocorre um empuxo axial que fixa melhor a ferramenta no cone e elimina eventuais folgas da máquina. A pressão adicional exercida e o sentido de hélice contrário ao sentido de corte reduzem a tendência da ferramenta a desenvolver um maior avanço quando uma região de corte mais fácil é encontrada. Se a máquina utilizada não estiver em ótimas condições, recomenda-se o emprego desse tipo de alargador.

O corte com alargadores à direita com hélice à direita faz com que o cavaco seja puxado para cima onde, se penetrar entre as paredes do furo e as guias do alargador, pode provocar arranhões. A força é no sentido de arrancar a ferramenta do mandril, o que faz com que esse tipo de alargador seja utilizado somente no alargamento de furos cegos, nos quais o cavaco jogado para frente não teria lugar para se alojar [1, 6, 13].

As ferramentas de alargar só devem ser giradas na direção do corte, mesmo ao retirá-las do furo. Girá-las para trás pode provocar a quebra dos dentes [6].

#### **e) Quanto ao uso**

Podem ser manuais ou de máquina (Figura 2.7). Os alargadores manuais possuem um chanfro secundário de entrada para servir como guia e facilitar a entrada da

ferramenta no furo, não realizando corte. O chanfro secundário abrange cerca de um quarto do comprimento do alargador [6]. Em geral, o número de gumes nos alargadores manuais é maior, quando comparado ao alargador de máquina de igual diâmetro [10].

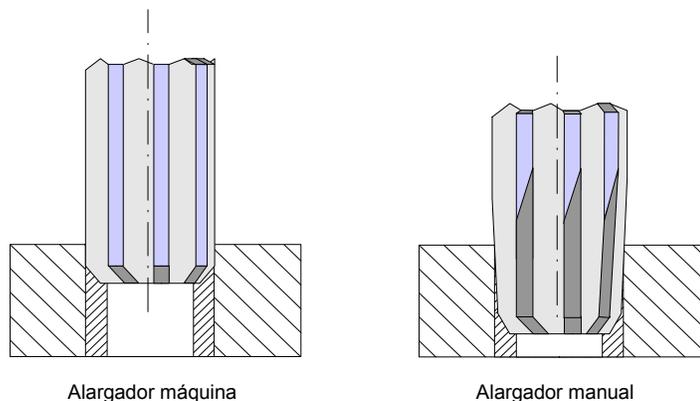


Figura 2.7 – Alargadores de máquina e manual [6]

#### f) Quanto à regulagem

Podem ser fixos ou ajustáveis. Nos alargadores fixos a ferramenta corta sempre com o mesmo diâmetro. Nos ajustáveis é possível variar o diâmetro dentro de uma certa faixa de valores, através de uma regulagem radial dos gumes [2, 8].

#### g) Quanto à geometria dos furos

Podem ser cônicos ou paralelos. Os alargadores cônicos são utilizados para tornar cônicos furos para pinos ou cones Morse. Podem ser de desbaste, semi-acabamento ou acabamento, sendo que os de desbaste possuem rasgos para a quebra de cavaco [6].

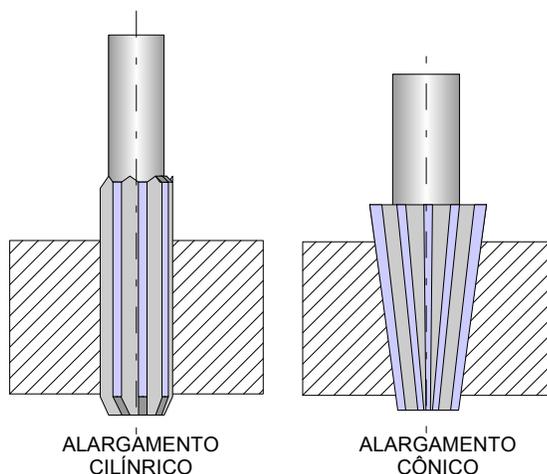
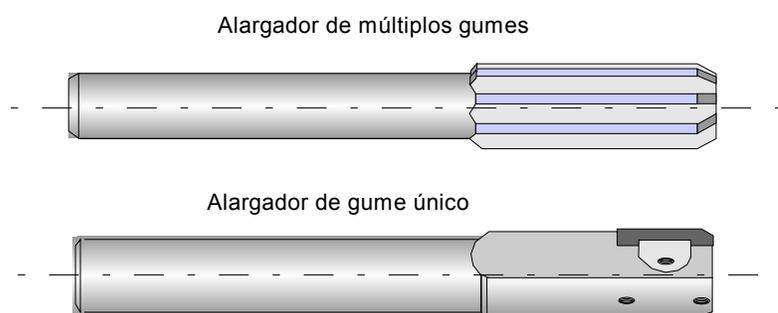


Figura 2.8 – Alargamento cilíndrico e cônico

#### h) Quanto ao número de gumes

Geralmente possuem número par de gumes [5], contudo podem ser de corte único (um gume) ou de corte múltiplo (vários gumes). Com a finalidade de diminuir as forças de corte por gume e melhorar o acabamento da superfície é desejável um grande número de gumes. No entanto, o aumento do número de gumes faz elevar o atrito nas paredes internas do furo, prejudicando o processo e favorecendo o “engripamento” da ferramenta. Isso torna a formação do cavaco desfavorável e dificulta a sua saída, já que o aumento do número de gumes conduz à redução do tamanho dos canais de saída do cavaco [10].



**Figura 2.9 – Alargador de gume único e de múltiplos gumes**

Nos alargadores de gume único, as funções de guiagem da ferramenta e de corte são realizadas por dois elementos distintos, as guias e o gume, respectivamente. Geralmente, o gume é montado na forma de inserto intercambiável e ajustável. A presença de apenas um gume mantém os valores de avanço por rotação baixos. Entretanto, a produtividade é compensada pelo aumento da velocidade de corte, podendo chegar a  $v_c=500$  m/min para aços Shroer [14] *apud* Weinert [15].

Existe uma condição ótima para o número de gumes de um alargador para cada diâmetro. A Tabela 2.3 apresenta o número de gumes recomendado para alargadores de acabamento [10]. Quando se deseja obter furos com bom acabamento e tolerâncias pequenas é recomendado o uso de alargadores com número ímpar de gumes [13].

Tabela 2.3 – Número de gumes em alargadores de acabamento [10]

Diâmetro [mm]	Número de gumes (aço, ferro fundido e bronze)	Número de gumes (alumínio)
até 12	4 – 6	4
12 – 20	6 – 8	4 – 6
20 – 30	8 – 10	6 – 8
30 – 40	10 – 12	6 – 8
40 – 50	12 – 14	8 – 10
50 – 60	14 – 16	8 – 10
60 – 100	16 – 20	10 – 12

Para evitar o aparecimento de vibrações durante o corte, a divisão dos gumes ao longo da circunferência do alargador não deve ser constante; isto é, a distância entre dois gumes sucessivos na periferia do alargador deve ser variada (Figura 2.10) [1, 6]. A ocorrência de uma eventual vibração periódica pode ter dependência do número de gumes e da rotação, e conduziria ao aparecimento de marcas de trepidação na parede do furo, devido a vibrações regenerativas. No caso de ferramentas de passo variado é recomendado que os gumes sejam, dois a dois, diametralmente opostos, de forma a permitir a medição do diâmetro em qualquer posição [6, 10].



Figura 2.10 – Divisão com passos desiguais entre os gumes [6]

#### i) Quanto à forma de entrada

Podem ter a entrada variada, conforme mostrado na Figura 2.11, sendo que o diâmetro de entrada de um alargador deve ser em torno de 93 a 98% do diâmetro nominal [6]. Podem ter um segundo chanfro, com ângulo entre 1 e 10 graus localizado imediatamente após o primeiro chanfro.

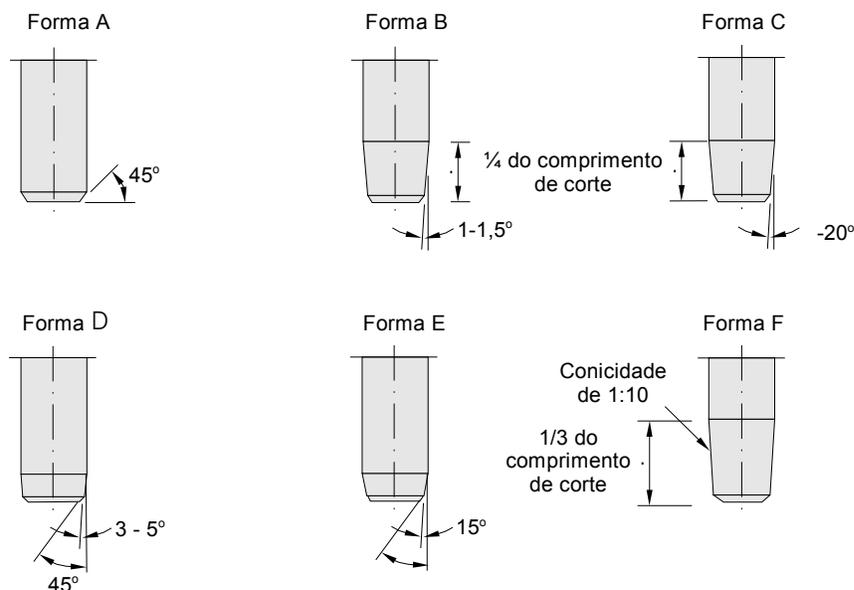


Figura 2.11 – Formas de entrada de alargadores [6, 11]

## 2.2.4 Parâmetros de corte no alargamento

Dentre os fatores que devem ser observados para um alargamento eficiente e economicamente viável estão a velocidade de corte, o avanço e o fluido de corte a serem empregados [8].

### a) Velocidade de corte

A velocidade de corte utilizada nas operações de alargamento depende do material do alargador e da peça, do tipo de alargador empregado, da quantidade de material a ser removido e do acabamento desejado. Sua influência é marcante na qualidade da superfície do furo e na vida da ferramenta [16].

Para a escolha da velocidade de corte devem ser consideradas a dureza e usinabilidade do material [13]. Geralmente a velocidade de corte utilizada deve estar entre 65 e 75% da equivalente para a furação do mesmo material. Quanto maior a quantidade de metal a ser removida, menor deve ser a velocidade.

Baixas velocidades de corte diminuem a produtividade sem que haja um aumento significativo na vida da ferramenta, enquanto que velocidades muito elevadas podem provocar maior desgaste e quebra de gumes devido às elevadas temperaturas, assim como superfícies mais rugosas [2, 8, 16].

A velocidade de corte para alargadores de desbaste deve ser da ordem de 25% das velocidades utilizadas para desbaste em tornos, para o mesmo material [6].

### **b) Avanço**

O avanço tem influência direta no desgaste dos gumes. O aumento do avanço eleva as componentes da força de usinagem de maneira proporcional [16]. A escolha do avanço depende principalmente do tipo de alargador usado, da sobremedida de usinagem e do acabamento desejado. Quanto maior a sobremedida de usinagem, menor deve ser o avanço [2], ao mesmo tempo que elevadas velocidades de corte requerem avanço elevado para evitar vibrações [13].

Os valores de avanço para o alargamento são de duas a três vezes maiores do que os avanços para furação do mesmo material [3]. Na usinagem com ferramentas de aço-rápido o avanço (em mm) usado para a maioria dos materiais é de 1% do diâmetro do furo, reduzindo-se progressivamente até 0,5% para furos maiores do que 50 mm [8]. Um bom acabamento é alcançado com avanços uniformes [6].

Avanços muito elevados aumentam a vida da ferramenta, mas podem ocasionar marcas espirais na parede do furo e um acabamento ondulado [2, 8], além de solicitarem muito o alargador [10]. Baixos avanços provocam o desgaste excessivo da ferramenta, resultando num melhor acabamento. No caso de avanços muito baixos e sobremedidas de usinagem demasiadamente pequenas, o excessivo desgaste da ferramenta está associado ao corte irregular do metal, uma vez que o material apenas atrita ou é amassado pelo gume. Dessa forma, recomenda-se que sejam utilizados os maiores avanços possíveis [16].

### **c) Fluido de corte**

Para as operações de alargamento, a seleção do fluido de corte é feita baseando-se principalmente no acabamento da superfície que este fluido permite, e não tanto devido às suas propriedades refrigerantes [6].

Segundo Miller [13], o uso de óleos emulsionáveis em um sistema de aplicação com vazão constante é recomendado na maioria dos metais – óleos sulfurosos para aço inox e algumas ligas, e querosene para alumínio. Já um fabricante [16] afirma que em vários casos as emulsões proporcionam melhores resultados do que óleos de corte viscosos, já que aqueles são menos espessos e capazes de penetrar mais profunda e uniformemente no furo.

A escolha do fluido de corte no alargamento é feita baseada nas características de lubrificação exigidas pela geometria do alargador. Alargadores convencionais permitem o uso de emulsão com 7 a 15% de óleo, ao passo que alargadores de gume único normalmente exigem o emprego de óleos integrais ou sintéticos, podendo também trabalhar com emulsões com mais de 12% de óleo.

## 2.3 Materiais para Alargadores

Existe uma série de materiais que podem ser empregados na fabricação de ferramentas de corte, tais como: aços-ferramenta, aço-rápido, stellite, metal-duro, cerâmicas, CBN e diamante. Esses materiais podem ser empregados tanto na forma de insertos como integralmente. Os principais requisitos para um material de alargador são:

- Tenacidade;
- Resistência à compressão;
- Resistência à abrasão;
- Resistência térmica (dureza a quente e choque térmico); e
- Resistência ao choque e fadiga.

### 2.3.1 Metal-duro

O metal-duro, material empregado nos alargadores deste trabalho, é um importante material para ferramentas utilizado na indústria moderna, devido à combinação de dureza à temperatura ambiente e dureza a quente, resistência ao desgaste e tenacidade, combinação possível de se obter pela variação de sua composição. É um produto da metalurgia do pó, designado também algumas vezes como carboneto de tungstênio sinterizado. Os seus constituintes fundamentais são misturados na forma de pó e submetidos a um processamento que compreende compressão, sinterização e retificação, resultando um produto consolidado e denso, com as características de resistência mecânica, dureza e tenacidade adequadas para o emprego em ferramentas de corte [17].

O metal-duro é formado basicamente por dois constituintes:

a) Um carboneto extremamente duro e de alta resistência ao desgaste, como o carboneto de tungstênio, de titânio e de tântalo, entre outros;

b) Um elemento aglomerante ou ligante, normalmente um metal do grupo do ferro, usualmente o cobalto.

## 2.4 Revestimentos para Alargadores

O uso de revestimentos tem com função a redução de atrito e a proteção contra a abrasão e isolamento térmico do material de base da ferramenta.

A aplicação de revestimentos é realizada normalmente pela precipitação de materiais duros na fase de vapor. Os processos principais são a Deposição Química de Vapor (CVD) e a Deposição Física de Vapor (PVD).

As principais características dos revestimentos obtidos em processo de deposição por vapor são sua espessura, rugosidade, dureza, resistência e adesão. A espessura desses revestimentos está na faixa de 1 a 10  $\mu\text{m}$ , o que não afeta dimensionalmente as ferramentas para aplicações de pouca precisão. A tendência ao arredondamento do gume não é crítica para grandes espessuras de usinagem.

Devido às temperaturas envolvidas, os processos PVD e CVD são adequados para o revestimento de aço-rápido e metal-duro, respectivamente. Em metais-duros os revestimentos de TiC, TiCN, TiN e  $\text{Al}_2\text{O}_3$  e suas combinações são normalmente aplicados por CVD.

Em decorrência do revestimento, têm-se dois fatores influentes sobre a temperatura dos cavacos e sobre o fator de recalque na região de cisalhamento. O coeficiente de atrito entre o cavaco e a ferramenta revestida é menor que com a ferramenta não revestida, diminuindo assim o trabalho de atrito na face da ferramenta. Isto leva a uma diminuição do fator de recalque, menor força de usinagem e conseqüentemente menor potência de usinagem, bem como a distribuição do calor gerado no processo. Devido à diminuição do coeficiente de atrito ocorrerá uma distribuição do pico da temperatura na região de contato entre cavaco e a face da ferramenta. No entanto, devido à pequena condutividade térmica da camada de revestimento, ocorre uma diminuição da transferência de calor para a ferramenta, sendo esta maior para o cavaco.

A diminuição da quantidade de calor conduzida para a cunha cortante permite uma melhor exploração das características térmicas da ferramenta pelo aumento da velocidade de corte, do avanço ou ambos [17].

Atualmente existe uma grande variedade de revestimentos disponíveis no mercado, o que possibilita a obtenção de furos mais precisos e de melhor qualidade conforme a aplicação e exigência na indústria.

#### 2.4.1 Tipos de Revestimentos

Dentre os diversos tipos de revestimentos, pode-se citar como principais [1, 2, 18-20]:

**a) Carboneto de titânio (TiC):** o carboneto de titânio é geralmente depositado por CVD e se caracteriza por ser um material duro que fornece resistência ao desgaste por abrasão. Sendo quimicamente inerte, forma uma barreira térmica e química entre o cavaco e a ferramenta. O TiC possui um baixo coeficiente de atrito e de condutividade térmica, reduzindo a temperatura no gume e conseqüentemente diminuindo o efeito da difusão entre ferramenta e peça .

**b) Nitreto de titânio (TiN):** a economia e o aumento de produtividade alcançados com revestimento de TiN têm se mostrado significativos devido às seguintes vantagens:

- possui bom desempenho em quase todas as aplicações e materiais usinados;
- sua coloração permite uma fácil verificação de desgaste;
- seu preço é acessível.

O TiN facilita a saída do cavaco, diminuindo a temperatura gerada na remoção de material, o desgaste abrasivo de flanco e a formação do gume postiço. O baixo coeficiente de atrito confere à ferramenta uma resistência ao desgaste de cratera.

**c) Carbonitreto de titânio (TiCN):** este revestimento combina o baixo coeficiente de atrito do TiN com dureza, capacidade de dissipação de calor e resistência ao desgaste, superando o desempenho do TiN em aplicações onde o avanço e a velocidade de corte são severas .

**d) Nitreto de alumínio-titânio (TiAlN):** Com o desenvolvimento dos sistemas de camadas (Ti, Al)N foram feitos ensaios para melhorar a resistência à oxidação, a dureza a quente e as propriedades de resistência ao desgaste em relação às camadas conhecidas

até o momento. Comparadas com as camadas de TiN e Ti(C,N), as camadas (Ti, Al)N possuem maior resistência à oxidação para uma mesma dureza. O campo de aplicação de metais duros revestidos por (Ti, Al)N é a usinagem com grandes solicitações térmicas na ferramenta. Principalmente na furação sem meios lubri-refrigerantes, furações profundas ou furações com pequenos diâmetros, ocorre um grande aumento da produtividade. Camadas de (Ti, Al)N podem apenas ser depositadas por processo PVD.

## 2.5 Meios Lubri-refrigerantes

O uso de meios lubri-refrigerantes, também conhecidos por fluidos de corte, começou a ser difundido a partir da Revolução Industrial, em meados do século XVIII. Em 1868, W. H. Northcott observou que o uso de óleos como meios lubri-refrigerantes possibilitava um incremento na velocidade de corte e no tempo de vida da ferramenta e uma redução no consumo de energia pela máquina. Já em 1883, Taylor demonstrou que o uso da água como fluido de corte possibilitava um aumento de até 40% nas velocidades de corte, devido às suas propriedades refrigerantes [21].

Entretanto, logo percebeu-se algumas falhas no uso da água, tais como baixa lubrificação e corrosão da ferramenta e da peça. Para atenuar o problema, tentou-se o uso de carbonato de sódio e fosfatos, sem êxito. No intuito de diminuir o atrito entre a peça, o cavaco e a ferramenta, devido à boa capacidade de lubrificação, eram usados os óleos minerais integrais e os óleos graxos. Contudo, serviam apenas para baixas velocidades de corte, por não possuírem bom desempenho na refrigeração [4, 21].

Visando atender ambas as necessidades, refrigeração e lubrificação, foram desenvolvidos, por volta de 1920, os óleos minerais solúveis, à base de água. Apresentavam bom desempenho, aproveitando as propriedades refrigerantes da água e lubrificantes do óleo, além de versatilidade (a taxa de diluição pode ser ajustada dependendo das condições de corte,) e economia (com a diluição, o fluido de corte se tornava mais barato) [21].

No entanto, os óleos solúveis são muito suscetíveis ao ataque de bactérias, o que causa odores desagradáveis, quebra da emulsão e redução do pH. Por volta de 1950, surgiram os fluidos sintéticos, nos quais, na ausência de óleo mineral, são adicionados polímeros à água, tais como nitritos alcalinos, aminas orgânicas e ácidos orgânicos amino-neutralizados, provendo boa refrigeração e lubrificação adequada. Além disso,

são estáveis, limpos e duram mais (por serem mais resistentes ao ataque de microorganismos). Mesmo assim, apresentavam defeitos como a remoção do óleo nos barramentos e guias, causando problemas operacionais na máquina, problemas de pele nos operadores, corrosão e danos à pintura da máquina [21, 22].

Os problemas devido ao uso de fluidos sintéticos, principalmente os danos à máquina, levaram ao desenvolvimento de fluidos semi-sintéticos, que possuem cerca de 20% de óleo hidrocarbonado em sua composição. Devido ao acréscimo de óleo mineral, a resistência ao ataque de microorganismos foi reduzida. Atualmente, este tipo de fluido é muito utilizado [21, 22].

Nos últimos anos, devido às legislações ambientais e trabalhistas mais rigorosas, o uso de certos aditivos vem sendo restringido, visando a substituição por outros, menos nocivos. É o caso das nitrosaminas e aromáticos polinucleares, substâncias cancerígenas, e alguns aditivos a base de boro [21].

### 2.5.1 Funções:

O fluido de corte possui quatro funções principais na usinagem [8, 19]:

- Lubrificação;
- Refrigeração;
- Prevenir a adesão (e a formação do gume postiço);
- Facilitar a expulsão do cavaco.

A propriedade lubrificante do fluido de corte possibilita a redução do atrito na região de contato entre a ferramenta e a peça e a ferramenta e o cavaco, reduzindo também a força de usinagem e possibilitando um melhor acabamento.

Quanto à refrigeração, com o uso de fluido de corte, podem ser aplicadas velocidades de corte maiores, sem o problema de superaquecimento da região de corte. Assim, evita-se erros dimensionais e de tolerância devidos à dilatação da peça e ao surgimento de tensões internas e deformações.

Os meios lubri-refrigerantes também são responsáveis por reduzir a taxa de adesão, evitando assim a formação de gume postiço. Isso possibilita o uso de uma geometria adequada, resultando num melhor acabamento [4].

Outra função é facilitar a expulsão dos cavacos, para que estes não risquem ou sejam aderidos à superfície usinada [23].

Os meios lubri-refrigerantes oferecem outros benefícios, tais como: redução da potência de corte (devido à uma melhor lubrificação da região de corte), aumento do tempo de vida da ferramenta (por tornar as condições de corte menos severas) e prevenir a corrosão durante a usinagem (por formar uma película protetora) [4].

Contudo, atualmente não basta que o fluido de corte cumpra apenas essas funções. Existem outras exigências que se fazem a ele, tais como:

- compatibilidade com a maioria das pinturas e vedações da máquina;
- fácil preparação;
- inofensivo ao meio ambiente e ao operador;
- pouca formação de espuma, mesmo sob alta pressão;
- fácil tratamento para o descarte ou reciclagem;
- baixo volume de resíduos provenientes do descarte;
- emulsões resistentes ao ataque de microorganismos e dos óleos contaminantes de processo, como os das guias e do barramento [19, 22].

Segundo Stemmer [19], além das características citadas, também devem apresentar:

- Boa transparência, para permitir a visualização do processo;
- Baixa inflamabilidade;
- Não possuir cheiro incomodativo;
- Poder de remover impurezas;
- Boa molhabilidade;
- Boa filtrabilidade;
- Resistência ao envelhecimento (não formar borras, oxidar, perder a estabilidade).

### 2.5.2 Tipos de fluidos de corte

Não há unanimidade a respeito da classificação dos meios lubri-refrigerantes. Uma das classificações usadas é [24]:

#### a) Óleos puros:

São fluidos de corte constituídos basicamente de óleo mineral, não misturado com água. Podem também apresentar uma grande porcentagem em aditivos. Estes aditivos

conferem diferentes propriedades ao fluido, sendo recomendados para aplicações específicas [24].

### **b) Emulsões**

Fluidos emulsificantes: também conhecidos como emulsões, conseguem compartilhar as propriedades refrigerantes da água com as propriedades lubrificantes do óleo. Principalmente usados a altas velocidades de corte e baixas pressões, podem ser adaptados para diversas condições de corte, alterando-se a sua concentração e incluindo-se aditivos, como os EP (aditivos de alta pressão). No entanto, são muito susceptíveis à deterioração biológica, exigindo boa limpeza na máquina e controle diário da emulsão. Empregam-se aditivos para evitar corrosão, biocidas que inibem o crescimento de bactérias e fungos e óleo mineral e vegetal para melhorar as propriedades de lubrificação [22, 24].

Fluidos sintéticos: soluções químicas caracterizadas por não conterem óleo mineral. São usados diversos tipos de aditivos, tais como anti-corrosivos, agentes seqüestrantes, aditivos de lubricidade, biocidas, etc. Suas principais vantagens são a capacidade de não absorver os óleos contaminantes que vazam das máquinas, excepcional resistência biológica e elevada vida útil, que reduzem o número de trocas do fluido. Entretanto, a concentração do produto deve ser controlada diária e eficientemente, sob pena de trazer danos à máquina e ao operador [22, 24].

Fluidos semi-sintéticos: possuem propriedades intermediárias entre fluidos emulsificantes e fluidos sintéticos. Contêm aditivos solúveis em água, emulsificantes e no máximo 20% de óleo mineral [21]. Possuem uma vida útil mais longa e não necessitam que o controle diário e a limpeza da máquina seja tão eficiente [22, 24].

Soluções de base éster ou vegetal: são fluidos onde a base mineral foi totalmente substituída por uma base vegetal ou éster. Não causa tantos danos ao operador quanto os produtos derivados de petróleo, mas pode sofrer contaminação pelos óleos das máquinas, como os óleos das guias e do barramento, não invalidando a vantagem inicial. Possuem boa capacidade de lubrificação, garantindo um ótimo acabamento, mas formam espuma com facilidade e o uso contínuo pode causar problemas de mal cheiro e crescimento biológico [22, 23].

### **c) Gases**

Podem ser usados nas situações em que não é possível fornecer o fluido de corte na área de contato ferramenta/peça. Não possuem propriedades refrigerantes tão boas quanto os líquidos, mas o uso de ar frio aumenta muito o tempo de vida da ferramenta.

Foram constatados melhores resultados com jatos de alta velocidade de dióxido de carbono e nitrogênio sobre a superfície da peça e sobre a face da ferramenta [24].

Outra classificação usada é [22]:

**Fluidos de base mineral convencional** (emulsões - mistura de óleo mineral em água);

**Fluidos semi-sintéticos;**

**Fluidos sintéticos verdadeiros de base polimérica** (formam soluções químicas, e não emulsões);

**Fluidos sintéticos de base éster ou vegetal** (a base mineral foi totalmente substituída pela base éster ou vegetal, porém formam emulsões, semelhantemente aos fluidos semi-sintéticos).

## 2.6 Força de Usinagem no Alargamento

A força de usinagem representa a resistência imposta pelo material da peça de trabalho à penetração do gume da ferramenta. O conhecimento das forças que atuam sobre a ferramenta durante o processo de usinagem é de fundamental importância para o desenvolvimento de uma máquina-ferramenta no que diz respeito ao dimensionamento correto das estruturas, acionamentos, fixação de ferramentas, guias e outros elementos. As forças também apresentam importância na determinação dos fenômenos que ocorrem na região de formação do cavaco, para a explicação de mecanismos de desgaste e como critério para a determinação da usinabilidade de um material [1].

Os fatores mais importantes que influenciam nas forças de corte são [1, 25, 26]:

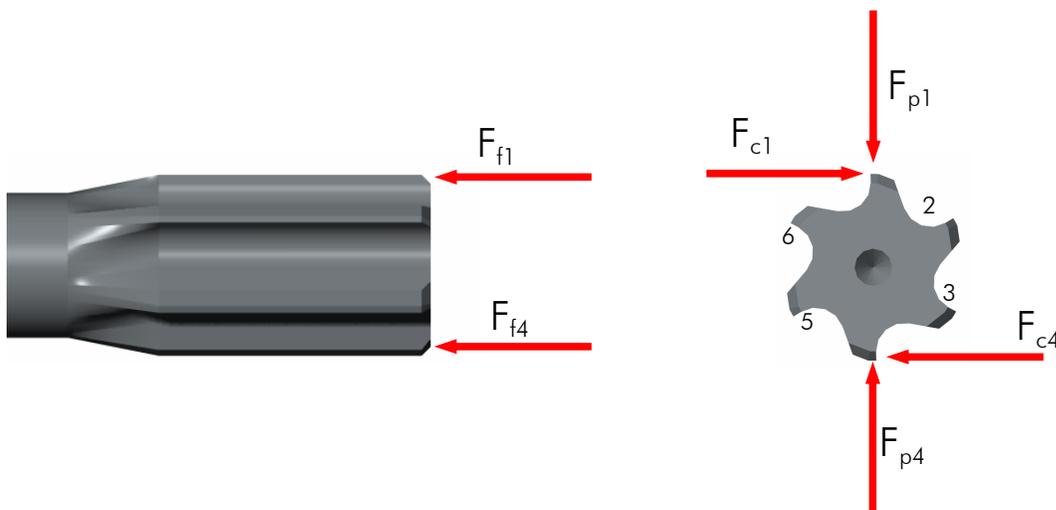
- material de peça;
- revestimento da ferramenta;
- geometria da ferramenta de corte;

- parâmetros de corte;
- tipo e pressão do fluido de corte;
- desgaste da ferramenta.

De acordo com a norma DIN 6584, *apud* Schroeter [27] a força de usinagem em um dente é denominada  $F_1$ , onde o índice “1” está para o número de gumes do alargador. Esta força pode ser decomposta em componentes segundo:

- a) a direção do eixo da ferramenta  $F_{f1}$ , denominada força de avanço por dente;
- b) a direção tangencial ao perímetro  $F_{c1}$  = direção de corte = direção da velocidade de corte, denominada força total de corte por dente;
- c) a direção perpendicular ao eixo da ferramenta e à direção de corte  $F_{p1}$ , denominada força passiva por dente.

A força de usinagem pode ser decomposta em três componentes: a força de avanço ( $F_f$ ), a força passiva ( $F_p$ ) e a força de corte ( $F_c$ ). Para o processo de alargamento estão esquematizadas segundo a Figura 2.12.



**Figura 2.12 – Forças no processo de alargamento**

Os alargadores possuem a capacidade de se “auto-posicionarem” durante a usinagem, fazendo com que as forças passivas de gumes opostos sejam subtraídas mutuamente. No caso de alargadores de gume único, a força passiva incidente sobre o gume é compensada pela ação das guias. Deste modo, sua quantificação não é comumente realizada.

A avaliação das forças no processo de alargamento, sendo uma variação do processo de furação, é realizada em função da força de avanço ( $F_f$ ) e do momento torçor

( $M_t$ ). A medição destes esforços é realizada pela maioria dos sistemas de avaliação de forças de usinagem empregados atualmente.

A parcela da força de corte em cada gume cortante é decorrente da resistência ao corte do material usinado, tendo grande influência sobre o momento torçor que atua nesses processos. O atrito das guias da ferramenta e dos cavacos também contribui para o aumento do momento torçor. Esta contribuição depende da qualidade da afiação e do meio lubri-refrigerante utilizado [19].

A relação entre a força de corte e o momento torçor é dada pela equação abaixo [19], onde “d” é o diâmetro da ferramenta:

$$M_t = \frac{F_c \cdot d}{2000} \quad (2.1)$$

## 2.7 Qualidade da Peça Usinada

Existe uma série de fatores que influenciam o resultado final do processo de usinagem, conforme a Figura 2.13. Nesta figura pode-se observar as diversas parcelas que contribuem para o resultado desejado e quais suas origens. A partir desta figura pode-se concluir que não basta apenas se concentrar em um ponto, como por exemplo a máquina-ferramenta, pois mesmo a melhor das máquinas pode apresentar resultados de usinagem não satisfatórios, quando se negligencia o qualidade do material das peças, os parâmetros do processo, as condições de fixação da peça e ferramenta, e até mesmo os fatores provenientes do meio.

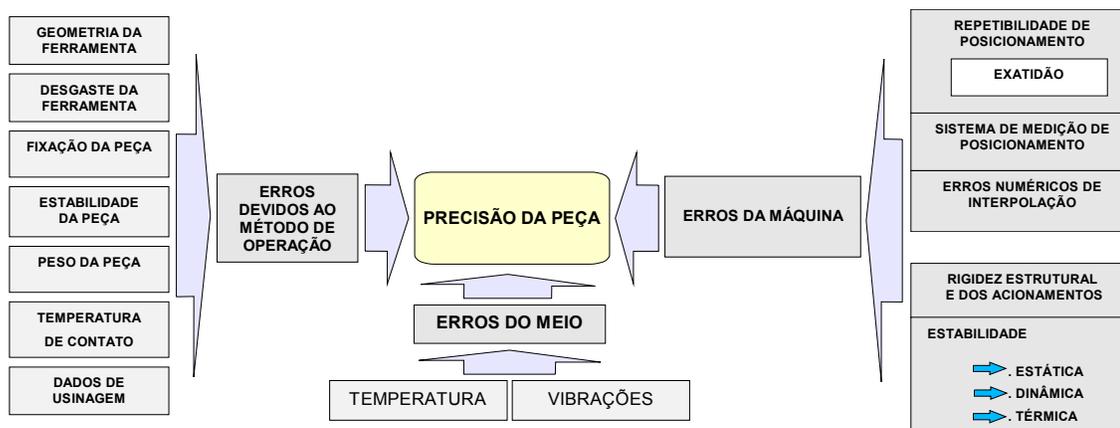


Figura 2.13 – Relações que envolvem a qualidade de um peça usinada, König [28] *apud* Stoeterau [29]

### 2.7.1 Erros geométricos

A qualidade de furos usinados depende do processo de fabricação, assumindo que todos os outros fatores, como rigidez da máquina-ferramenta, são iguais. Os erros ou imperfeições, entretanto, podem ocorrer em vários níveis em qualquer processo devido a condições comuns. Eles incluem [3]:

#### a) Erros de forma

Esta condição existe quando o diâmetro não é uniforme ao longo do comprimento do furo. Exemplos são as bocas de sino, forma abaulada e furos côncavos, assim como furos com eixos inclinados. A magnitude do erro freqüentemente depende basicamente do diâmetro e do comprimento do furo (relação  $L/d$ ).

#### b) Rebarbas

Rebarbas podem ser formadas na borda do furo, tanto na entrada como na saída. A forma e a dimensão das rebarbas dependem dos materiais da peça e da ferramenta, de suas propriedades, das condições das ferramentas e da velocidade de corte e avanço usados.

#### c) Erros de posicionamento dos furos

Ocorrem quando o centro do furo está deslocado em relação à posição em que deveria estar. A exatidão da posição do furo depende primariamente da condição da máquina e da ferramenta (principalmente da ponta da ferramenta).

#### d) Erros de circularidade

Ocorrem quando a seção circular (contorno) de um furo é distorcida em relação à forma ideal. Formas triangulares, irregulares ou ovaladas são comumente observadas na furação. A precisão do eixo-árvore da máquina, da afiação da ferramenta e rigidez do equipamento são todos fatores críticos para que os erros de circularidade sejam minimizados.

#### e) Erros de dimensão

Na maioria dos casos o diâmetro do furo produzido é maior do que o diâmetro da ferramenta. Alguns exemplos destas imperfeições podem ser visualizadas na Figura 2.14.

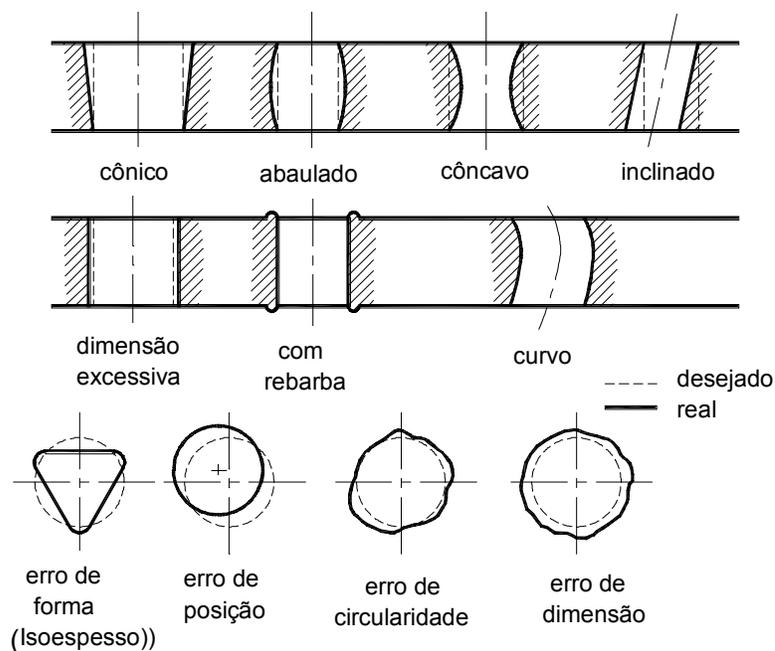


Figura 2.14 – Erros comuns na geometria de furos [1, 3]

### 2.7.2 Qualidade da superfície gerada

A superfície de um componente mecânico, em muitos casos, deve cumprir funções muito mais complexas que apenas a de apresentar um bom aspecto visual. As funções de

uma superfície técnica estão definidas na norma DIN 4764 e também já foram estudadas e descritas por vários pesquisadores [30].

A qualidade das superfícies geradas pode definir suas propriedades de funcionamento, vida, aparência, desempenho e outras funções mecânicas desejadas [3].

O cumprimento das funções atribuídas a uma superfície exige que a mesma possua certas propriedades, que por sua vez, podem ser divididas em dois grupos. O primeiro compreende as propriedades relacionadas com a integridade da superfície e o segundo compreende as propriedades geométricas da superfície. O termo textura é mais utilizado no estudo das propriedades geométricas [30].

A dependência funcional de componentes em relação à qualidade de superfícies levou à criação de métodos de avaliação das superfícies, através dos parâmetros de textura. Foram criados mais de uma centena, e alguns deles são mundialmente aceitos, como por exemplo a rugosidade média aritmética  $R_a$  [30].

Define-se a rugosidade como sendo as mais finas irregularidades que normalmente resultam do processo de fabricação. Estas incluem marcas transversais de avanço e outras irregularidades dentro dos limites do comprimento de amostragem.

O parâmetro  $R_a$  é a média aritmética do valor absoluto das ordenadas “y” do perfil de rugosidade dentro do percurso de medição  $l_m$ , tomando como referência a linha média. Isto equivale a altura de um retângulo de um comprimento igual ao percurso de medição  $l_m$  e de área igual a soma das áreas delimitadas pelo perfil de rugosidade e a linha média.

$$R_a = \frac{1}{l} \int_0^l |y(x)| dx \quad 2.2$$

A representação esquemática do parâmetro  $R_a$  pode ser vista na Figura 2.15

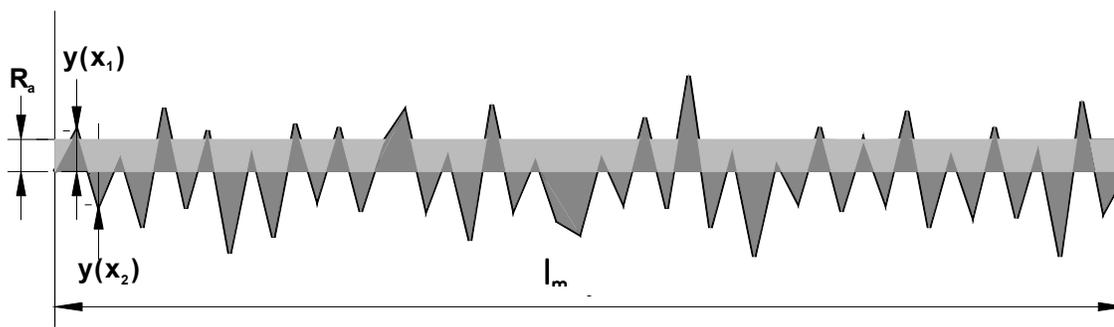


Figura 2.15 – Perfil de rugosidade e parâmetro  $R_a$

## 2.8 Critérios de Fim de Vida no Alargamento

Desgaste é definido segundo a Organização para Cooperação Econômica e Desenvolvimento (OECD - *Organisation for Economic Co-operation and Development*) como sendo um dano progressivo que envolve a perda de material, perda a qual ocorre na superfície de um componente como resultado de um movimento relativo a um componente adjacente. O mesmo se aplica ao desgaste de ferramentas, onde a perda de material da ferramenta de corte ocorre durante a usinagem, resultante da interação entre ferramenta, material da peça e parâmetros de corte. Na prática o desgaste mais medido é o de flanco, sendo utilizado como critério de fim de vida de uma ferramenta [18].

### 2.8.1 Mecanismos de desgaste

Os diversos mecanismos de desgaste podem agir de forma simultânea, de maneira que tanto sua origem e o efeito dificilmente podem ser distinguidos entre si. Consideram-se atualmente como os principais mecanismos causadores de desgaste os seguintes:[1, 3, 6, 20, 31]:

**a) Fadiga térmica e mecânica:** durante o corte do metal ocorre constantemente o aquecimento e resfriamento na região de corte, além de existirem choques mecânicos no gume. A combinação destes fenômenos pode levar a fissuras, microlascamentos, deformação plástica e a ruptura da ferramenta.

**b) Adesão ou cisalhamento:** este mecanismo ocorre quando duas superfícies estão em contato e são submetidas a alta pressão em uma certa faixa de temperatura. Com o atrito gerado e as forças de corte envolvidas, algumas partículas aderem à face da ferramenta apresentando alto grau de deformação a frio. Após algum tempo, estas partículas são cisalhadas levando consigo partículas da ferramenta, provocando desta forma desgaste na face e no flanco da ferramenta.

**c) Difusão:** as propriedades químicas do material da ferramenta e a afinidade deste com o material da peça dita o desenvolvimento da difusão. Este mecanismo de desgaste consiste na transferência de átomos de uma área de maior para menor concentração atômica. Em ferramentas de metal-duro na usinagem de aço em temperaturas na faixa de 700 a 1300°C, a difusão tende a ocorrer, formando geralmente um cratera na face da ferramenta.

**d) Abrasão mecânica:** a abrasão mecânica ocorre quando partículas duras da superfície do cavaco escorregam sob alta pressão e temperatura sobre a face da ferramenta, arrancando pequenas porções do material da ferramenta de corte.

**e) Oxidação:** a oxidação ocorre em temperaturas elevadas na presença do ar. Em ferramentas de metal-duro, estas temperaturas estão na faixa entre 700 e 800°C ou mais.

**f) Desgaste químico:** o desgaste químico ocorre quando a ferramenta e a peça estão expostas a produtos químicos ativos, os quais freqüentemente estão presentes nos fluidos de corte. É possível que o desgaste eletroquímico ocorra por ação galvânica.

### 2.8.2 Tipos de desgaste

Os mecanismos citados acima levam a formação de marcas de desgaste características, as quais podem ser classificadas e quantificadas. Os principais tipos de desgaste são descritos na Figura 2.16.

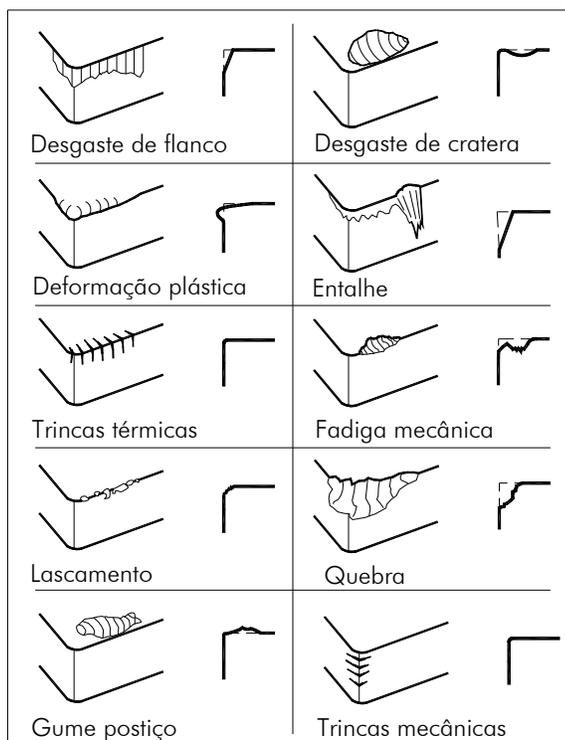


Figura 2.16 – Tipos de desgastes em ferramentas de corte [20]

a) **Desgaste de flanco:** a Figura 2.17 mostra o desgaste médio ( $VB$ ) e o máximo  $VB_{max}$  no flanco de uma ferramenta. O desgaste de flanco é causado principalmente pelo mecanismo de desgaste abrasivo. É normalmente o tipo mais comum de desgaste, e o mais medido e monitorado nas operações de usinagem, podendo ser considerado como um dos critérios de fim de vida de uma ferramenta. O aumento do desgaste de flanco proporciona uma usinagem de baixa qualidade da superfície, imprecisões e o aumento do atrito [18].

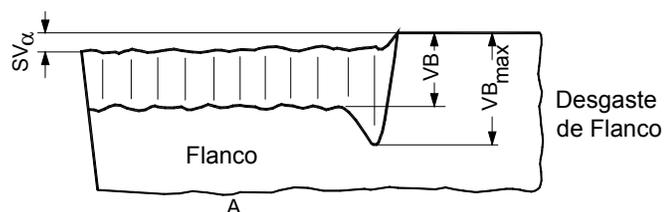


Figura 2.17 – Largura da marca de desgaste no flanco da ferramenta[32]

A medição deste tipo de desgaste deve ser realizada com microscópio de ferramentaria com aumento de 10 a 50 vezes. Mesmo quando houver deformação

plástica ou desgaste do gume, ou seja, retração do mesmo, a marca de desgaste deve ser medida em relação à posição original do gume considerado, sendo, portanto, necessária a utilização de uma referência.

A progressão do desgaste de flanco pode acarretar também um leve aumento no momento torçor do processo. No entanto, a parcela de momento causada por este tipo de desgaste é muito pequena se comparada com as parcelas causadas pelo próprio corte de material pelos gumes principais e pelo atrito entre as guias e a parede do furo. Sendo assim, nem sempre é possível medir a variação de momento causada por este tipo de desgaste [2].

**b) Desgaste das Guias:** em ferramentas que utilizam guias, como no caso de alargadores de gume único e alguns processos de furação, há ainda o desgaste deste componente, conforme Figura 2.18. O desgaste das guias geralmente ocorre ao longo de todo o comprimento das mesmas. O aumento do desgaste das guias não gera aumento significativo no momento, uma vez que é lento, sendo sempre superado por alguma outra forma de desgaste, como o desgaste de flanco ou de gume transversal.

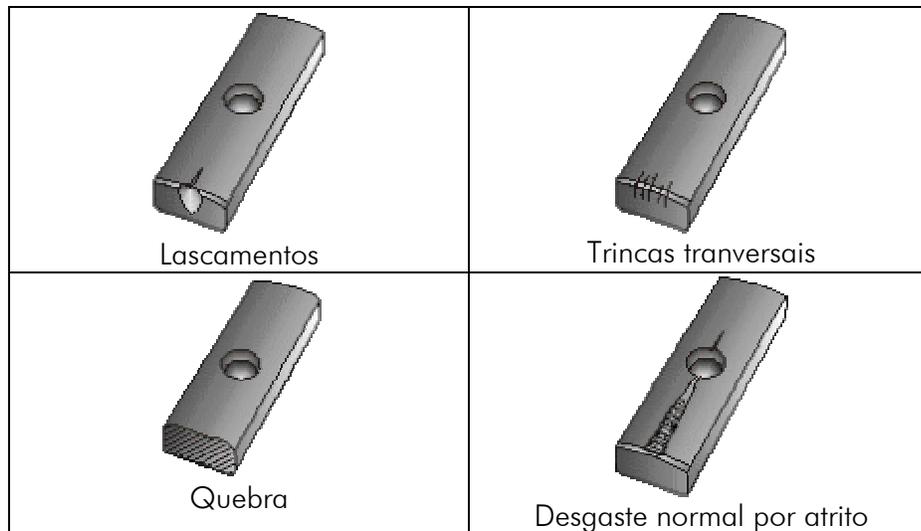


Figura 2.18 – Tipos de desgaste de guias [33]

**c) Desgaste de Cratera:** ocorre principalmente devido aos mecanismos abrasivos e difusivos de desgaste. A cratera é formada pela remoção de material da ferramenta através da ação de partículas abrasivas duras combinada com a difusão entre cavaco e

ferramenta. Para minimizar esse tipo de desgaste deve-se procurar ferramentas mais duras, com dureza a quente e pouca afinidade com o material da peça [18].

**d) Gume Postiço:** a formação do gume postiço é decorrente da aderência de material proveniente da peça altamente encruada na face da ferramenta. Este fenômeno está relacionado a uma determinada faixa de velocidade de corte e temperatura, podendo ser evitado quando se trabalha fora desta faixa crítica [19].

**e) Fratura:** a fratura é o fim catastrófico da ferramenta devido a mudanças geométricas, ou enfraquecimento do gume, o aumento da temperatura e das forças de corte [18].

### 2.8.3 Critérios de fim de vida

Define-se a vida de uma ferramenta como sendo o tempo produtivo disponível durante o qual o gume irá usinar componentes aceitáveis dentro de parâmetros limitantes [1, 4, 21]. Há algum tempo considerava-se como fator limitante o estado em que a ferramenta não podia mais cortar. Atualmente considera-se a textura da superfície, a exatidão dimensional e geométrica, o estado da ferramenta, a formação do cavaco e a vida restante da ferramenta, como critérios de fim de vida. A vida da ferramenta está no limite quando se perde o controle sobre os cavacos formados ou quando o desgaste que se desenvolve atinge um estágio onde o risco de uma quebra rápida do gume é iminente [21].

Existe a possibilidade de se fazer testes de longa e de curta duração para a determinação da vida de uma ferramenta. Os de longa duração são mais precisos, porém são mais onerosos e consomem mais recursos humanos, materiais e financeiros. Já os ensaios de curta duração servem apenas para fornecer parâmetros comparativos, sendo de execução rápida, mais econômica e fácil [1].

A fixação do ponto representativo do fim de vida de uma ferramenta é fundamental no estudo da usinabilidade. Na prática e nos ensaios em laboratório são utilizados diversos critérios, que determinam com maior ou menor grau de exatidão este ponto. A escolha do critério depende de vários fatores, tais como exigências da usinagem, material da ferramenta etc., sendo os mais comuns [1, 4, 19, 21]:

- Falha completa da ferramenta;

- Falha preliminar da ferramenta;
- Largura da marca de desgaste no flanco;
- Vibrações intensas da peça ou ferramenta, ruídos fortes por vibrações na máquina;
- Profundidade da cratera;
- Deficiência no acabamento da superfície;
- Formação de rebarbas;
- Forma dos cavacos;
- Alteração dimensional da peça;
- Alteração da força de corte, torque ou potência;
- Aumento da força de avanço;
- Aumento da temperatura do gume e;
- Temperatura.

Na prática, utilizam-se critérios como:

- Tempo de máquina;
- Volume de material removido;
- Número de peças produzidas;
- Alteração dimensional da peça etc.

## 2.9 Ferros Fundidos

Dentre as ligas ferro-carbono, os ferros fundidos constituem um grupo de ligas de importância fundamental para a indústria, não só devido às características inerentes ao próprio material, como também pelo fato de que, mediante introdução de elementos de liga, aplicação de tratamentos térmicos adequados e pelo desenvolvimento do ferro fundido nodular, tem sido viável o seu emprego em aplicações que, de certo modo, eram exclusivas dos aços [34].

Pelo conhecimento do diagrama de equilíbrio Fe-C, os ferros fundidos são as ligas Fe-C cujos teores de carbono se situa acima de 2,0%, aproximadamente. O ferro fundido pode também ser considerado como uma liga ternária de Fe-C-Si, já que o silício está freqüentemente presente em teores superiores ao do próprio carbono [34].

### 2.9.1 Tipos de ferro fundido

Dentro da denominação geral de ferro fundido, podem ser distinguidos os seguintes tipos de liga [34]:

a) **Ferro fundido cinzento:** cuja fratura mostra uma coloração escura, caracterizada por apresentar como elementos de liga fundamentais o carbono e o silício e estrutura em que uma parcela relativamente grande do carbono está no estado livre (grafita lamelar) e outra parcela no estado combinado ( $\text{Fe}_3\text{C}$ ).

b) **Ferro fundido branco:** cuja fratura mostra uma coloração clara, caracterizado por apresentar ainda como elementos de liga fundamentais o carbono e o silício, mas cuja estrutura, devido às condições de fabricação e menor teor de silício, apresenta o carbono quase inteiramente na forma combinada ( $\text{Fe}_3\text{C}$ ).

c) **Ferro fundido mesclado:** cuja fratura mostra uma coloração mista entre branca e cinzenta, caracterizado igualmente por uma mescla de proporções variáveis de ferro fundido branco e ferro fundido cinzento.

d) **Ferro fundido maleável:** caracterizado por ser obtido a partir do ferro fundido branco, mediante um tratamento térmico de maleabilização, resultando numa transformação de praticamente todo o ferro combinado em grafita na forma de nódulos.

e) **Ferro fundido nodular:** caracterizado por apresentar carbono livre de grafita esferoidal, o que confere ao material características de boa ductilidade. Outra denominação freqüente empregada para essa liga é ferro fundido dúctil.

f) **Ferro fundido de grafita compactada:** caracterizado pelo fato da grafita apresentar-se em “escamas”, ou seja, com a forma de plaquetas ou estrias, motivo pelo qual tem sido também designado por “quasi-escama” [34, 35].

Tabela 2.4 – Faixa de composição de ferros fundidos típicos comuns [36]

Tipo	Composição química [%]				
	Carbono	Silício	Manganês	Enxofre	Fósforo
Branco	1,8 – 3,6	0,5 – 1,9	0,25 – 0,8	0,06 – 0,2	0,06 – 0,2
Maleável	2,2 – 2,9	0,9 – 1,9	0,15 – 1,2	0,02- 0,2	0,02 – 0,2
Cinzentos	2,5 – 4,0	1,0 – 3,0	0,2 – 1,0	0,02 – 0,25	0,02 – 1,0
Nodular	3,0 – 4,0	1,8 – 2,8	0,1 – 1,0	0,01 - 0,03	0,01 – 0,1
Grafita comp.	2,5 – 4,0	1,0 – 3,0	0,2 – 1,0	0,01 – 0,03	0,01 – 0,1

### 2.9.2 Ferros Fundidos Cinzentos

O ferro fundido cinzento é, dentre os ferros fundidos, a liga mais usada, devido às características de [34]:

- Fácil fusão e moldagem;
- Boa resistência mecânica;
- Excelente usinabilidade;
- Boa resistência ao desgaste;
- Boa capacidade de amortecimento.

A presença de carbono livre na forma de grafita (Figura 2.19) proporciona características únicas ao ferro fundido cinzento, sendo que a quantificação da sua presença, assim como o conhecimento da participação dos demais metais na liga (principalmente silício), da espessura da peça e da forma da grafita podem ser utilizados para prever as propriedades do metal [34, 36].



Figura 2.19 – Grafita envolta pela matriz ferrítica [35]

Mecanicamente os ferros fundidos cinzentos são frágeis devido à sua microestrutura, e devido às formas pontiagudas do grafite livre, ocorrem pontos de concentração de tensões quando forças externas são aplicadas. Dessa forma, a resistência e a ductilidade são muito maiores sob esforços de compressão [35].

#### a) Classificação dos ferros fundidos cinzentos

Atualmente os ferros fundidos cinzentos podem ser classificados seguindo diferentes normas, como por exemplo: ASTM, DIN, SAE, ABNT etc. A especificação para os diferentes tipos de ferros fundidos é feita geralmente pela ASTM. Já em aplicações automotivas essa especificação segue as normas da SAE. A norma ASTM classifica os ferros fundidos segundo os limites de resistência à tração, enquanto a SAE o faz segundo a dureza mínima do material [36].

Pelo sistema ASTM, as classes dos ferros-fundidos situam-se entre 20 e 60.

Pelo sistema métrico tem-se, em média, os seguintes valores para resistência a tração [34]:

**Tabela 2.5 – Resistência das classes de ferro fundido [34]**

Classe	20	25	30	35	40	50	60
Resistência [MPa]	140	175	210	245	270	340	410

Os valores de composição química para cada classe de ferro fundido são apresentados na Tabela 2.6. A indicação é feita em faixas amplas, com valores que se sobrepõem: os teores mais elevados de carbono e silício correspondem aos corpos de prova de menor diâmetro, ou seja, à medida que a espessura aumenta, decresce a porcentagem de carbono e silício presentes.

**Tabela 2.6 – Composição química das classes de ferro fundido [34]**

Classe ASTM	Composição química [%]				
	Carbono	Silício	Manganês	Enxofre	Fósforo
20	3,1 – 3,8	2,2 – 2,6	0,5 – 0,8	0,08 – 0,13	0,2 – 0,8
25	3,0 – 3,5	1,9 – 2,4	0,5 – 0,8	0,08 – 0,13	0,15 – 0,5
30	2,9 – 3,4	1,7 – 2,3	0,45 – 0,8	0,08 – 0,12	0,15 – 0,3
35	2,8 – 3,3	1,6 – 2,2	0,45 – 0,7	0,06 – 0,12	0,1 – 0,3
40	2,75 – 3,2	1,5 – 2,2	0,45 – 0,7	0,05 – 0,12	0,07 – 0,25
50	2,55 – 3,1	1,4 – 2,1	0,5 – 0,8	0,06 – 0,12	0,07 – 0,2
60	2,5 – 3,0	1,2 – 2,2	0,5 – 1,0	0,05 – 0,12	0,05 – 0,2

A Tabela 2.7 apresenta as correlações para as classificações em diferentes normas.

**Tabela 2.7 – Correlações para classificação em diferentes norma [37]**

Norma	DIN	ASTM	ABNT	SAE	EU
Classe	GG15	20	FC 150		GJL 150
	GG20	30	FC 200	G 3000	GJL 200
	GG25	35	FC 250	G 3500	GJL 250
	GG30	45	FC 300		GJL 300

### b) Usinabilidade dos ferros fundidos cinzentos

A usinabilidade da maioria dos ferros fundidos cinzentos é superior à da maioria dos aços de dureza equivalente. Grãos de grafita introduzem descontinuidades na matriz metálica, facilitando a quebra do cavaco. A grafita atua como um lubrificante para a ferramenta de corte. No entanto, uma usinagem econômica não depende somente da usinabilidade do material, mas também dos seguintes fatores [38]:

- Presença de coquilhas nas extremidades e nas seções mais finas;
- Adesão de areia na superfície da peça;
- Irregularidades, como resultado de moldes macios;
- Moldes defeituosos ou deslocados;
- Rechupes.

Coquilhas nas extremidades da peça e nas seções mais finas são mais comuns em peças pequenas, em ferros de alta resistência e em projetos que tenham seções menos espessas na base ou no topo do fundido. O controle do coquilhamento, geralmente, é feito por um teste que verifica a formação de ferro fundido branco. O ferro pode ser tratado com uma pequena quantidade de liga grafitizante (inoculantes), de forma a reduzir o coquilhamento.

O uso de inoculação para reduzir o coquilhamento não acarreta alterações na composição ou nas propriedades físicas do material, apenas nas propriedades mecânicas. Seções mais estreitas (5 mm) geralmente podem ser fundidas em ferros fundidos cinzentos de classe maior do que 25. Se as seções mais finas forem localizadas na entrada do molde, o fluxo de metal quente irá aquecê-lo, reduzindo o resfriamento e contribuindo para a formação de ferro fundido cinzento. A solução do problema de

coquilhamento apresenta melhores resultados quando é atacada na origem, sendo economicamente inviável uma nova fundição da peça para eliminar o coquilhamento.

A remoção de areia na peça pode ser realizada com uma limpeza adequada. No caso de adesão de partículas de areia devido à penetração do ferro na parede do molde, a limpeza se torna difícil. Recomenda-se neste caso a usinagem com ferramentas de metal-duro devido à sua boa resistência a abrasão. O uso de velocidades de corte reduzidas e maiores valores de avanço também melhora o processo de usinagem.

As irregularidades das peças, causadas pela falta de rigidez dos moldes, são problemáticas, principalmente para o processo de brochamento e operações similares de usinagem. O material adicional provoca uma sobrecarga na ferramenta de corte, podendo causar lascamentos seguidos de quebra.

Os moldes defeituosos geram peças distorcidas, as quais podem danificar a ferramenta de corte no momento da usinagem e inviabilizar a manufatura da peça.

Os rechupes são raramente encontrados, entretanto podem ser problemáticos quando presentes em meio ao processo de furação. Regiões com rechupes oferecem menos resistência, tendendo a desviar a trajetória da ferramenta na direção do rechupe. Pode também ocorrer a quebra da broca quando encontrar regiões mais duras, normalmente associadas aos rechupes.

Estes fatores demonstram a complexidade da definição de usinabilidade dos ferros fundidos, e por isso, é difícil classificá-los através de tabelas. Critérios como potência por unidade de volume usinado em unidades de tempo são importantes na seleção da máquina-ferramenta e do tamanho do motor. Avaliações de usinabilidade baseadas na vida da ferramenta também são úteis, porém apresentam difícil interpretação quando os custos de usinagem devem ser considerados.

### **c) Aplicações dos ferros fundidos cinzentos**

As principais aplicações dos ferros fundidos cinzentos são exemplificadas abaixo [34]:

Classe G 1800 – peças fundidas onde a resistência mecânica não é um fator primordial;

Classe G 2500 – pequenos blocos de cilindro, cabeçotes de cilindro, cilindros resfriados a ar, pistões, discos de embreagem, carcaças de bombas de óleo, caixas de transmissão, caixas de engrenagens; também para tambores de freios e discos de

embreagem para serviço moderado, onde o alto teor de carbono minimiza o efeito desfavorável do calor;

Classe G 3000 – blocos de cilindro de automóveis e motores Diesel, cabeçotes de cilindro, volantes, pistões, tambores de freio e caixas de transmissão de tratores para serviço médio;

Classe G 3500 (GG25) – blocos de motores Diesel, blocos e cabeçotes de cilindro de caminhões e tratores, volantes pesados, caixas de transmissão de tratores, caixas de engrenagens pesadas; também para tambores de freio e discos de embreagem para serviço pesado, onde se exige alta resistência mecânica e à fadiga térmica;

Classe G 4000 – peças fundidas para motores Diesel, camisas de cilindro, cilindros, pistões e eixos de comando de válvulas.

#### **d) Elementos de liga**

Embora seja hoje possível produzir ferros fundidos cinzentos de alta qualidade sem a adição de elementos de liga, apenas com um controle rigoroso do carbono livre e do carbono combinado e dos teores de silício e manganês e mais da técnica de fabricação, a adição de elementos de liga vem se tornando uma prática usual, por permitir não só obter maiores resistências com o carbono equivalente mais elevado, como também porque as estruturas resultantes são menos sensíveis à variação da espessura das peças.

Nos ferros fundidos os elementos de liga têm dois efeitos:

- Tendem a decompor a cementita, ou seja, são elementos grafitizantes; silício, alumínio, níquel, cobre e titânio;
- Tendem a estabilizar os carbonetos, ou seja, retardam a formação da grafita; manganês, cromo molibdênio e vanádio, entre outros.

Os elementos de liga tendem a aumentar a resistência à tração e à dureza, sendo os mais eficientes, nesse sentido, o vanádio, o molibdênio e o cromo.

O molibdênio, quando adicionado em teores de 0,20% a 0,80%, refina a perlita e favorece a obtenção de bainita. Além do efeito na matriz, o molibdênio exerce influência na grafita, que tende a “nodularizar”, e contribui para o aumento da temperatura de fundição e melhoria das propriedades mecânicas a temperaturas elevadas.

O cromo e o vanádio aumentam inicialmente a resistência a tração, verificando-se, em seguida, entre 0,5% e 1,0% na composição, uma queda dessa propriedade

devido ao excesso de carbonetos livres. A dureza, entretanto, cresce gradualmente com a adição de Cr e V.

O cromo é geralmente adicionado em até cerca de 0,30%. Acima desse teor deve ser conjugado um elemento grafitizante, sobretudo em peças de seção finas, com cantos vivos. Juntamente com o vanádio, o cromo também torna a estrutura da matriz do ferro fundido cinzento mais perlítica e mais fina. O cromo e o molibdênio aumentam a resistência à ruptura transversal. O níquel também aumenta essa propriedade mecânica, principalmente em ferros fundidos cinzentos com teor de carbono inferior a 3,0%.

O fósforo, quando presente em teor superior a 0,15%, propicia a formação da steadita. A steadita é um constituinte de natureza eutética, compreendendo partículas de fosfeto de ferro ( $\text{Fe}_3\text{P}$ ) e carboneto de ferro ( $\text{Fe}_3\text{C}$ ), com baixo ponto de fusão inferior a  $982^\circ\text{C}$ . Ocorre em áreas interdendríticas, formando uma segregação, pois essas áreas são as últimas que solidificam. A steadita é muito dura e frágil. Em ferros fundidos com menos de 0,20% de fósforo não há efeito na vida da ferramenta. A presença de 0,40% de P já tem um efeito negativo em operações críticas, como o rosqueamento. Porcentagens maiores de fósforo reduzem de maneira significativa a vida da ferramenta [ASM, 1996].

O titânio, em teores de 0,08% a 0,25% de titânio residual, aumenta a resistência à ruptura transversal, sobretudo em ferros fundidos com teor de carbono superior a 3,4%. Do mesmo modo atua o vanádio que, em teores de 0,10% a 0,20% em seções de aproximadamente 75 mm de diâmetro, aumenta a resistência à ruptura transversal em cerca de 50%.

O níquel é um elemento grafitizante. É mais comumente adicionado em quantidades entre 0,50% a 1,5%, para contrabalançar o efeito estabilizador de elementos como cromo, molibdênio e vanádio. Por essa razão é raramente adicionado isoladamente.

O cobre é um elemento grafitizante e melhora a usinabilidade do material e sua resistência à corrosão, principalmente em meios contendo enxofre. Pode ainda ser utilizado em conjunto com o cromo ou o molibdênio ou cromo-molibdênio.

### 3 MATERIAIS E MÉTODOS

Neste capítulo será discutida a metodologia empregada neste trabalho, bem como os equipamentos utilizados. Inicialmente buscou-se conhecer o processo do modo que é empregado em chão-de-fábrica. Entender como funcionam as máquinas, como são as peças e as ferramentas forneceram subsídios importantes para demonstrar as limitações do processo e os pontos que podem ser melhorados. Por isso, é apresentada inicialmente a descrição do processo utilizado pela empresa.

Para o desenvolvimento deste trabalho são necessários ferramentas, máquinas-ferramentas, equipamentos de medição, corpos de prova, instrumentos e ferramentas, além de um planejamento dos experimentos. Assim, todo o planejamento experimental foi realizado de forma que os ensaios pudessem ser executados com a infra-estrutura disponível na empresa e no LMP.

Conhecendo-se o processo e a infra-estrutura disponível, tanto os recursos materiais como humanos, foram planejados ensaios, bem como definidas as características representativas do processo e qualidade das peças produzidas. Foram definidos dois tipos de ensaios a serem realizados: um teste com diferentes parâmetros de corte e um ensaio de vida de ferramentas, com monitoramento da marca de desgaste, qualidade das peças e forças de usinagem obtidas.

Com os resultados obtidos nos nestes ensaios, verificou-se a necessidade de realização de testes que vieram a complementar o estudo do processo, e quantificar o efeito de algumas variáveis. Estes testes complementares são principalmente ensaios com diferentes ferramentas, submetidas a diferentes parâmetros de corte.

#### 3.1 O Processo Atual

A operação em estudo vem encontrando algumas dificuldades em nível de chão-de-fábrica. Não são raros os atrasos de produção, devido à dificuldade de manter as tolerâncias de rugosidade e diâmetro, e o *set-up* de máquina também apresenta

dificuldades, e demanda tempo excessivo até que a máquina produza peças dentro das tolerâncias.

As ferramentas atualmente empregadas não vêm apresentando desempenho adequado, e fornecedores não conseguem adaptar ferramentas próprias ao processo.

O estudo do processo iniciou-se com uma visita técnica para observação do processo e levantamento de informações iniciais. Estimativas como número de peças produzidas por ferramenta, principais dificuldades encontradas pelos operadores e tipos de falhas das ferramentas deram embasamento para a elaboração de um procedimento para a realização dos ensaios.

Naquela fase do estudo, não haviam dados estatísticos disponíveis referentes a estas informações. Desta forma, os dados foram levantados junto ao pessoal do setor de processos e operadores de máquina, provenientes de suas observações diárias. De modo geral, a situação descrita do processo está esquematizada na Tabela 3.1.

**Tabela 3.1 – Situação do processo atual (descrito pelos funcionários da empresa)**

Característica	Descrição
Tipo de ferramenta	Alargador de 4 ou 6 gumes, canais retos, com insertos de metal-duro K10 brasados a hastes de aço, sem revestimento
Diâmetros	Entre 7 e 13 mm
Parâmetros de corte	$v_c = 28-35$ m/min (1.000 rpm) $v_f = 270 - 360$ mm/min
Sobremetal (a)	0,6 mm no diâmetro
Tipo de fixação da peça	Pinças com acionamento pneumático
Tipo de fixação da ferramenta	Por pinça, e uso de mandril flutuante
Fluido de corte	Óleo de corte integral
Produção por alargador	1.000 – 1.500 peças por afiação, 20.000 por ferramenta
Tipo de controle da qualidade do furo após o processo	Pino passa/não-passa; Rugosímetro; Comparador de diâmetro interno, 0,001 mm;
Tipos de falhas mais encontradas nas peças	Diâmetro acima do especificado; Rugosidade acima do especificado; Pino “passa” trancando Desvio de furo <sup>1</sup> ;
Critérios de fim de vida da ferramenta	Rugosidade alta ( $R_a > 2 \mu\text{m}$ ); Diâmetro fora das especificações.
Afiação	Feito pela própria empresa, em afiadora convencional

<sup>1</sup> Desvio de furo é considerado pelos operadores das máquinas quando o alargador, no final do furo, não consegue remover por completo a superfície deixada pelo processo de furação, devido ao desvio entre o eixo do alargador e o eixo do furo inicial.

Nesta visita inicial, também foi feito o acompanhamento do processo em chão-de-fábrica, para que pudessem ser observados os procedimentos e ações adotados pelos operadores durante as atividades cotidianas. Para completar as informações da tabela acima, o processo atual é descrito mais detalhadamente a seguir.

O processo, em termos de máquina, peça e ferramenta é explicado a seguir.

### **3.1.1 A peça**

As peças usinadas são blocos cilíndricos de ferro fundido cinzento, com o pré-furo concêntrico ao eixo de revolução do cilindro. São fundidas pela própria empresa, sendo produzidas seis tipos de ligas diferentes. Para o presente estudo, foram realizados ensaios somente com um tipo de liga, referente à classe DIN GG25.

### **3.1.2 A Máquina-ferramenta**

A máquina-ferramenta foi desenvolvida pela própria empresa. Possui dois cabeçotes fixos, posicionados verticalmente, possibilitando o uso de 2 ferramentas de corte ao mesmo tempo. O movimento de avanço é realizado pela mesa e o acionamento é dado por um servomotor, sendo a velocidade controlada pelo uso de um potenciômetro. Na mesa estão fixadas duas pinças com acionamento pneumático para a fixação das peças, de modo que em cada ciclo são produzidas duas peças, uma por cada ferramenta.

Para cada cabeçote da mesa há um bico para a aplicação de fluido de corte. O posicionamento dos bicos e a vazão do fluido são controlados pelo operador da máquina.

O ciclo da máquina é acionado manualmente pelo operador, iniciando com um avanço rápido, até que a ferramenta esteja próxima à entrada da peça. Neste ponto, é reduzido para a velocidade de avanço de trabalho até que a ferramenta atravesse completamente o furo, e então ocorre o retorno em velocidade rápida.

Os pontos de redução de velocidade e retorno da mesa são definidos por sensores posicionados pelo operador da máquina. Estas posições são ajustadas para cada combinação de comprimento de peça e ferramenta. A velocidade de avanço durante a usinagem é regulada pelo operador para que o parâmetro de rugosidade  $R_a$  esteja abaixo do limite de tolerância.

A rotação de trabalho das ferramentas de corte é mantida a 1.000 rpm, independentemente do diâmetro da ferramenta empregado.

A estação de trabalho poder ser vista na Figura 3.1 a seguir.

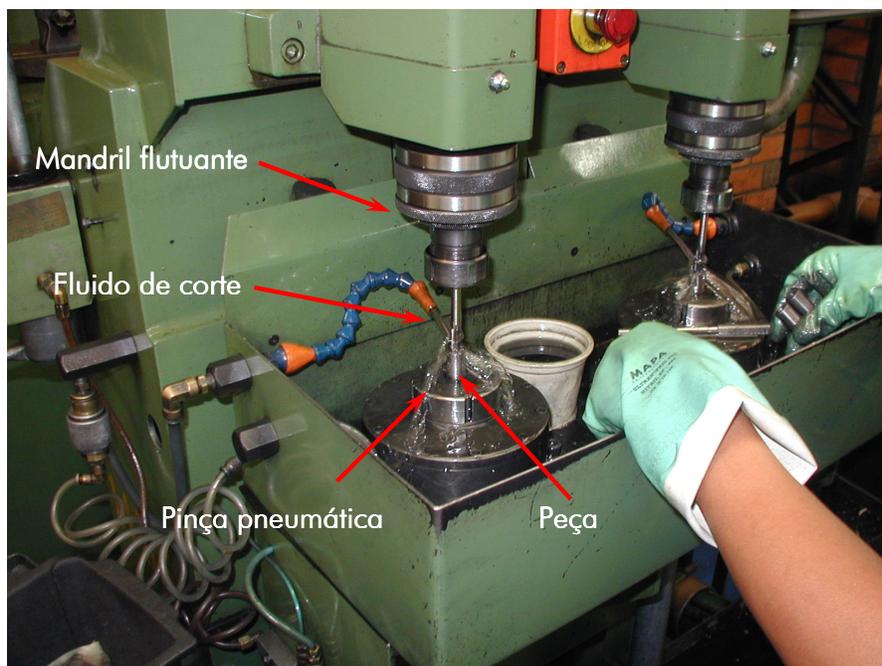


Figura 3.1 – Mesa da máquina-ferramenta utilizada no processo de alargamento

### 3.1.3 As ferramentas de corte

Os alargadores são produzidos, assim como reafiados, pela própria empresa. Os valores de diâmetros variam de 7 a 13 mm. Nos diâmetros abaixo de 8 mm, são utilizadas ferramentas de 4 gumes, e para maiores valores de diâmetro, 6 gumes, sempre com canais retos.

Todas as ferramentas apresentam um rebaixo de diâmetro na ponta, conforme a Figura 3.2. Com isso, tem-se para cada dente do alargador, duas regiões de corte. Os insertos dos alargadores são de metal-duro, classe K10, brasados a hastes de aço.

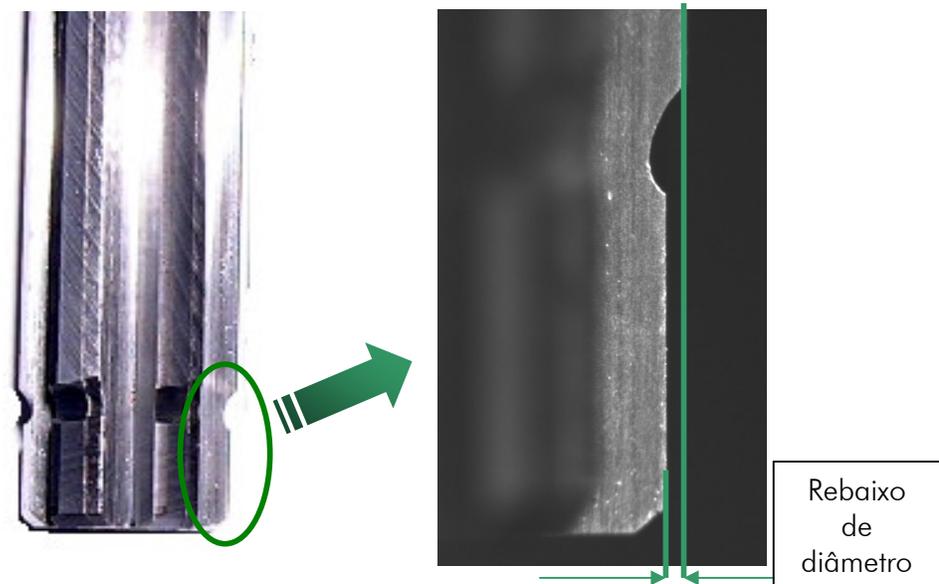


Figura 3.2 – Rebaixo guia na ponta dos alargadores

Este rebaixo é realizado nas ferramentas para facilitar o início do corte do metal, visto ser empregado um mandril flutuante para a fixação das ferramentas. Este tipo de fixação (Figura 3.3) permite deslocamentos radiais e angulares da ferramenta, e é utilizado para compensar possíveis desalinhamentos entre o eixo da ferramenta e o eixo do furo inicial da peça. Contudo, o uso deste mandril implica que no início da usinagem o alargador tenha poucas restrições a movimentos radiais, o que provoca um corte irregular, ocasionando marcas de vibrações na superfície do furo. Assim, a região do rebaixo da ponta da ferramenta serve para guiar a entrada da ferramenta na peça e a região posterior para realizar o acabamento na superfície.

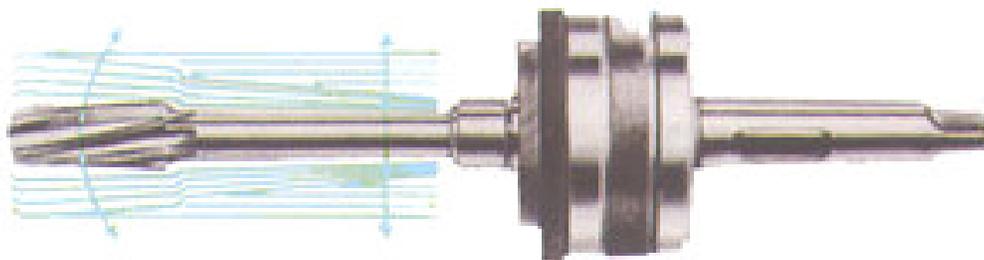


Figura 3.3 – Esquema de um mandril flutuante, com deslocamento radial e angular [39]

## 3.2 Ferramentas de Corte

A princípio foram determinados três valores de diâmetro de alargadores para serem ensaiados. De modo a abranger a faixa de valores de diâmetro utilizados em chão-de-fábrica, foram selecionados um próximo ao menor, um médio e um próximo ao maior valor de diâmetro empregado. Também foi dada preferência aos diâmetros de furos mais produzidos, visando facilitar a utilização da máquina da linha de produção e o uso das peças produzidas. Com isso, evitou-se o desperdício dos componentes usinados nos testes.

Em relação às ferramentas comerciais, os valores de diâmetro utilizados dependeram da disponibilidade dos fornecedores. Isso deve-se pelo fato de que os valores nominais de diâmetros empregados pela empresa não são comercialmente disponíveis, exigindo assim afiação especial.

A seguir é apresentada a descrição das ferramentas utilizadas, agrupadas em relação ao fornecedor. O Anexo B – Informações complementares sobre as ferramentas de corte, página 142, apresenta a metodologia de identificação e avaliação das ferramentas utilizadas.

### 3.2.1 Ferramentas fabricadas pela própria empresa

As ferramentas fornecidas pela própria empresa constituíam dois conjuntos diferenciados para cada um dos 3 diâmetros a serem testados. O primeiro conjunto foi de ferramentas retiradas da ferramentaria após algumas reafiações, sendo duas unidades de cada diâmetro. As ferramentas deste conjunto foram destinadas à realização de ensaios de variação de parâmetros de corte. O segundo conjunto era formado por 4 unidades de ferramentas novas de cada diâmetro, destinadas à realização de ensaios de vida. Assim, no total, a empresa forneceu 18 ferramentas para testes, 6 de cada um dos 3 conjuntos.

Devido à disponibilidade de ferramentas, os conjuntos de alargadores fornecidos com maior diâmetro, apresentam dois valores de diâmetro. Os alargadores testados nos ensaios de variação de parâmetros de corte apresentavam diâmetro nominal de 11,045 mm e as ferramentas para os ensaios de vida, 11,011 mm.

As ferramentas de fabricação própria podem ser visualizadas na Figura 3.4.



Figura 3.4 – Alargadores de fabricação própria

### 3.2.2 Ferramentas fornecidas pelo fabricante A

Foram fornecidas 3 diferentes tipos de ferramentas pelo fabricante A.

O primeiro tipo de ferramenta recebida do fabricante A foram 6 alargadores helicoidais iguais, inteiriços de metal-duro, de diâmetro nominal 9,011 mm. Entretanto, após análise fotográfica, foi constatado que estas ferramentas apresentavam marcas de desgaste. Por isso, foram devolvidas ao fornecedor.

Em seguida, foram recebidas outras 4 ferramentas iguais as anteriores. Duas delas foram submetidas a um processo de revestimento de TiNAl. Assim, obtiveram-se dois tipos de alargadores, conforme mostrado na Figura 3.5. Este revestimento foi escolhido por apresentar elevada dureza e baixo coeficiente de atrito [40]. Estas características são desejadas para reduzir desgaste de cratera, observadas nos ensaios de vida de ferramentas.

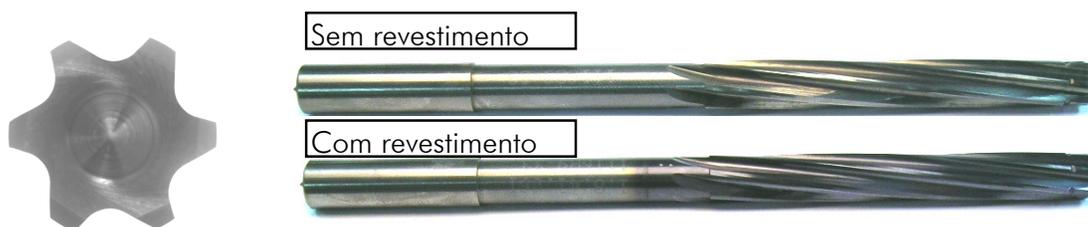


Figura 3.5 – Alargadores helicoidais fornecidos pelo fabricante A

Também foi fornecida uma ferramenta helicoidal de mesma geometria, fabricada com metal-duro de microgrão. Porém, também foi constatada a presença de marcas de desgaste e a ferramenta foi devolvida ao fabricante.

O terceiro tipo de ferramenta do fabricante A trata-se de um alargador de canais retos, sem revestimento, de diâmetro nominal 10,37 mm, conforme Figura 3.6. Foi fornecida apenas uma unidade deste tipo de ferramenta.



Figura 3.6 – Alargador de canais retos fornecidas pelo fabricante A

### 3.2.3 Ferramentas fornecidas pelo fabricante B

O último tipo de ferramenta recebida foi fornecido pelo fabricante B. Trata-se de um alargador com haste de aço-rápido e ponta de metal duro, de diâmetro nominal 9,000 mm (Figura 3.7). Foram fornecidas 4 unidades deste tipo de ferramenta. Estas ferramentas não apresentavam o rebaixo de diâmetro nas pontas.



Figura 3.7 – Alargador de canais retos fornecidas pelo fabricante B

## 3.3 Máquinas-ferramentas

Foram utilizadas 2 máquinas-ferramentas. Uma máquina da empresa, conforme descrito no item 3.1.2, e a segunda máquina utilizada é uma fresadora Romi, modelo Polaris F 400, do LMP. As demais especificações técnicas da fresadora podem ser encontradas no Anexo C.

Foi criado um programa utilizado para todas as ferramentas, através da linguagem interativa Heidenhain. Para cada combinação de diâmetro do alargador e parâmetros de corte desejados, foram atualizados os valores de rotação e velocidade de avanço do fuso para determinar, respectivamente, a velocidade de corte e avanço da ferramenta.

### 3.4 Meio Lubri-refrigerante Utilizado

Como fluido de corte foi empregado um óleo integral à base de hidrocarbonetos alifáticos. Suas propriedades estão descritas no Anexo C.

A aplicação foi realizada de forma a simular o uso no chão-de-fábrica. A vazão utilizada foi de  $(4,0 \pm 0,5)$  l/min, e o posicionamento do bico conforme mostrado na figura a seguir.



Figura 3.8 – Aplicação de fluido de corte

### 3.5 Corpo de Prova

Como corpos de prova, foram utilizados as peças que são produzidas para cada ferramenta na empresa, conforme descrito anteriormente. Trata-se de cilindros de ferro-fundido cinzento, da classe GG25, com campo de tolerância de dureza de 240 a 280 HB.

No total, foram usadas peças com 4 tamanhos diferentes, associadas aos 6 diâmetros de ferramentas, conforme tabela abaixo.

**Tabela 3.2 – Tamanho das peças utilizadas por diâmetro de ferramentas**

Tamanho do corpo de prova [mm]	Diâmetro do pré furo [mm]	diâmetro do alargador [mm]
$\phi 13 \times 42$	6,725	7,011
$\phi 16,5 \times 72$	8,4	9,011
		9,000
$\phi 16,5 \times 72$	9,55	10,37
$\phi 18,6 \times 82$	10,4	11,011
		11,045

### 3.5.1 Fixação do corpo de prova

A escolha do método de fixação do corpo de prova utilizado na máquina do LMP levou em conta dois fatores: facilidade de troca da peça e posicionamento correto.

A primeira alternativa seria o uso de uma placa de três castanhas para fixar a peça. Porém observou-se que deste modo ocorriam grandes variações de alinhamento de centros (ferramenta e pré-furo) nas trocas de peça. Isso exigiria que a cada troca de corpo de prova fosse necessária a realização de uma centragem entre a ferramenta e o furo inicial.

Com isso decidiu-se utilizar um sistema de mandril e pinça para realizar a fixação do corpo de prova, adaptado a uma placa de três castanhas. Deste modo, a cada troca de peça, era necessário somente o manuseio do sistema de pinça e mandril. A função da placa de castanhas foi facilitar a fixação do porta-pinça na plataforma piezelétrica. Esse sistema garantiu resultados adequados aos propósitos do estudo.

## 3.6 Sistema de Avaliação da Qualidade dos Furos

A qualidade dos furos foi avaliada em relação à rugosidade (parâmetro  $R_a$ ), diâmetro, cilindridade e circularidade. Foi dada atenção especial principalmente em relação à rugosidade, pelas dificuldades de manutenção das tolerâncias desse parâmetro.

Os valores de diâmetro e rugosidade foram medidos para todos os ensaios realizados. Os valores de cilindridade e circularidade foram avaliados somente nos ensaios de vida de ferramentas de corte.

### 3.6.1 Equipamentos

#### a) Diâmetro

Os diâmetros dos furos produzidos foram medidos com comparador de diâmetro interno, com resolução micrométrica.

#### b) Rugosidade

Medições de rugosidade foram medidas em dois rugosímetros, de mesmo fabricante, Mitutoyo um modelo SJ301 e um SJ201, pertencentes à empresa e ao LMP respectivamente.

#### c) Cilindridade e circularidade

As medições de circularidade e cilindridade das peças foram realizadas em um circularímetro Mitutoyo, modelo RA400, disponível na empresa.

### 3.6.2 Metodologia de avaliação

Na determinação dos valores das grandezas avaliadas, cada mensurando foi medido 3 vezes. Os valores relacionados à forma do furo (cilindridade e circularidade) foram medidos apenas uma vez, devido à dificuldade e tempo necessário para a medição.

Em cada gráfico de apresentação de resultados de medições, é associado a cada ponto o intervalo de confiança de medição. Este intervalo é delimitado pela repetitividade, calculada para confiabilidade de 95%, e indicado pelas barras horizontais. A repetitividade representa a dispersão das medições. Na sua determinação, foram seguidas recomendações de normas de ensaio de vida de ferramentas [32, 41, 42]. Foram utilizadas normas referentes aos processos de torneamento e fresamento, devido à falta de disponibilidade de normas específicas para o processo em questão.

#### a) Diâmetro

O diâmetro das peças foi medido nas extremidades correspondentes ao início e ao final da usinagem, denominados de início e final do furo. As medições foram realizadas a 5 mm das faces de cada peça.

### **b) Rugosidade**

A rugosidade dos furos, assim como o diâmetro, foi medida no início e no final das peças. Foi avaliado somente o parâmetro  $R_a$ , pois é o parâmetro exigido pelos clientes no momento da compra do produto. O valor do *cut-off* foi estabelecido seguindo recomendações das normas DIN4762 e ISO 4287/1, que recomendam 0,8 para valores de  $R_a$  de 0,1 até 2  $\mu\text{m}$ .

### **c) Cilindricidade e circularidade**

A medição de cilindridade foi realizada através dos valores de 3 medições de circularidade de cada furo. Foi realizada uma medição no extremo da peça correspondente à entrada da ferramenta, no meio da peça e no final do furo. As medições foram realizadas 5 mm afastadas das faces da peça, e seguindo demais instruções de procedimento internos da empresa.

## **3.7 Sistema de Avaliação da Força de Usinagem**

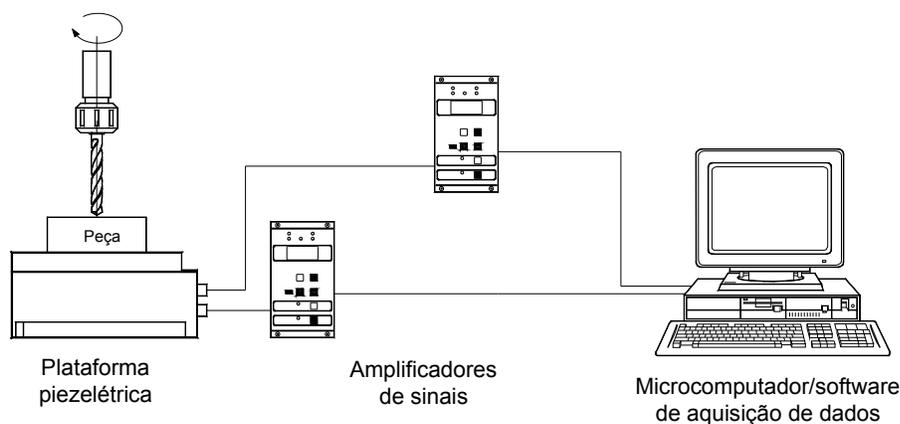
O estudo das forças de usinagem é de grande importância no projeto de máquinas-ferramentas, para determinar as tensões que atuarão sobre a sua estrutura, e também por poderem ser utilizadas no monitoramento do processo.

No caso do processo de alargamento, como os esforços são relativamente baixos, o maior interesse é em conhecer a evolução das forças causada pelo desgaste da ferramenta.

Neste trabalho, as forças de corte mostraram-se efetivas também para evidenciar as diferenças entre peças com diferentes propriedades. O comportamento, principalmente, do momento torçor mostrou também ter relações com os erros de forma causados nas peças.

### **3.7.1 Equipamentos**

A medição de forças de usinagem foi realizada com o uso de uma plataforma piezométrica, amplificadores de carga e uma placa de aquisição de dados conectada a um microcomputador. Foram utilizados dois canais de aquisição, um para o momento torçor ( $M_t$ ) e outro para a força de avanço ( $F_f$ ), cada um ligado a um amplificador, conforme a figura abaixo.



**Figura 3.9 – Esquema dos equipamentos para a medição de forças de usinagem**

A frequência de aquisição foi de 0,5 kHz. Antes da realização dos ensaios, foi realizada a calibração da plataforma piezométrica, seguindo procedimentos estabelecidos no LMP [43]. As especificações dos equipamentos podem ser encontradas no Anexo C.

### 3.7.2 Metodologia de avaliação

Para a avaliação dos esforços de usinagem, o esquema apresentado na figura acima foi montado nas dependências do LMP. Em cada um dos ensaios, foram usinadas três peças nas mesmas condições, para a análise estatística.

A aquisição dos dados é realizada segundos antes do início do processo até pouco depois da saída da ponta da ferramenta da peça. Contudo, foi avaliada somente a região onde o processo é estabilizado, conforme a Figura 3.10, desprezando as variações bruscas resultantes da entrada e saída da ferramenta na peça, representando adequadamente o processo.

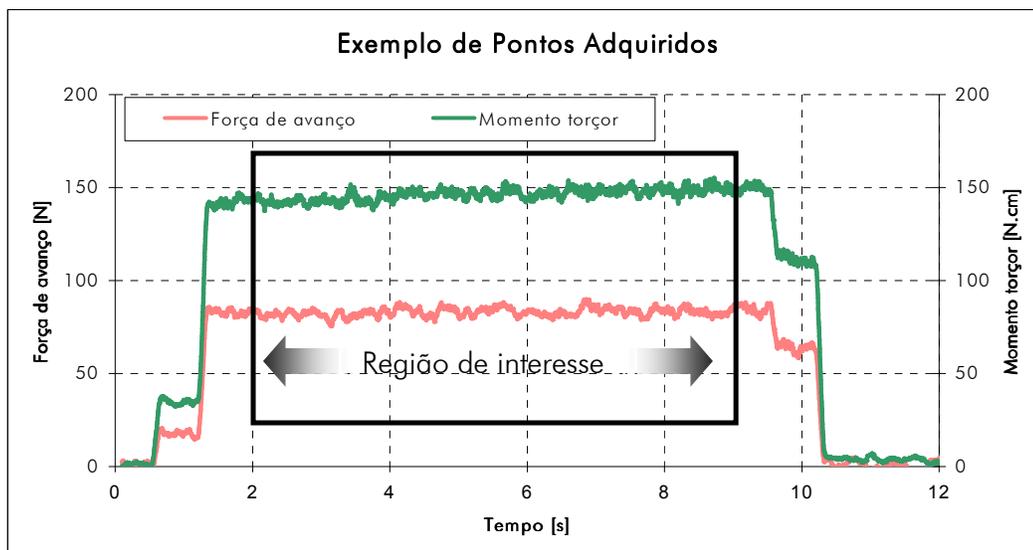


Figura 3.10 – Exemplo da aquisição de dados

Para a região de interesse de cada peça são calculadas uma média do momento torçor e uma da força de avanço. Os valores finais de avanço e momento são definidos pela média dos valores encontrados nas três peças usinadas. A dispersão de resultados é avaliada pela repetitividade, calculada seguindo recomendações das normas ISO 8688-1/2 [41, 42] e ISO 3685 [39], e indicada nos gráficos pelas barras horizontais associadas a cada ponto.

### 3.8 Avaliação do Desgaste

As ferramentas de corte podem se desgastar de diversas formas, pela atuação de diversos mecanismos, como apresentado anteriormente. Muitas vezes, não é possível prever a qual a forma de desgaste predominante, em outros casos, costuma-se avaliar critérios determinados *a priori*, como por exemplo o desgaste de flanco ou de cratera.

Neste trabalho, foi medida a largura da marca de desgaste de flanco. Outras formas de desgaste foram avaliadas qualitativamente.

#### 3.8.1 Equipamentos

As medições foram realizadas através das imagens registradas a cada etapa do processo, conforme descrito anteriormente.

### 3.8.2 Metodologia de avaliação

A avaliação dos desgastes das ferramentas foi realizada de duas formas. A primeira, qualitativamente, através das imagens digitais das ferramentas. Através das fotos de flanco e face, podem ser traçadas comparações nos diferentes estágios de desgaste das ferramentas ao longo da sua vida, e observada a evolução de marcas de desgaste de cratera e guias.

A segunda forma de avaliação foi quantitativa, através da medição da largura da marca de desgaste média ( $VB$ ) e máxima ( $VB_{máx}$ ). Para cada gume em cada uma das etapas, foram realizadas 3 medições. A metodologia de medição segue as demais recomendações das normas ISO 8688-1/2 [41, 42] e ISO 3685 [39]. A repetitividade das medições foi calculada para confiabilidade de 95%, e é indicada nos gráficos pelas barras horizontais associadas a cada ponto.

As medições foram realizadas no chanfro da ferramenta, por ser esta a região que gera o acabamento final do processo.

## 3.9 Ensaios de Variação de Parâmetros de Corte

O objetivo inicial destes ensaios era a avaliação da influência na rugosidade e diâmetro do aumento da velocidade de corte ou do avanço. Além disso, era necessária a determinação dos parâmetros de corte utilizados pela empresa, para serem empregados na realização dos ensaios de vida.

Sabia-se que a rotação era sempre mantida em 1.000 rpm, mas o avanço ( $f$ ) da ferramenta não é dado de entrada no processo. O operador controla a velocidade de avanço ( $v_f$ ), de modo iterativo, pelo resultado apresentado na rugosidade da peça. O operador ajusta o potenciômetro que controla a velocidade de acionamento da mesa de forma aproximada, e usina uma peça. Se a rugosidade estiver acima do limite de tolerância, reduz o avanço e usina outra peça. Este procedimento é repetido até que a rugosidade desejada seja atingida.

Contudo, para efeitos de análise experimental, é necessária a determinação do avanço da ferramenta em termos quantitativos. Para isso, foi solicitado ao operador da máquina que regulasse a velocidade de avanço que poderia ser utilizada para cada valor dos diâmetros dos alargadores selecionados. Nesta etapa, foram selecionadas duas

ferramentas de cada diâmetro, utilizadas ao mesmo tempo, uma em cada cabeçote da máquina-ferramenta.

Com a máquina regulada para um dos diâmetros, a velocidade de avanço foi determinada pela medição do tempo do percurso da mesa entre os dois sensores que determinam a troca de velocidade. Conhecendo-se o tempo e a distância entre os sensores, pôde-se calcular o avanço da ferramenta. Este procedimento foi realizado após a regulagem da máquina para cada um dos diâmetros dos alargadores. A Tabela 3.3 mostra os valores determinados para cada diâmetro.

**Tabela 3.3 – Parâmetros de corte regulados pelo operador no pré-teste**

Diâmetro nominal do alargador [mm]	Diâmetro nominal do furo da peça [mm]	$v_c$ (a 1.000 rpm) m/min	$v_f$ [mm/min]	$f$ [mm]
7,011	6,725	22	500	0,5
9,011	8,4	28	480	0,48
11,045	10,4	35	450	0,45

As condições mostradas na tabela acima foram tomadas como referência para o prosseguimento dos ensaios. Nestes ensaios, foram avaliadas a rugosidade e diâmetro dos furos produzidos, tanto no início quanto no final dos furos produzidos.

### 3.9.1 Ferramentas fabricadas pela empresa

Este teste foi realizado inicialmente com as ferramentas fabricadas pela própria empresa, nos três valores de diâmetros, na máquina-ferramenta da empresa.

Como um dos objetivos deste teste é avaliar a influência da variação da velocidade de corte ou do avanço sobre a rugosidade e diâmetro do furo, foram selecionadas combinações de parâmetros para serem testadas. Tais parâmetros estão mostrados na Tabela 3.4 até a Tabela 3.6.

**Tabela 3.4 – Parâmetros de corte - Diâmetro  $\phi$  7,011**

Número do ensaio	Parâmetros de corte	
	$v_c$ (n) [m/min] ([rpm])	$f$ [mm]
1	22 (1000)	0,5
2	18 (800)	0,5
3	26 (1200)	0,5
4	22 (1000)	0,3
5	22 (1000)	0,6

Tabela 3.5 – Parâmetros de corte – Diâmetro  $\phi$  9,011

Número do ensaio	Parâmetros de corte	
	$v_c$ (n) [m/min] ([rpm])	f [mm]
1	28 (1000)	0,48
2	23 (800)	0,48
3	34 (1200)	0,48
4	28 (1000)	0,3
5	28 (1000)	0,6

Tabela 3.6 – Parâmetros de corte – Diâmetro  $\phi$  11,045

Número do ensaio	Parâmetros de corte	
	$v_c$ (n) [m/min] ([rpm])	f [mm]
1	28 (1000)	0,45
2	23 (800)	0,45
3	34 (1200)	0,45
4	28 (1000)	0,3
5	28 (1000)	0,6

Os valores de velocidade de corte foram fixados em 20% acima e abaixo do valor de referência, devido às limitações da máquina. Os valores de avanço foram selecionados de forma a estarem próximos aos limites das recomendações encontradas nas referências. Para cada condição, foram usinadas 5 peças por cada ferramenta, melhorando estatisticamente a confiabilidade dos resultados.

Cada ferramenta usinou todas as combinações de parâmetros. O desgaste sofrido durante essa seqüência foi desprezado, pois, segundo as estimativas iniciais, cada ferramenta usina até 1.500 peças, e a execução de 25 peças não provocaria desgaste significativo.

Os resultados encontrados, como será visto no item 4.3, apresentaram grandes dispersões, o que indicou grande instabilidade do processo. Com isso iniciou-se um processo investigativo para determinar as causas das perturbações no processo. Por esse motivo, estes ensaios foram repetidos na máquina-ferramenta do LMP, com os mesmos parâmetros e ferramentas de corte.

### 3.9.2 Ferramentas fornecidas pelo fabricante A

Visando obter informações sobre a influência de diferentes ferramentas nos resultados, estes testes também foram repetidos com os alargadores fornecidos pelo fabricante A. Devido a limitações de fornecimento de ferramentas, foram testadas

somente com alargadores de diâmetro 9,011 mm. Entretanto, foram ensaiadas algumas condições adicionais, sendo que cada uma realizou todos os ensaios descritos na Tabela 3.7. As ferramentas foram as de diâmetro 9,011, número 10, 12, 14 e 15, fornecidas pelo fabricante A. Estes testes foram realizados somente na máquina-ferramenta do LMP.

**Tabela 3.7 – Parâmetros de corte ensaiados com as ferramentas de diâmetro 9,011 e número 10, 12, 14 e 15**

Número do ensaio	Parâmetros de corte	
	$v_c$ (n) [m/min] ([rpm])	f [mm]
1	28 (1000)	0,48
2	23 (800)	0,48
3	34 (1200)	0,48
4	28 (1000)	0,3
5	28 (1000)	0,6
6	40 (1413)	0,48
7	47,5 (1678)	0,48

Nota-se que as ferramentas descritas na tabela acima são alargadores helicoidais sem revestimento (números 10 e 12) e com revestimento (14 e 15).

O alargador de canais retos foi submetido apenas a duas condições para observar se atendia às exigências de qualidade do furo produzido.

### 3.9.3 Ferramentas fornecidas pelo fabricante B

As ferramentas foram submetidas somente a algumas condições de corte, com o objetivo de averiguar se os resultados atendiam às exigências. Isso foi realizado tanto nas ferramentas originais, quanto nas ferramentas com geometria modificada.

## 3.10 Ensaio de Vida de Ferramentas

Ensaio de vida consistem em monitorar a evolução dos diferentes tipos de desgaste da ferramenta, em intervalos pré-determinados, desde o começo do uso até quando a ferramenta perde suas características de corte, ou de atender a qualidade da peça.

Optou-se por avaliar a rugosidade ( $R_a$ ), o diâmetro, a cilindridade e circularidade das peças, as marcas de desgaste da ferramenta, e o momento torçor e a

força de avanço gerados durante a usinagem. Estes parâmetros foram escolhidos devido à disponibilidade de equipamentos e por serem representativos em relação ao processo. Estas avaliações foram realizadas seguindo os procedimentos descritos anteriormente.

Devido à infra-estrutura necessária para a realização das atividades relacionadas a estas avaliações, decidiu-se por dividir as atividades entre o LMP e a empresa.

Na empresa foram usinadas as peças, aproveitando a estrutura de produção em série. O uso de uma máquina-ferramenta dedicada e um sistema de fixação de peça automatizado fez com que o tempo de realização dos ensaios fosse reduzido comparado ao que seria necessário para a realização no LMP.

No LMP foram realizadas a avaliação das ferramentas por registro fotográfico e a medição dos esforços de usinagem. Para que essas atividades pudessem ser executadas na empresa, seriam necessárias adaptações substanciais na máquina-ferramenta. Além disso, outras equipes de pesquisa do LMP também utilizam alguns dos equipamentos, e poderiam ser prejudicadas.

Com base em informações fornecidas pela empresa, foram definidos os intervalos de avaliação. Segundo as informações iniciais fornecidas pela empresa, cada ferramenta produz em média 1.000 a 1.500 peças. Para as medições de diâmetro e rugosidade, foi adotado um intervalo de 50 peças, e para circularidade e cilindridade 100 peças, pela respectiva facilidade de medição. Assim obteve-se uma boa representação do comportamento destas variáveis ao longo da vida da ferramenta. Para a avaliação da marca de desgaste, força de avanço, momento torçor e realização do registro fotográfico, foi definido um intervalo de 200 peças por ferramenta, pois estas atividades deveriam ser realizadas no LMP. Ainda assim, ter-se-iam pontos suficientes para definir a tendência do comportamento destes parâmetros.

O ciclo de atividades iniciou-se com a avaliação das ferramentas, e em seguida foram realizados o registro fotográfico e a medição dos esforços no LMP. Após isso, na empresa, as ferramentas foram colocadas a usinar 200 peças cada. Dando continuidade, as ferramentas retornam para o LMP, fechando assim o ciclo. Esse processo foi repetido até que todas as ferramentas atingissem o fim de vida.

A realização deste ensaio implicou num elevado custo, referente às despesas de viagem até a empresa (situada a aproximadamente 200 km do LMP). Cada etapa significou dois dias de ensaios na empresa, acarretando também custos de hospedagem.

Além disso, o tempo necessário foi longo, devido à necessidade de condicionar as visitas com a disponibilidade da máquina-ferramenta da empresa, após terem sido

realizadas as atividades no LMP. Ocorreram casos em que o intervalo entre a realização de duas etapas consecutivas foi de mais de 3 semanas.

No decorrer dos ensaios, observou-se que as ferramentas apresentaram desempenho muito superior em relação à estimativa de número de furos produzidos. Associado ao elevado custo e tempo para a realização de cada etapa, o intervalo de avaliação foi aumentado quando as ferramentas ultrapassaram 2.000 peças produzidas.

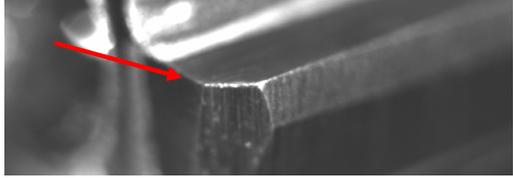
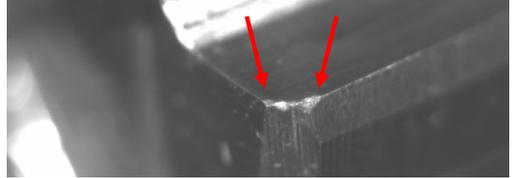
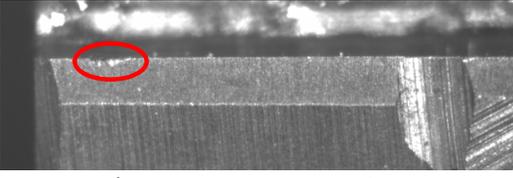
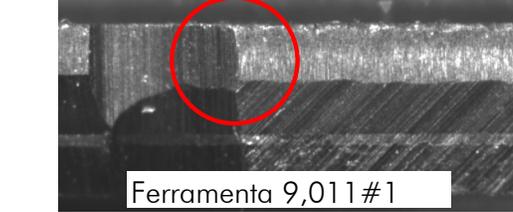
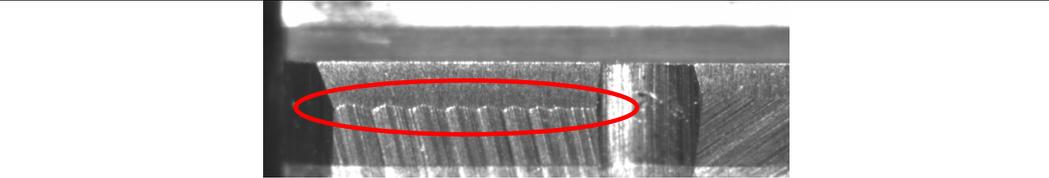
## 4 ANÁLISE DOS RESULTADOS

### 4.1 As ferramentas de corte

A análise das ferramentas fabricadas pela própria empresa revelou que não há padronização da afiação entre elas. As principais observações são em relação à padronização da afiação. Foram observados diversos lascamentos e falhas nos gumes e guias. Erros de forma também foram observados.

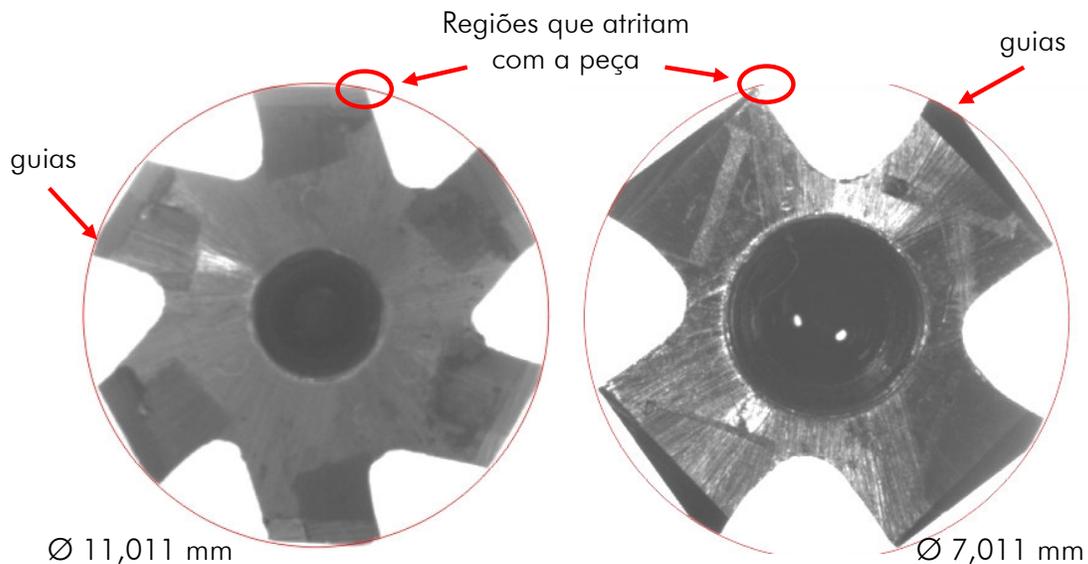
Na tabela a seguir, são mostrados os tipos de inconsistências encontradas.

Tabela 4.1 – Avarias encontrados nas ferramentas novas fabricados pela própria empresa

	
Má afiação (raio de gume elevado)	Lascamentos nos gumes
	
Má afiação (concentradores de tensão)	Lascamentos nas guias
	
Ferramenta 9,011#1	Ferramenta 9,011#2
Diferenças entre ângulos de incidência ortogonal	
	
Falta de padronização das condições de usinagem durante a afiação (avanço)	

Outras observações importantes foram feitas durante a análise das fotos de topo. Com o auxílio de um *software* foi traçada uma circunferência que se adequasse ao perfil encontrado.

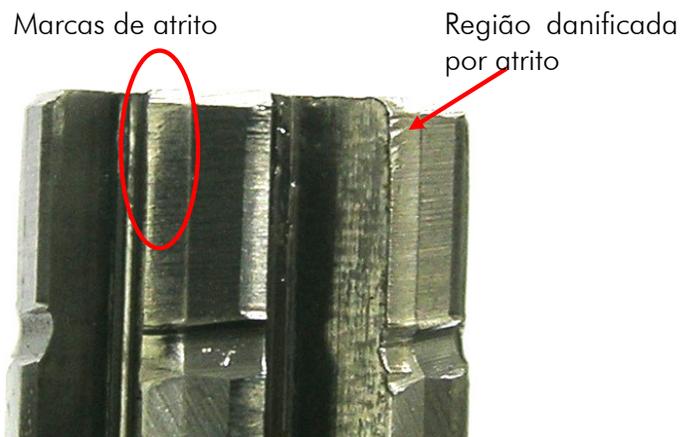
Com isso, observou-se que a base da ferramenta que suporta os insertos de metal-  
duro encontra-se muito próxima, ou até mesmo sobre a circunferência ideal. Isto é, verificam-se erros de detalonamento das ferramentas. Isso pode ser observado mais intensamente nas ferramentas de diâmetro 7,011 e 11,011 mm (Figura 4.1 e Figura 4.2).



**Figura 4.1 – Falha na região oposta da face de cada inserto**

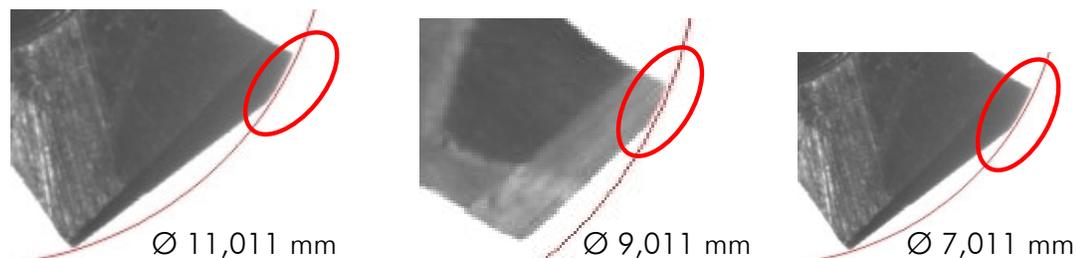
Esta região é produzida com o mesmo material da haste da ferramenta (aço-rápido), e portanto, não possui propriedades de corte e também não tem função de guia da ferramenta.

Esta região entra em contato com a superfície alargada, podendo prejudicar sua qualidade. Estas interferências foram observadas nas ferramentas utilizadas nos ensaios, conforme a Figura 4.2.



**Figura 4.2 – Marcas decorrentes do contato entre a base dos inserts e a superfície usinada da peça**

Outro aspecto interessante em relação às fotos de topo foi o fato de que, escolhidos 3 gumes para descrever a circunferência, os outros gumes não coincidem necessariamente com esta referência. Isto é, dependendo de quais gumes são escolhidos, as circunferências possuem centros diferentes. Isto pode ser observado na figura abaixo. Esta característica foi identificada em ferramentas dos três grupos de diâmetros.



**Figura 4.3 – Detalhe das ferramentas: nem todos os gumes pertencem à mesma circunferência**

Estas diferenças provavelmente decorrem do processo de afiação, que gera esforços demasiadamente grandes para serem suportados por ferramentas longas e delgadas. Isso não pode ser percebido durante a medição do diâmetro da ferramenta, pois esta leva em conta apenas 2 gumes.

Essas imagens foram comparadas às fotos realizadas dos alargadores inteiriços de metal-duro do fabricante A. Nas imagens registradas, pode-se observar que a circunferência ideal coincide exatamente com todos os gumes da ferramenta (Figura 4.4). Disso decorre que estas ferramentas possuem menores erros de fabricação em relação às ferramentas fabricadas pela própria empresa.

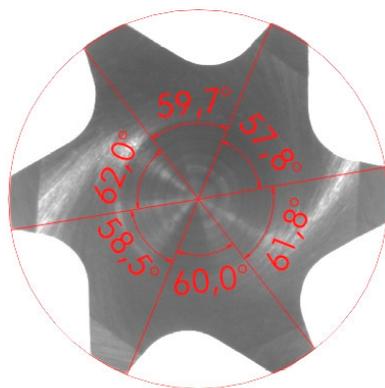


Figura 4.4 – Perfil de um alargador helicoidal do fabricante A

Percebe-se também na foto acima que apenas as guias são passíveis de contato com a superfície usinada, reduzindo a possibilidade de prejudicar a qualidade da usinagem.

Em relação às ferramentas de diâmetro 9,011, tem-se ferramentas de dois tipos diferentes. Duas ferramentas apresentam gumes de mesma espessura e duas apresentam gumes diferenciados, conforme Figura 4.5. Nota-se que o plano ortogonal coincide com o plano definido pelas fotos de topo. Assim, pode-se medir o ângulo de saída passivo do gume secundário ( $\gamma'_p$ ). Nas ferramentas que possuem gumes iguais, este ângulo é zero. Nas ferramentas que possuem gumes diferenciados, 3 gumes possuem ângulo zero e os outros 3 possuem ângulo de saída passivo do gume secundário aproximadamente igual a  $5^\circ$ .

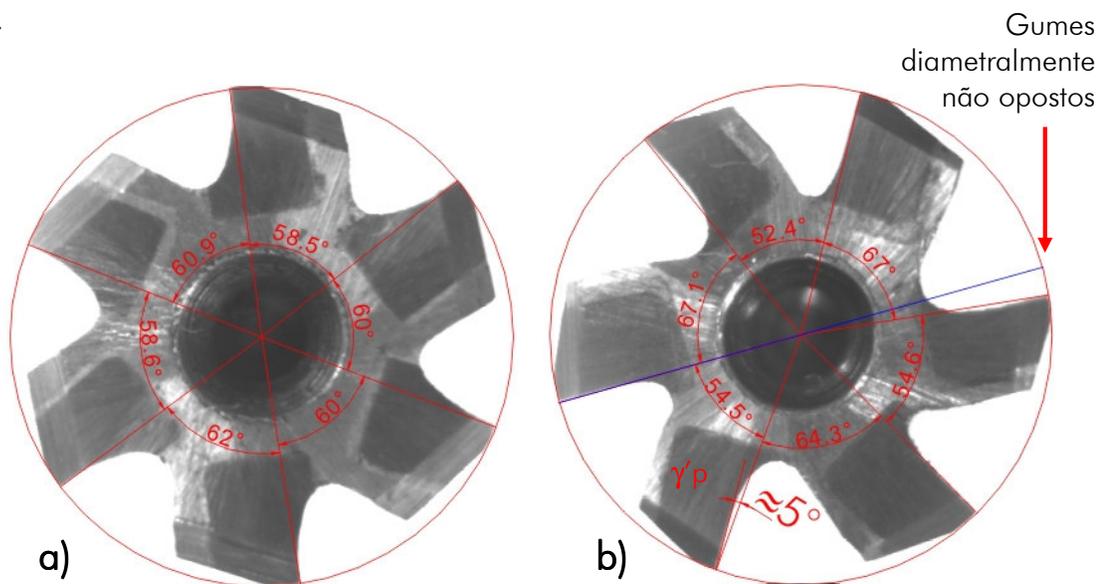


Figura 4.5 – Os dois perfis diferentes das ferramentas de diâmetro 9,011

Esta diferença de perfil foi provavelmente realizada para impor uma divisão não-uniforme dos gumes das ferramentas. Tal característica tem como objetivo a redução de possíveis vibrações do processo.

Da maneira que foi realizada, esta diferença de divisão de ângulos teve como consequência o fato de que os gumes não são diametralmente opostos (Figura 4.5 b)). Com isso, a medição de diâmetro como emprego de micrômetros resulta em valores incorretos, o que deve ser evitado.

A divisão não-uniforme dos gumes é percebida na ferramenta do fabricante A (Figura 4.4). As diferenças entre os valores dos ângulos são de aproximadamente 2 graus, conforme recomendado pela bibliografia, menores do que as encontradas nas ferramentas de fabricação própria.

## 4.2 Ensaios de Vida de Ferramentas

O início dos ensaios de vida de ferramentas já apresentou algumas dificuldades. As ferramentas de menor diâmetro (7,011 mm) não produziram furos de boa qualidade, pois todas as peças produzidas apresentavam desvio de furo. Segundo os operadores, a sobremedida era muito pequena. Nestas ferramentas, o valor é de 0,3 mm. Apesar de se encontrar dentro dos limites apresentados nas referências, não foi suficiente para que as ferramentas se guiassem corretamente nos furos pré-existentes. Outras ferramentas também apresentaram dificuldades nas primeiras peças produzidas, conforme Tabela 4.2.

**Tabela 4.2 – Situação geral das ferramentas do ensaio de vida**

Código	Nro peças	Motivo do fim do teste
7,011#1	≈ 10	Os furos apresentaram desvio, ocasionado pela falta de sobremetal da peça
7,011#2	≈ 10	
7,011#3	≈ 10	
7,011#4	≈ 10	
9,011#1	≈ 5	Diâmetro da peça na saída da ferramenta maior do que especificado.
9,011#2	6.600	Marcas na superfície usinada
9,011#3	800	Marcas na superfície usinada
9,011#4	600	Ferramenta quebrada durante o ensaio devido a um erro de fixação da peça (pinça de fixação sem ar comprimido).
11,011#1	600	Rugosidade fora do especificado ( $R_a > 2 \mu\text{m}$ )
11,011#2	2.800	Ensaio abortado
11,011#3	≈ 10	Rugosidade fora do especificado ( $R_a > 2 \mu\text{m}$ )
11,011#4	≈ 10	Pino “passa” trancando na peça

Pela tabela acima, pode-se perceber que os critérios que levam as ferramentas ao fim de vida são bastante diferenciados. Foram observados os seguintes critérios de fim de vida:

- Alto valor de rugosidade;
- Desvio de furo (parte da superfície da furação não é removida – Figura A.1);
- Marcas na superfície usinada;
- Diâmetro acima da tolerância;
- Erros de cilindridade (verificado pelo pino “passa”);
- Quebra da ferramenta.

Além das situações encontradas, foi observado que as ferramentas são trocadas por apenas um motivo além dos encontrados: o fim do lote de produção e início de usinagem de diâmetros diferentes.

Como pode ser observado, os ensaios prosseguiram adequadamente apenas com duas ferramentas, 11,011 #2 e a 9,011 #2. Os resultados obtidos serão apresentados na seqüência.

#### **4.2.1 Avaliação da ferramenta de diâmetro 11,011 mm**

Conforme mencionado, optou-se por encerrar os ensaios com a ferramenta 11,011 #2 devido à falta de tempo, priorizando a ferramenta 9,011 #2.

Na Figura 4.6, nota-se que, tanto o desgaste de flanco médio quanto máximo, não sofrem um aumento significativo à medida que progride o comprimento usinado.

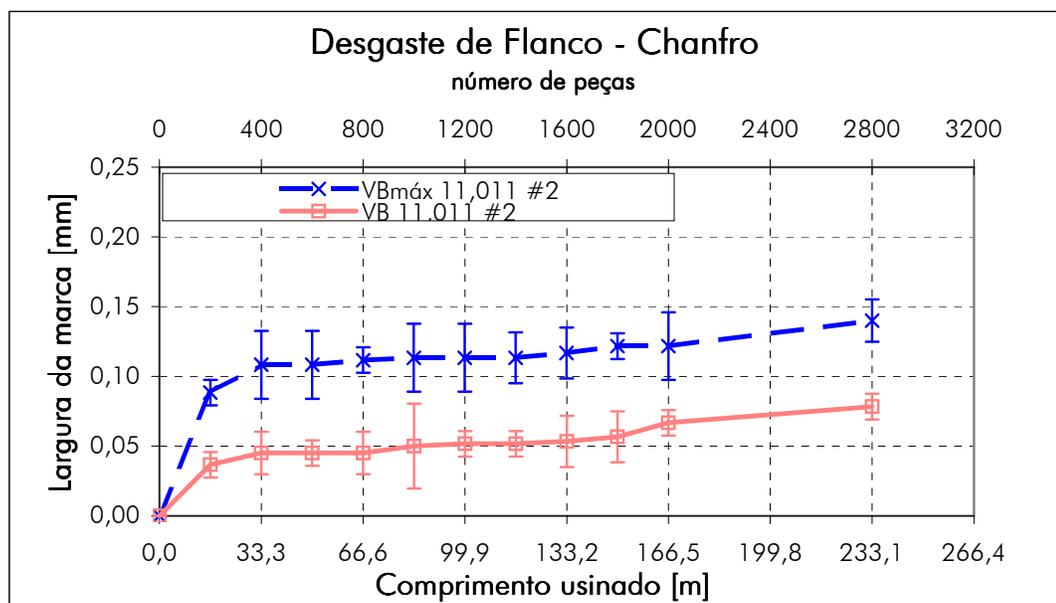


Figura 4.6 – Evolução do desgaste de flanco da ferramenta 11,011 #2

Entretanto, estas pequenas variações da geometria do gume são responsáveis por um aumento da ordem de 40% no momento torçor, conforme a Figura 4.7, embora na força de avanço não seja observado tal efeito.

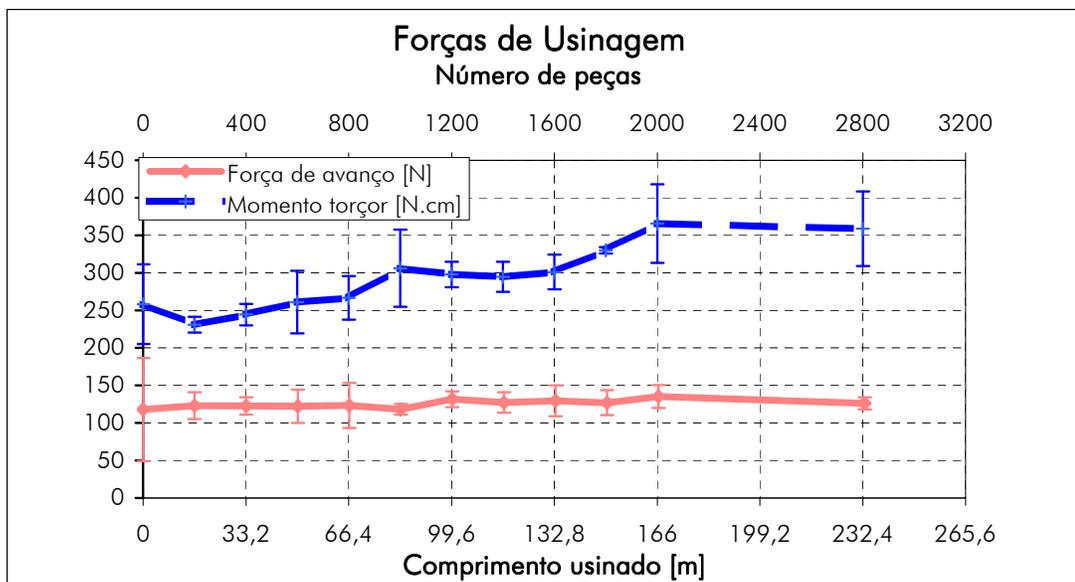
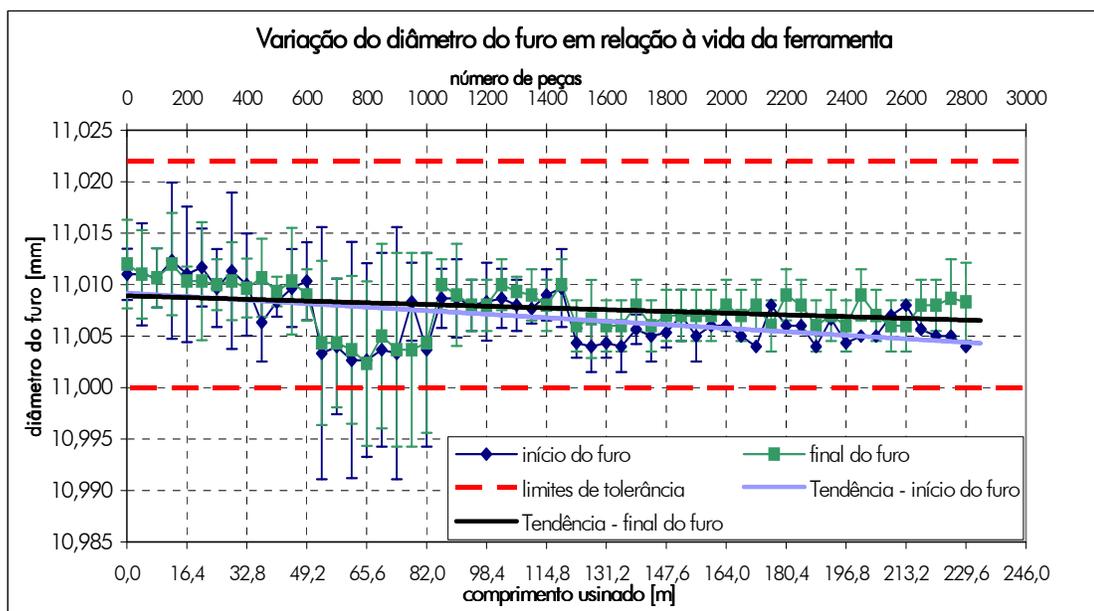


Figura 4.7 – Evolução das forças de usinagem da ferramenta 11,011 #2

Este aumento pode ser relacionado ao atrito gerado pela quina, provocando uma reação tangente ao diâmetro da ferramenta. Além disso, um pequeno desgaste das guias pode provocar um maior amassamento da superfície gerada, contribuindo para o

aumento do momento torçor. Por outro lado, estas variações não são significativas no sentido do avanço, visto que não alteram a espessura do cavaco gerado.

Em relação ao diâmetro das peças usinadas, pode-se afirmar que não há variação significativa do início ao final da vida, como pode ser visto na Figura 4.8. A princípio, observa-se que no início do ensaio a ferramenta apresenta valores pouco maiores, com uma leve tendência de diminuição, e em seguida, uma estabilização. Isto pode ser explicado por uma provável estabilização dos gumes e das guias, ou mesmo pelos erros de medição dos furos.



**Figura 4.8 – Variação do diâmetro dos furos produzidos pela ferramenta 11,011#2**

Em relação à rugosidade das peças, observa-se uma tendência de diminuição dos valores de  $R_a$  (Figura 4.9). Uma hipótese para tal fato é o arredondamento do raio do gume secundário, que no caso dos alargadores é a guia da ferramenta, o que também explica o aumento do momento torçor.

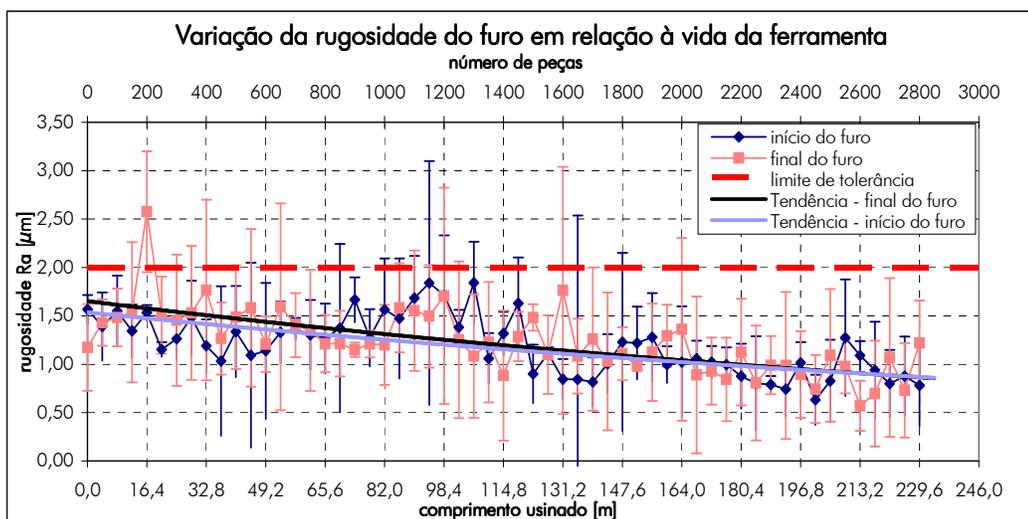


Figura 4.9 – Variação da rugosidade dos furos produzidos pela ferramenta 11,011#2

Em relação à cilindridade e à circularidade, pode ser verificado na Figura 4.10 que não há variações significativas. Entretanto, pode-se observar um pequeno aumento no valor de cilindridade.

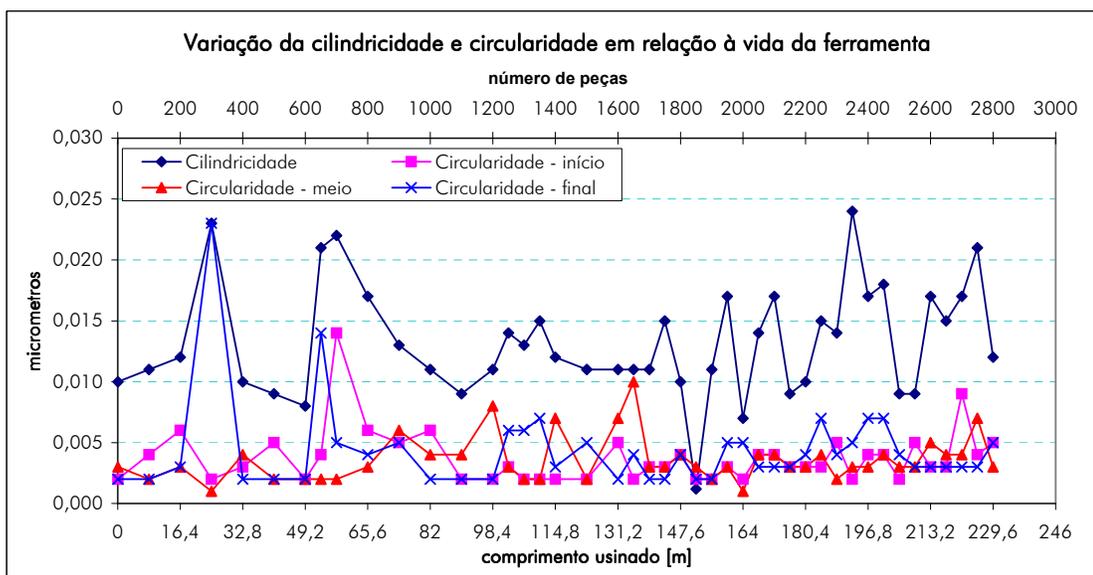
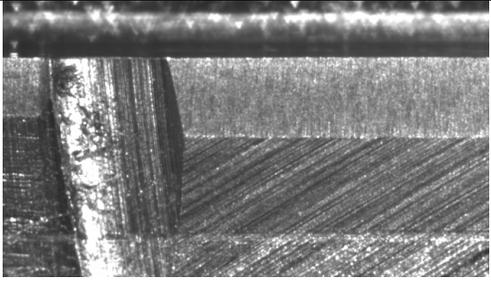
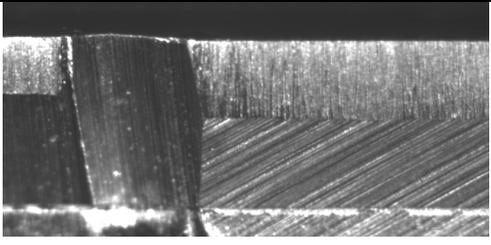
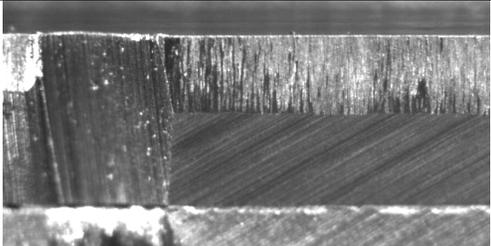
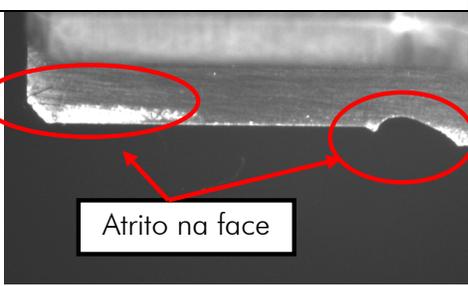
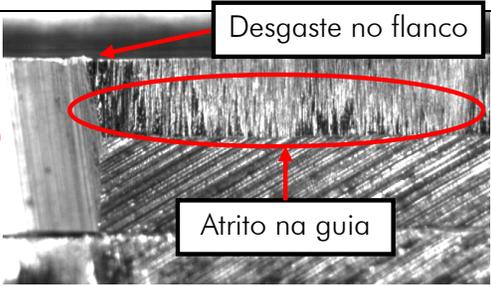


Figura 4.10 – Variação da cilindridade e circularidade em relação à vida da ferramenta 11,011#2

Na tabela a seguir, observa-se a seqüência de fotos da face e guia do gume 1 até 2.800 furos. Podem ser observadas fortes marcas de atrito na face das ferramentas, e também marcas de atrito nas guias. O pequeno desgaste de flanco também pode ser visto.

Tabela 4.3 – Seqüência de fotos da face e guia

	Face	Guias
Novo		
Com 1000 furos (83 m)		
Com 2000 furos (166 m)		
Com 2800 furos (233 m)		

#### 4.2.2 Avaliação da ferramenta de diâmetro 9,011 mm

Conforme mencionado anteriormente, os ensaios com a ferramenta 9,011#2 foram priorizados, e esta ferramenta usinou até o momento em que as peças produzidas não mais atendiam às exigências de qualidade.

No decorrer dos ensaios, observou-se que à medida que a ferramenta se desgastou, as peças produzidas começaram a aquecer, a ponto de dificultar o manuseio. Isto ocorreu após aproximadamente 4.000 peças. Ao atingir 6.600 peças, as superfícies usinadas se apresentavam irregulares, de modo que não mais poderiam ser aceitas peças com estas características. O teste foi interrompido, pois atingiu-se o final de vida da ferramenta.

Após o final do ensaio, esta ferramenta retornou ao LMP, onde foi realizada a última avaliação. Em relação ao desgaste de flanco, a evolução dos valores não foi muito acentuada e os mesmos tenderam a se estabilizar, conforme a Figura 4.11.

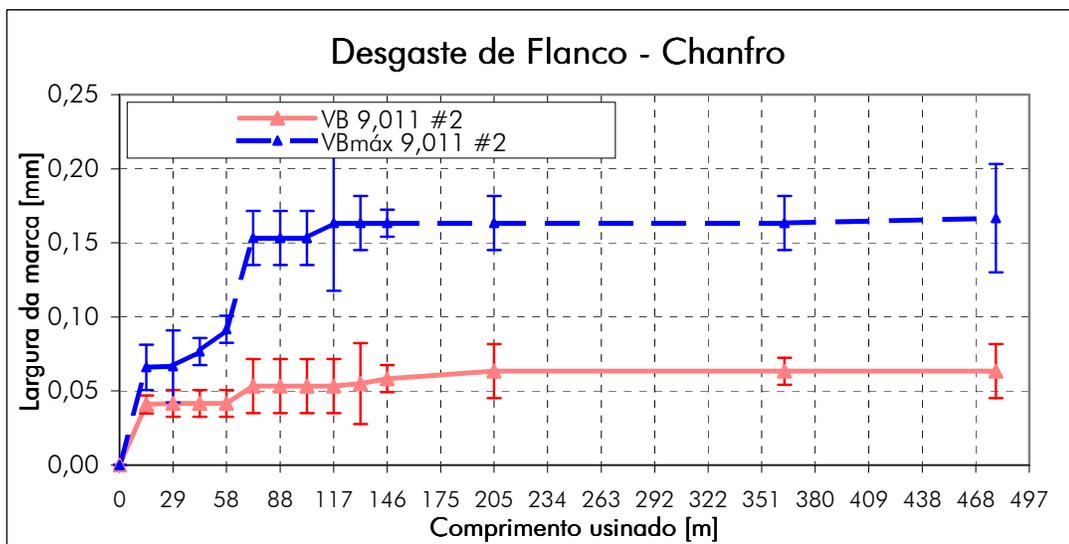


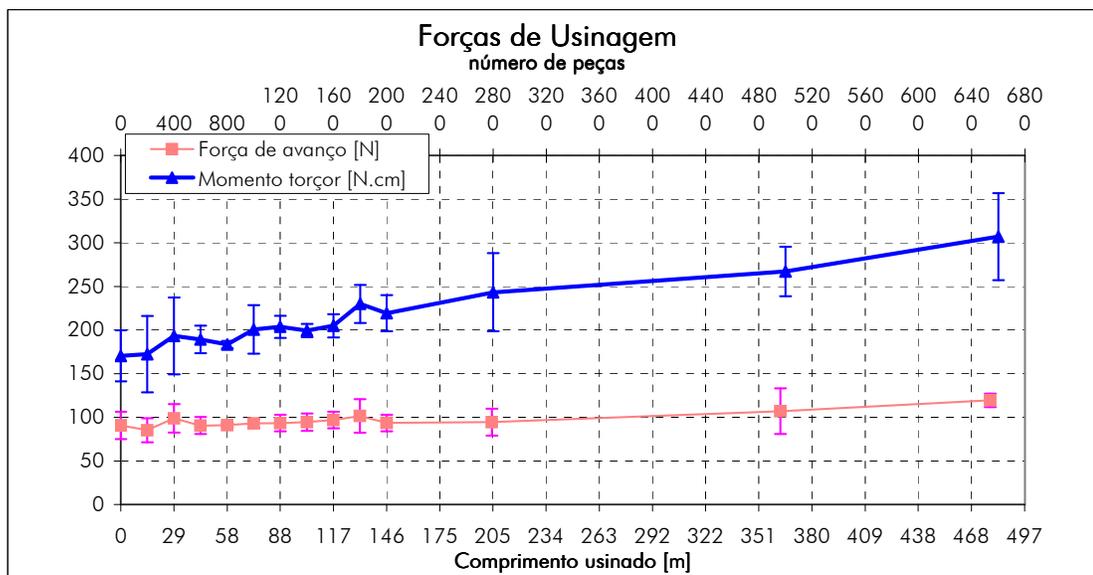
Figura 4.11 – Evolução do desgaste de flanco da ferramenta 9,011#2

Tabela 4.4 – Comparação entre ferramenta nova e desgastada

	Face	Flanco (chanfro)
Ferramenta Nova		
Após 6.600 furos (478 m)		

Entretanto, houve um aumento do momento torçor. Ao final da vida, os valores do momento foram praticamente o dobro dos valores no início da vida, como pode ser visto na Figura 4.12. Estas forças elevadas podem levar a erros de forma, como será discutido mais adiante.

Observou-se também forte adesão de material no gume da ferramenta, o que pode ter provocado riscos na peça durante o retorno da ferramenta.



**Figura 4.12 – Evolução das forças de usinagem da ferramenta 9,011#2**

O aumento do momento torçor pode ser explicado pelo maior atrito gerado entre as guias e a superfície do furo. Este fato explicaria o aquecimento excessivo das peças.

Em relação ao diâmetro das peças produzidas, pode-se perceber pela Figura 4.13 que ocorre uma tendência de estabilização dos valores, provavelmente pela acomodação dos gumes da ferramenta.

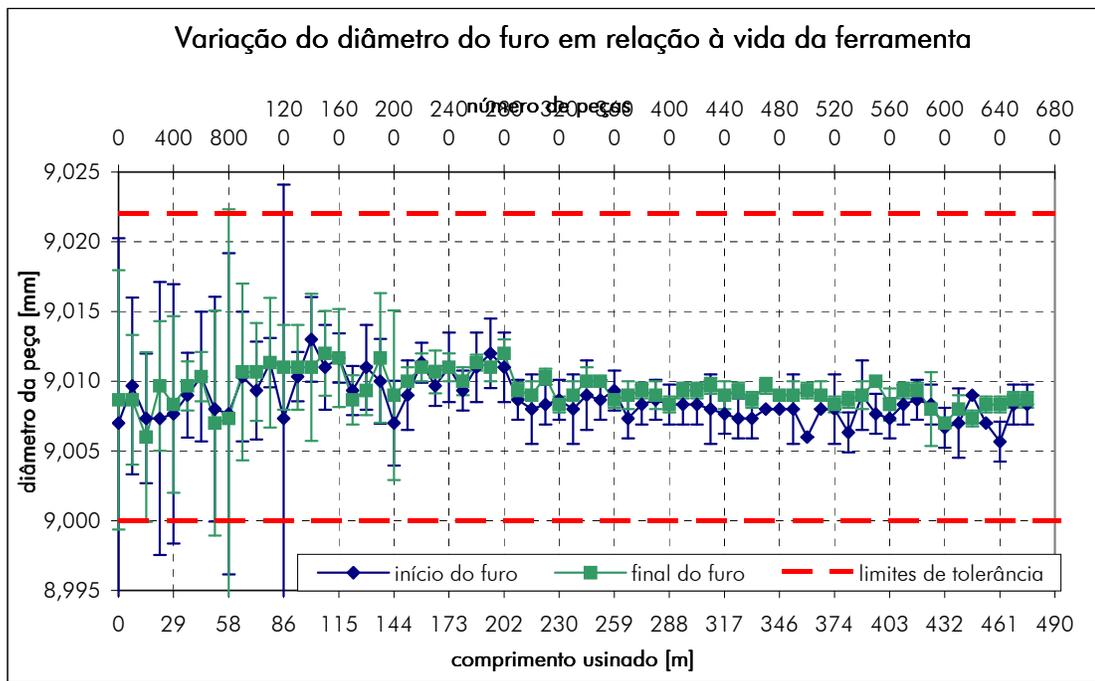


Figura 4.13 – Evolução do diâmetro das peças produzidas pela ferramenta 9,011#2

Um fato interessante foi a tendência de diminuição da rugosidade das peças, conforme pode ser visto na Figura 4.14. Apesar de uma diminuição leve, esta característica foi observada nos resultados das duas ferramentas do ensaio de vida. Isso pode ser entendido pelo aumento do atrito entre as guias da ferramenta e a superfície do furo. Entretanto, neste caso, este aumento foi excessivo, e a ferramenta começou a gerar marcas na superfície da peça. Provavelmente, o excesso de atrito dificulta a lubrificação entre a peça e a ferramenta, e a partir de certo ponto, começa a prejudicar a qualidade das peças.

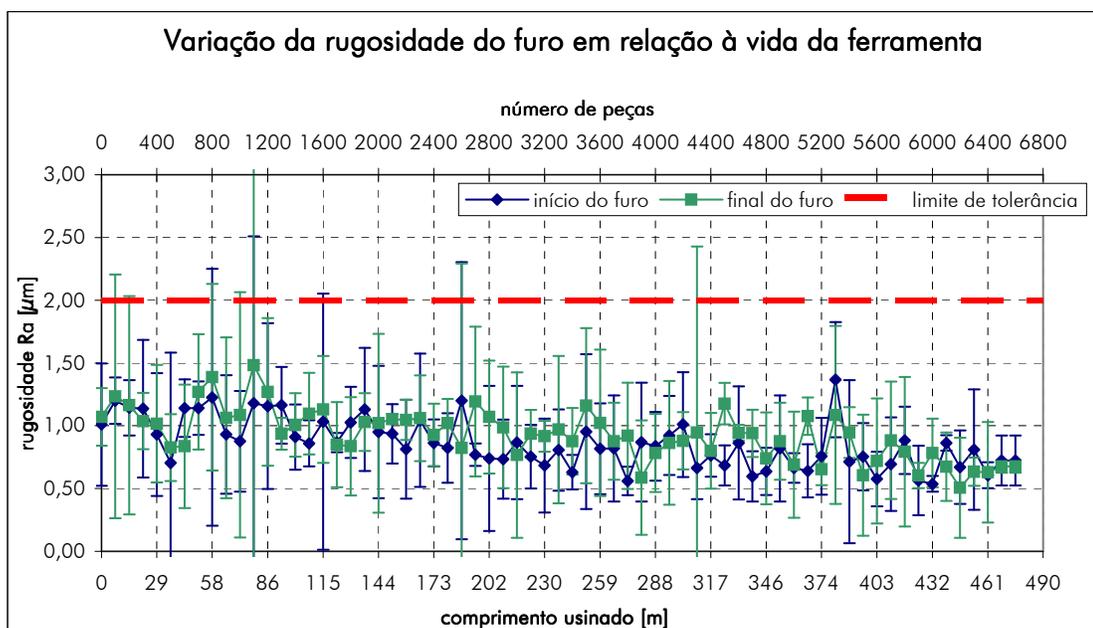


Figura 4.14 – Evolução da rugosidade das peças produzidas pela ferramenta 9,011#2

Para esta ferramenta também foi avaliada a evolução da circularidade e cilindridade dos furos. Os valores de circularidade se mantiveram praticamente constantes, como pode ser visto na Figura 4.15. Os valores de cilindridade, apesar da grande dispersão de valores, apresentaram um leve aumento.

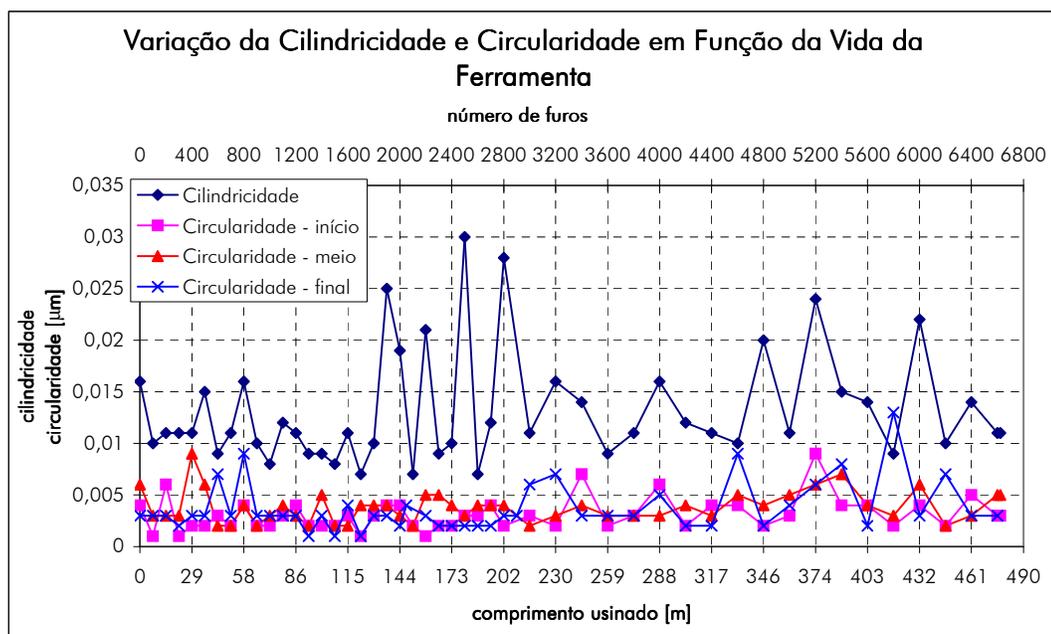


Figura 4.15 – Evolução da cilindridade e circularidade das peças produzidas pela ferramenta 9,011#2

### 4.3 Ensaios de Variação de Parâmetros de Corte

#### 4.3.1 Ferramentas Fabricadas pela Empresa

Durante a realização dos ensaios de vida, verificou-se que ferramentas teoricamente iguais apresentaram diferentes resultados. Algumas delas não puderam atender às exigências de qualidade, e não puderam ser utilizadas.

Para que se pudesse entender melhor quais fatores possuem maior influência sobre o processo, foram considerados os resultados obtidos por 4 ferramentas, duas de diâmetro 7,011 mm e duas de diâmetro 9,011. Estas ferramentas foram analisadas pois notou-se grande diferença de resultados, principalmente em relação à rugosidade dos furos.

Os ensaios foram realizados em chão-de-fábrica, sendo utilizadas diferentes combinações de avanço e velocidade de corte.

Para demonstrar os diferentes resultados, são apresentados os gráficos na Figura 4.16, ferramentas de diâmetro 7,011 mm e Figura 4.17, ferramentas de diâmetro 9,011 mm. Estas curvas representam a rugosidade em função da velocidade de corte de duas ferramentas teoricamente iguais. Os índices "f1" e "f2" representam as ferramentas P1 e P2, respectivamente.

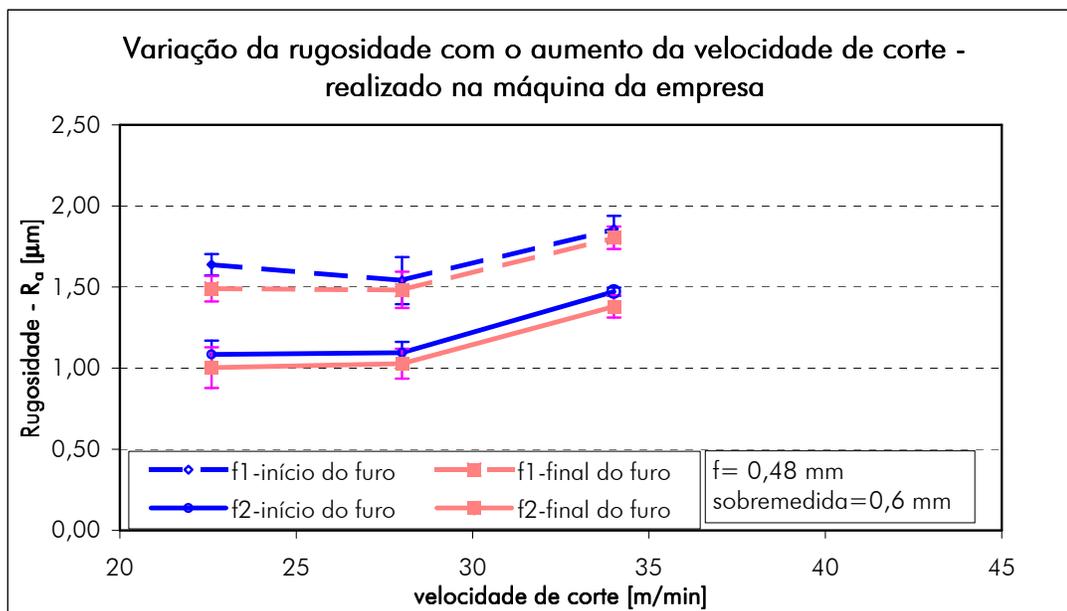
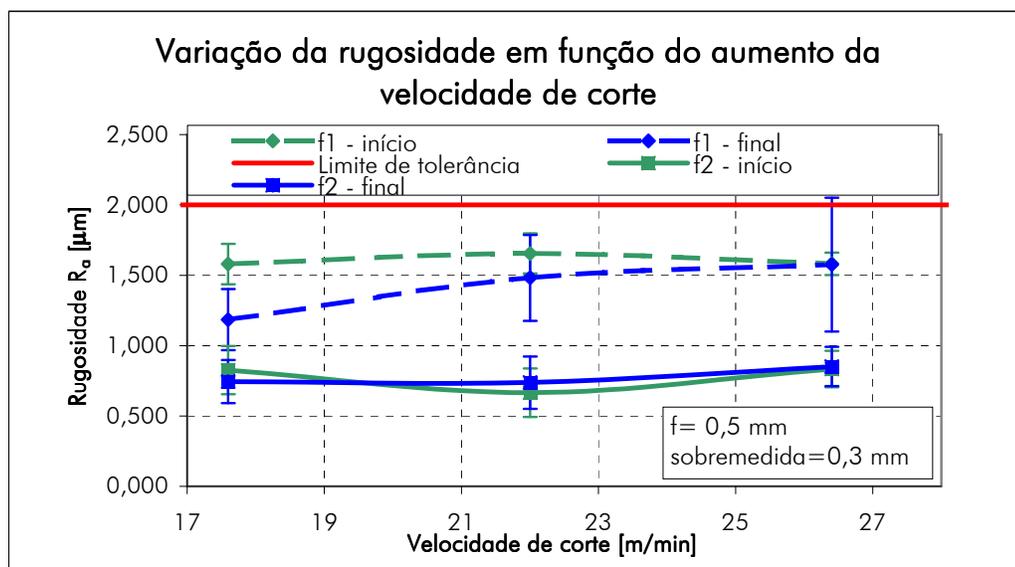
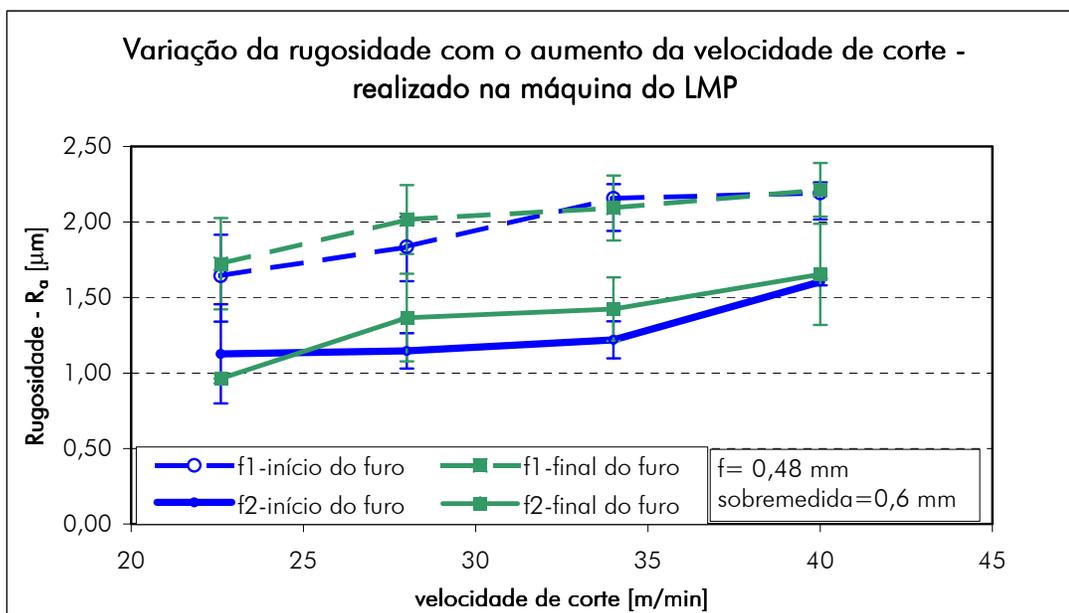


Figura 4.16 – Rugosidade obtida por duas ferramentas de diâmetro 9,011



**Figura 4.17 – Rugosidade obtida por duas ferramentas de diâmetro 7,011**

Para que fosse eliminada a variável máquina-ferramenta, os ensaios foram repetidos no LMP para as ferramentas de diâmetro 9,011 mm. Neste caso, mais um valor de velocidade de corte foi testado. Os resultados podem ser vistos na Figura 4.18, que correspondem aos obtidos na máquina-ferramenta da empresa.



**Figura 4.18 – Rugosidade em função da velocidade de corte - LMP**

Analisando-se os pares de alargadores, foram identificadas duas características diferentes entre eles que podem agir sobre o resultado de rugosidade. Nas ferramentas

de diâmetro 9,011 (Figura 4.19), foi observado que, com a mesma largura das guias, porém com diferentes ângulos de incidência ( $\alpha_0$ ), foram obtidos resultados diferentes. Nas ferramentas de diâmetro 7,011 (Figura 4.20), que também apresentam diferentes valores de rugosidade, tem-se ângulos aproximadamente iguais, com uma maior diferença na largura das guias.

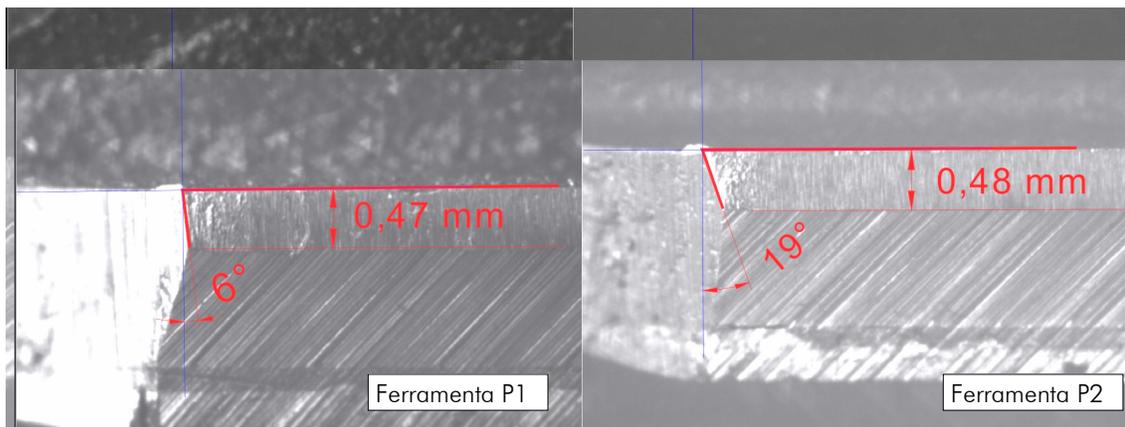


Figura 4.19 – Largura de guia e ângulo de incidência - ferramentas 9,011 mm

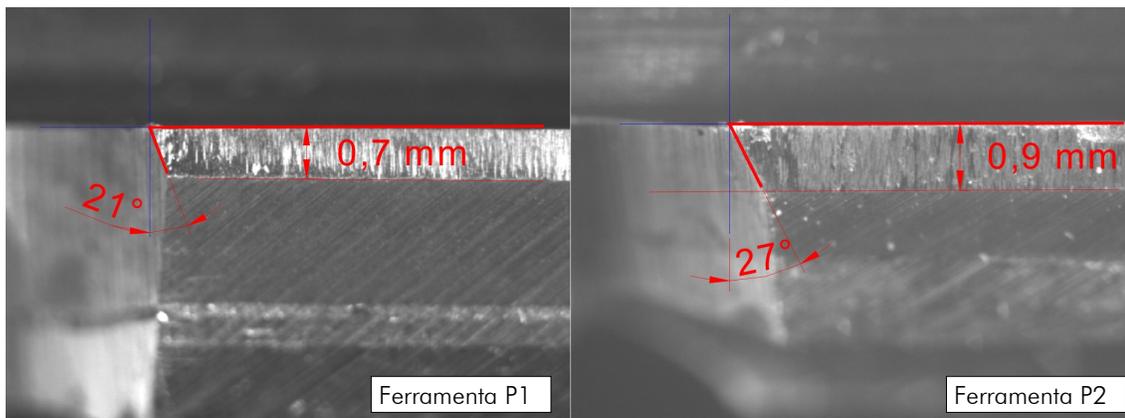


Figura 4.20 – Largura de guia e ângulo de incidência - ferramentas 7,011 mm

Pode-se supor que quanto maior o ângulo de incidência e quanto maior a largura da guia, menor o valor do parâmetro de rugosidade  $R_a$ . Comparando-se a ferramenta 9,011P2 e a 7,011P1, tem-se que a ferramenta com maior largura de guia (7,011P1) apresentou menores valores de rugosidade, para a mesma faixa de velocidade de corte (aproximadamente 25 m/min).

A influência do ângulo de incidência pode ser confirmada ainda pela ferramenta 9,011#1 (Figura 4.21), utilizada no ensaio de vida. Logo nos primeiros furos, este alargador já apresentou furos com diâmetros acima da tolerância.

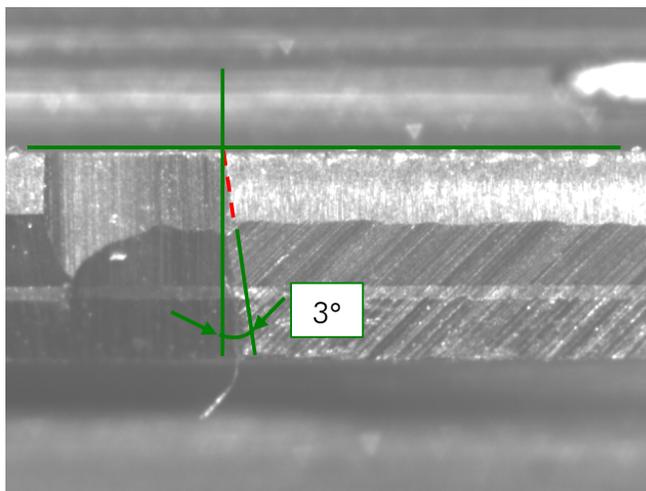


Figura 4.21 - Ângulo de incidência – ferramenta 9,011#1 mm

Pode-se observar que este ângulo é ainda menor do que o presente na ferramenta que apresentou os piores valores de rugosidade. Isso dificulta o corte de material, de modo que o flanco da ferramenta deforma-o, empurrando-o para baixo e para os lados, fazendo com que o diâmetro do furo aumente.

Após discussões técnicas com os operadores do processo, verificou-se que, de certa forma, estes fatores de influência já eram conhecidos. A largura de guia é mantida aproximadamente em 0,6 mm, seguindo orientações mais antigas. O ângulo de incidência, controlado no momento da afiação pela “altura da palheta” (batente de posicionamento angular das faces do alargador em relação ao rebolo), também é alterado conforme a necessidade. São pequenos detalhes como estes que fazem com que se consiga adaptar as ferramentas ao processo. Entretanto, as variações provenientes dos diferentes afiadores não garantem a repetitividade dos resultados das ferramentas. Isto é, cada técnico da ferramentaria afia as ferramentas do modo que entende ser o mais conveniente.

Outra comparação realizada foi uma avaliação simples de quanto o emprego de fluido refrigerante influencia na rugosidade e diâmetro das peças. Foram usinadas três peças com a ferramenta 9,011P2 sem o uso de qualquer tipo de fluido de corte, e os valores comparados com os obtidos nos ensaios realizados com fluido. Foi testada apenas uma condição, e os valores estão na Tabela 4.5. Pode ser notado que a falta de lubrificação aumenta não só os valores de rugosidade, mas também os valores de diâmetro. Além disso, a dispersão, representada pelo desvio padrão, também aumenta significativamente.

**Tabela 4.5 – Comparação entre rugosidade e diâmetros obtidos com e sem o uso de fluido lubri-refrigerante ( $v_c = 28$  m/min,  $f = 0,48$  mm)**

		Rugosidade, $R_a$ [ $\mu\text{m}$ ]		Diâmetro [mm]	
		Início do furo	Final do furo	Início do furo	Final do furo
Sem fluido	Média	4,47	5,16	9,019	9,041
	Desvio padrão	0,61	0,29	0,002	0,005
Com fluido	Média	1,10	1,03	9,010	9,010
	Desvio padrão	0,07	0,09	0,001	0,001

#### 4.3.2 Ferramentas do Fabricante A

A fim de conhecer o desempenho de outras ferramentas, foram testados alargadores fornecidos por empresas especializadas em ferramentas de corte. As primeiras ferramentas testadas foram fornecidas pela empresa A, e referem-se a alargadores inteiriços de metal-duro.

Foram testadas ferramentas com dois tipos de geometria. O primeiro tipo, alargadores helicoidais, foi submetido a ensaios com variação de parâmetros de corte, sendo duas ferramentas revestidas e duas não revestidas. O segundo tipo de ferramenta foi um alargador de canais retos.

##### a) Ferramentas helicoidais com e sem revestimento

Nos primeiros ensaios, foram testadas ferramentas helicoidais, revestidas e não-revestidas, em diferentes condições de corte. O objetivo era identificar se a falta de repetitividade encontrada nas ferramentas da empresa também acontecia com estas ferramentas. Ainda, procurou-se determinar em quais condições de corte estas ferramentas poderiam operar no chão de fábrica.

Um dos resultados importantes foi a repetitividade obtida, como pode ser observado na Figura 4.22 e na Figura 4.23, onde estão os resultados de rugosidade em função do avanço. Estes resultados são aproximadamente constantes entre duas ferramentas, de mesmo lote e com as mesmas características geométricas.

Apesar dos resultados das médias de rugosidade e de diâmetro estarem abaixo da tolerância necessária, estas ferramentas sem revestimento não foram submetidas ao ensaio de vida, pois os resultados obtidos estavam muito próximos dos limites de tolerância, como pode-se perceber através da dispersão associada.

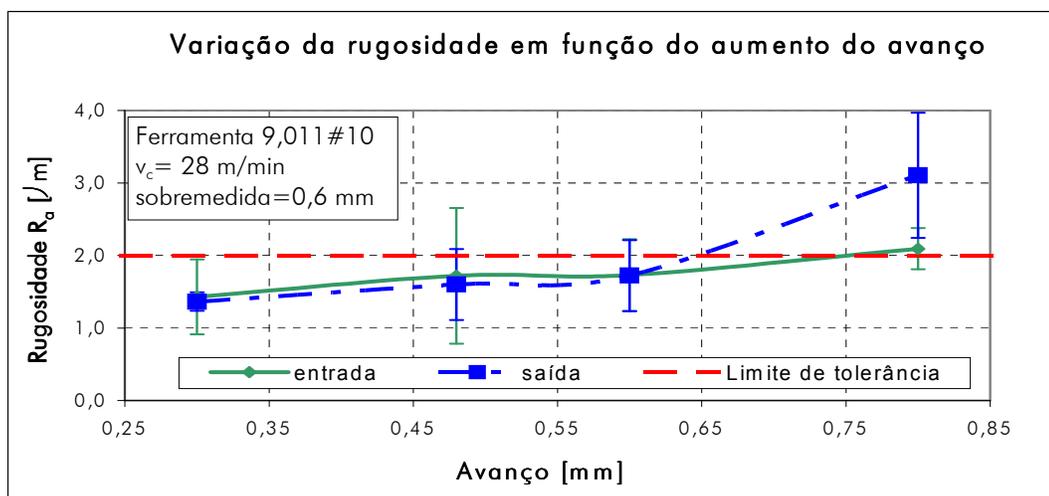


Figura 4.22 – Variação de rugosidade da ferramenta 9,011#10 (fabricante A não-revestidas)

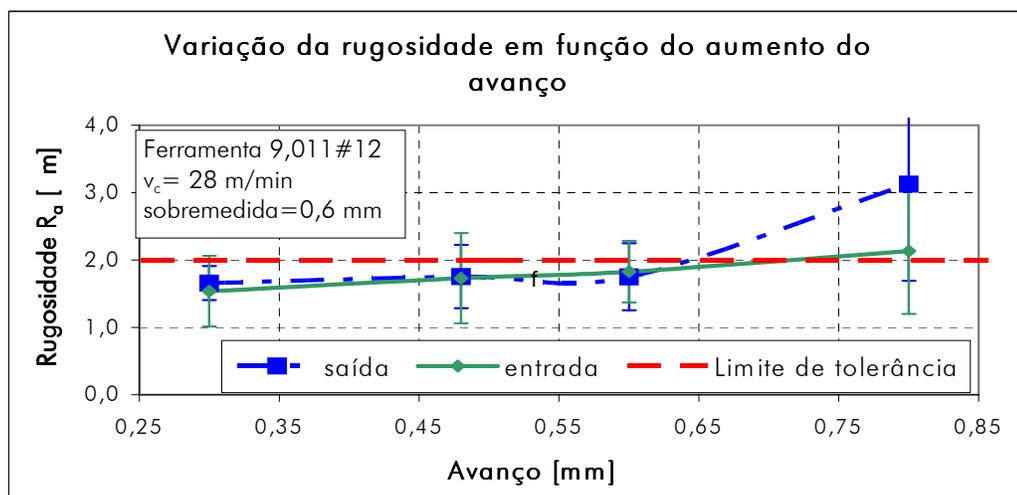


Figura 4.23 – Variação de rugosidade da ferramenta 9,011#12 (fabricante A não-revestidas)

Esta repetitividade de resultados é de extrema importância para que se possa ter uma previsibilidade dos resultados a serem obtidos, podendo-se assim adequar melhor os parâmetros do processo e obter uma maior produtividade.

Pode ser observado também que o aumento do avanço é crítico a partir de um determinado valor, sendo que abaixo deste limite, o avanço não exerce influência significativa sobre a rugosidade.

Os gráficos a seguir representam a evolução da força de avanço e do momento torçor com a variação da  $v_c$  (Figura 4.24 e Figura 4.25) e de  $f$  (Figura 4.26 e Figura

4.27), tanto para as ferramentas não-revestidas, como para as ferramentas com revestimento de TiNAl.

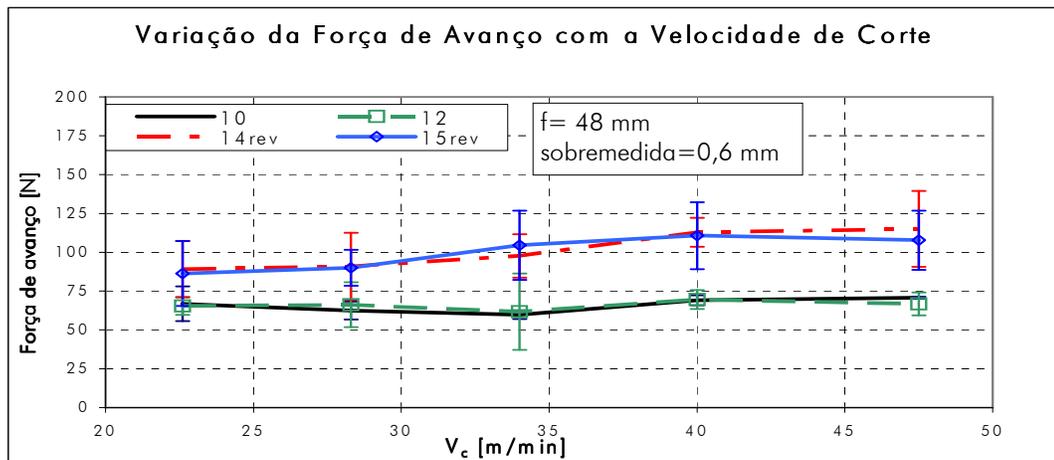


Figura 4.24 – Variação da força de avanço com a velocidade de corte

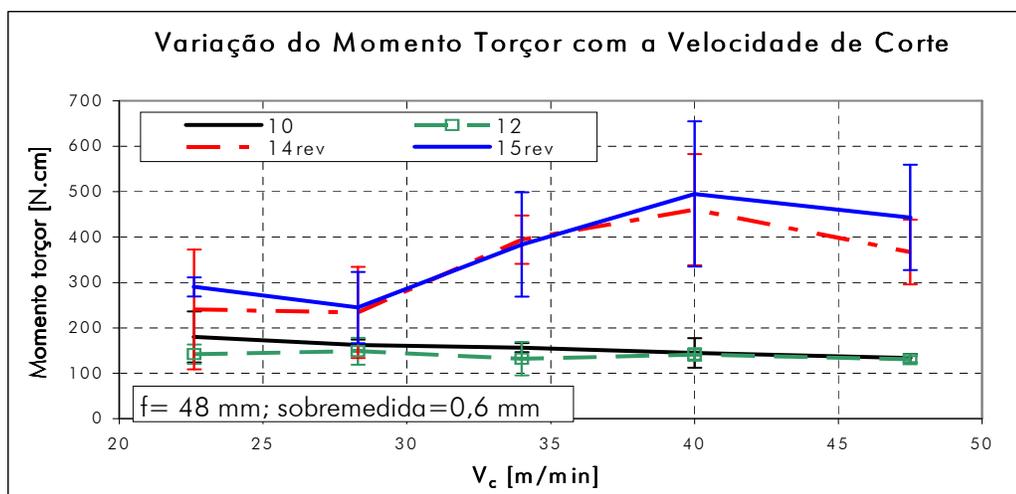


Figura 4.25 – Variação do momento torçor com a velocidade de corte

A camada de revestimento acarreta um aumento do raio de arredondamento do gume maior, tornando a ferramenta menos afiada. Isso dificulta o processo de corte e gera maiores esforços, tanto em relação à força de avanço, quanto em relação ao momento torçor.

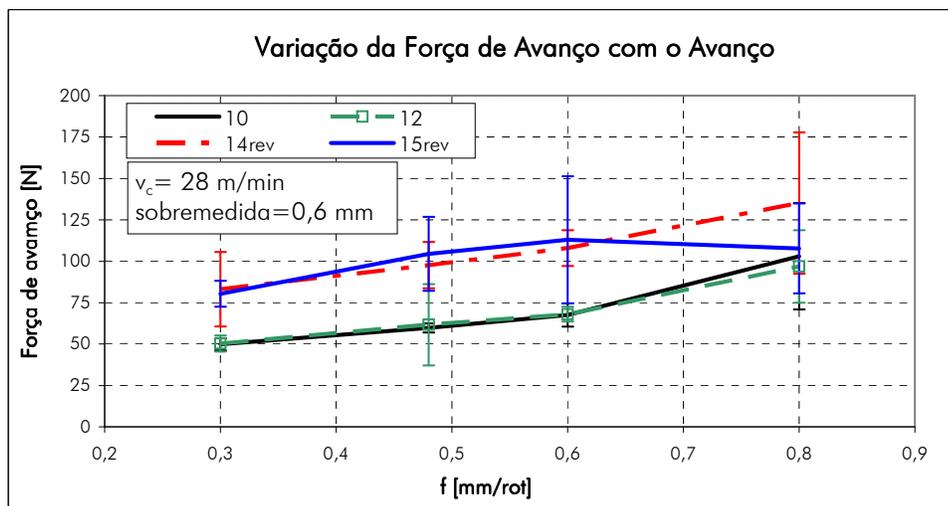


Figura 4.26 – Variação da força de avanço com o avanço

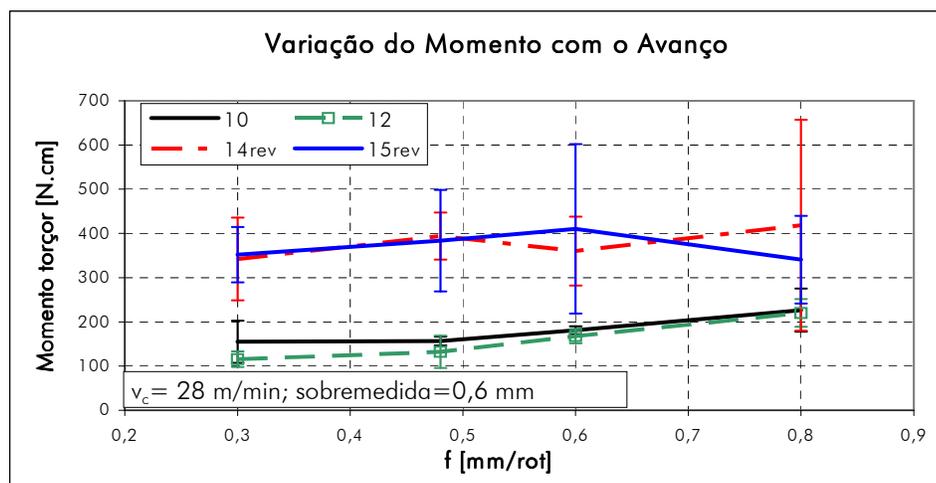


Figura 4.27 – Variação do momento torçor com o avanço

A Figura 4.28 apresenta a variação do diâmetro dos furos usinados em função da velocidade de corte e a Figura 4.29 em função do avanço, para uma das ferramentas não-revestidas (9,011#10). Estes resultados são semelhantes aos obtidos pela outra ferramenta com a mesma característica (9,011#12) e, por isso, os gráficos desta foram omitidos.

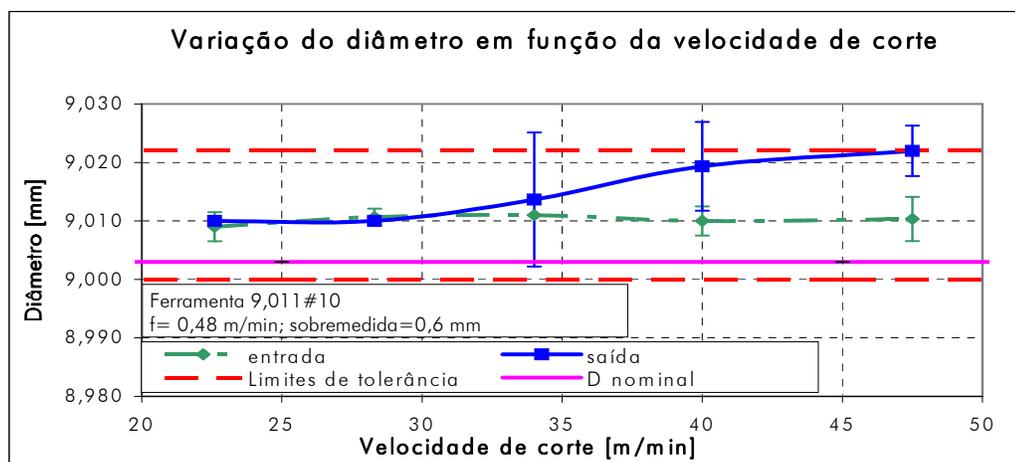


Figura 4.28 – Variação do diâmetro do furo em função da velocidade de corte

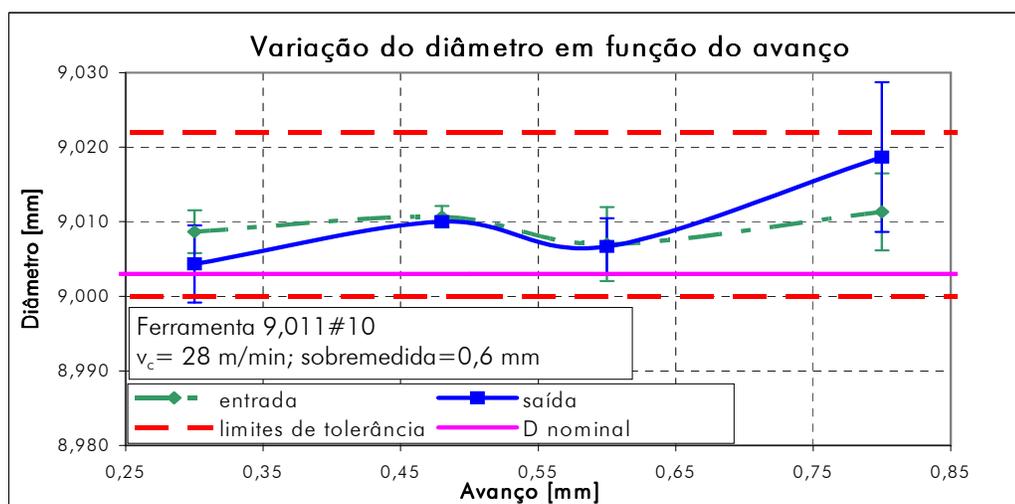


Figura 4.29 – Variação do diâmetro do furo em função do avanço

Observa-se, dos gráficos de rugosidade e diâmetro, que para condições mais severas de usinagem, a tendência é a piora da qualidade do furo. Foi observado também, que devido à pequena tolerância de diâmetro ( $22 \mu\text{m}$ ), há uma relação entre um excessivo aumento do diâmetro com o aumento da rugosidade.

A Figura 4.30 apresenta a variação da rugosidade dos furos usinados em função da velocidade de corte e a Figura 4.31 em função do avanço. Para as ferramentas não-revestidas, o aumento da mesma na saída do furo com o aumento da velocidade e do avanço pode de ser explicado, como anteriormente, pela diminuição da lubrificação.

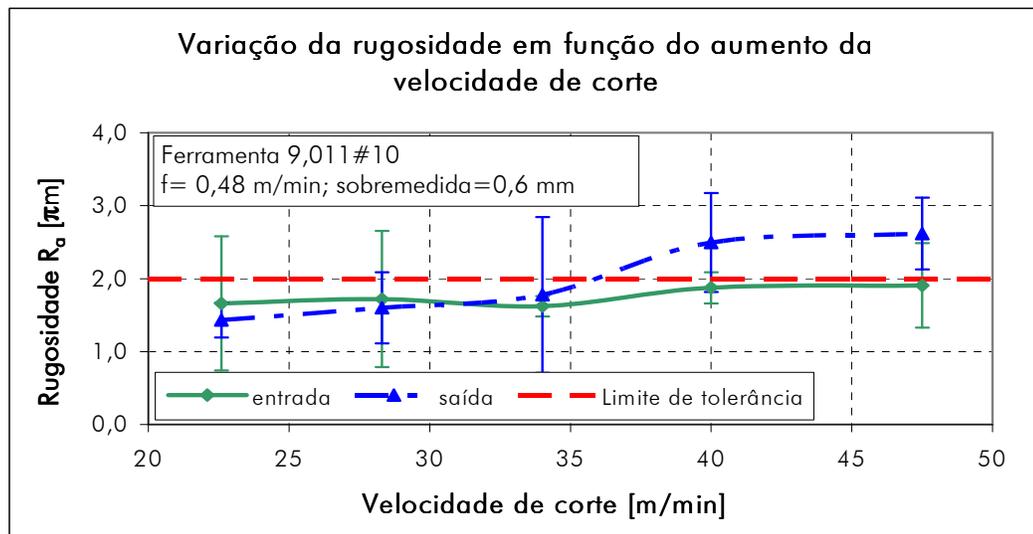


Figura 4.30 – Variação da rugosidade do furo em função da velocidade de corte

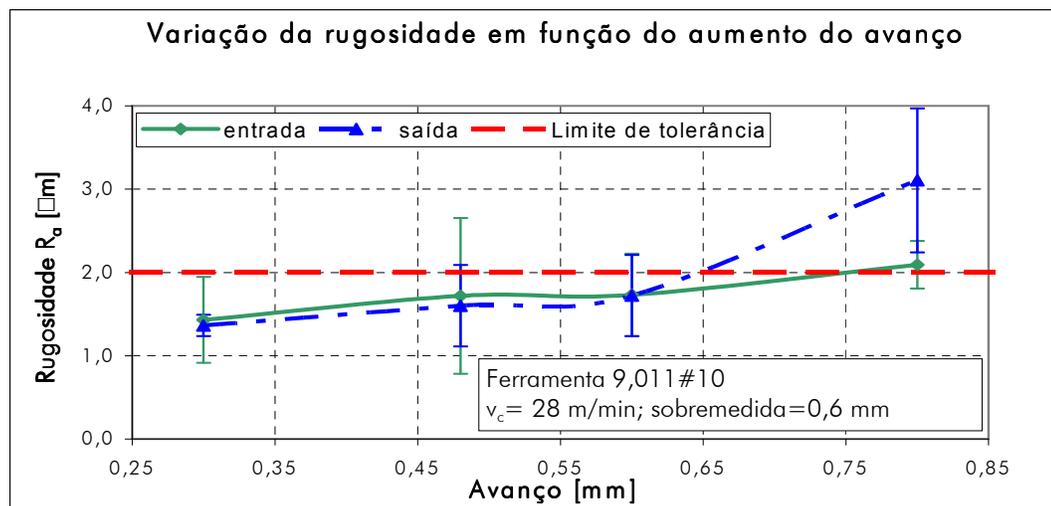


Figura 4.31 – Variação da rugosidade do furo em função do avanço

A Figura 4.32 apresenta a diferença da rugosidade dos furos usinados entre ferramentas sem a aplicação do revestimento e a Figura 4.33 revestidas com TiAlN.

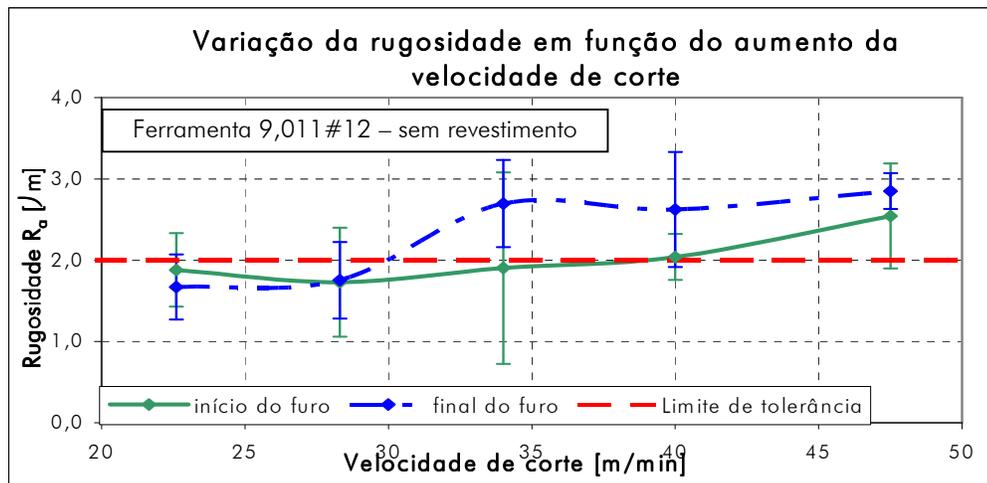


Figura 4.32 – Varição da rugosidade do furo para ferramenta sem revestimento

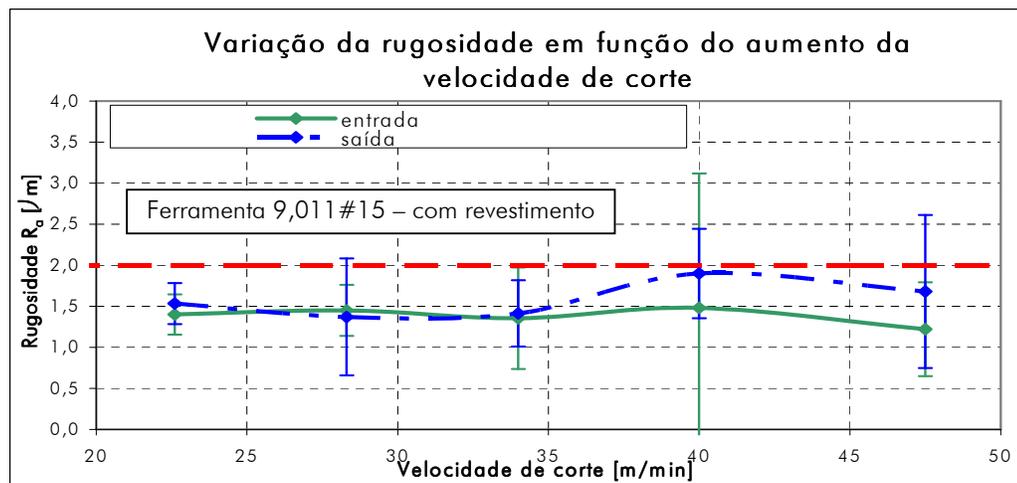


Figura 4.33 – Varição da rugosidade do furo para ferramenta com revestimento

Pelo fato das ferramentas revestidas atenderem às tolerâncias de rugosidade e diâmetro (Figura 4.33 e Figura 4.35), optou-se por testá-las em chão-de-fábrica visando a realização de ensaios de vida.

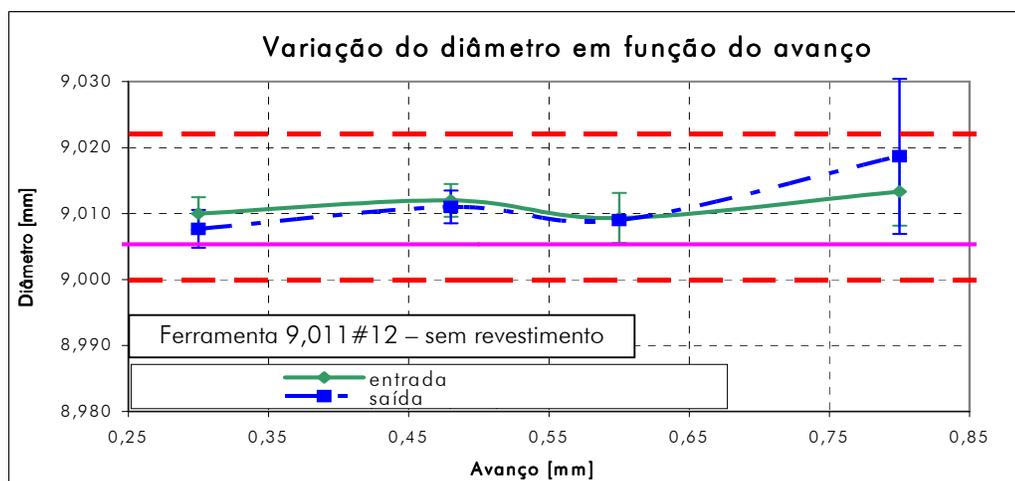


Figura 4.34 – Variação do diâmetro do furo para ferramenta sem revestimento

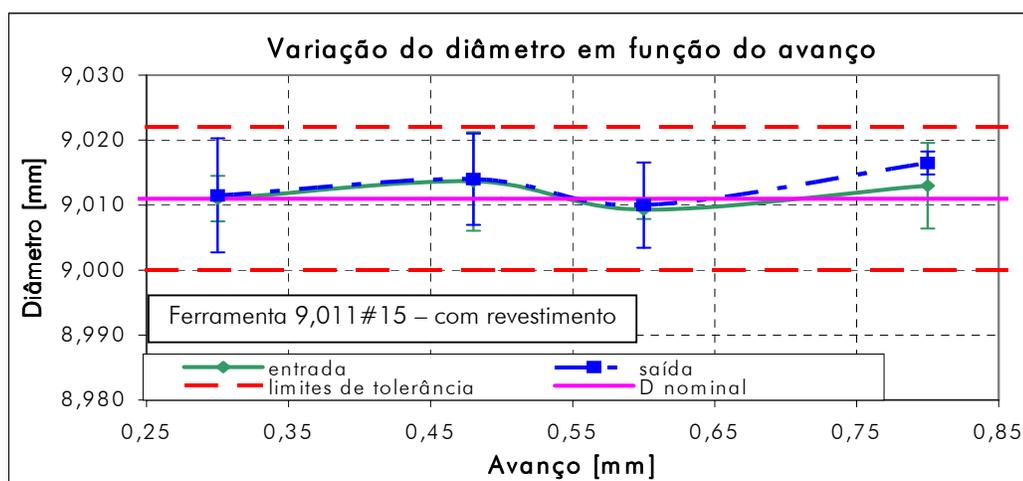


Figura 4.35 – Variação do diâmetro do furo para ferramenta com revestimento

No entanto, apesar dos resultados estarem dentro dos limites estabelecidos, não se obtiveram resultados satisfatórios no chão-de-fábrica. Cada ferramenta produziu cerca de 10 peças na empresa, e todas as verificadas apresentaram erro de cilindricidade, verificado pelo pino “passa”. Este pino “trancava” no interior do furo.

Também foi observado que ocorrem algumas variações bruscas durante o processo, inutilizando as peças. Estas variações ocasionaram as chamadas “marcas de saída” (Figura 4.36). Estas marcas podem ser provocadas entre outros aspectos pelas adesões nos gumes das ferramentas (Figura 4.37), que acarretam um aumento no diâmetro da ferramenta. Estas adesões atritam com a superfície acabada durante o retorno da ferramenta, gerando marcas de rosca.

Admitiu-se também que estas marcas pudessem ser causadas pela rotação da ferramenta, na retirada da mesma, devido aos cavacos acumulados nos furos. Esta hipótese foi refutada em um ensaio de retirada da ferramenta sem rotação, onde ocorreram as mesmas marcas. Outra hipótese também refutada foi a de dilatação térmica, pois em todos os resultados os furos apresentaram diâmetro maior que as ferramentas.

Marcas provocadas pelo retorno da ferramenta

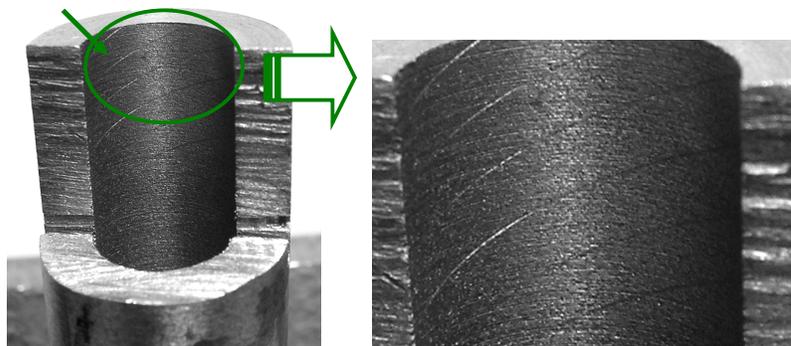


Figura 4.36 – Marcas deixadas pela ferramenta durante o seu retorno

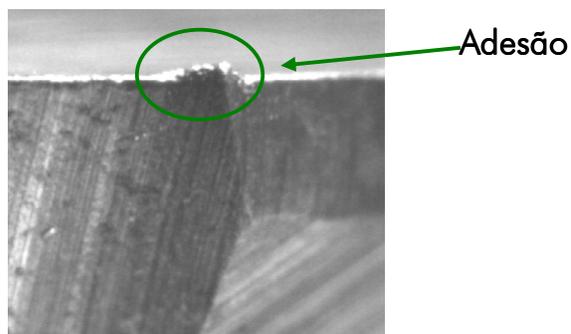
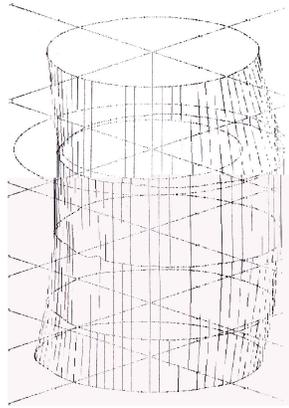


Figura 4.37 – Adesão na ferramenta

Ohgo *et al* [44] já havia presenciado a formação de gume postiço no alargamento de ferro fundido cinzento, relacionando a uma piora da qualidade da superfície gerada.

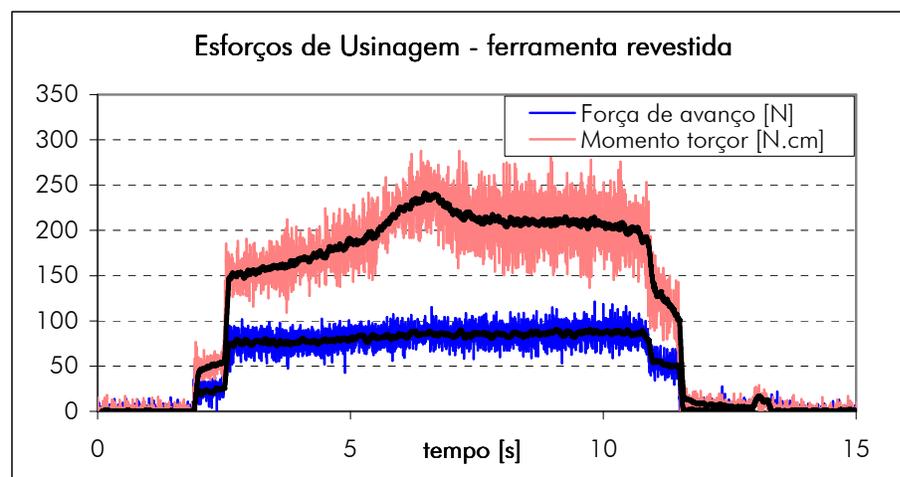
O erro observado com maior intensidade nas ferramentas revestidas foi o erro geométrico de cilindridade (Figura 4.38). Esta maior ocorrência nas ferramentas revestidas é decorrente provavelmente dos maiores esforços de usinagem. Este erro chegou a até 0,3 mm na peça apresentada a seguir, valor este da sobremedida no raio.



**Figura 4.38 – Erro de forma encontrado em uma peça usinada por um alargador com revestimento**

Esta relação entre esforços excessivos e valores elevados de cilindridade também foram percebidos nas ferramentas dos ensaios de vida, embora não tão acentuadamente.

Um aspecto observado durante a realização dos ensaios, foi a instabilidade dos esforços de usinagem das ferramentas com revestimento. Além dos altos valores encontrados para as médias, também foram observadas grandes variações durante o ciclo, como pode ser visto na Figura 4.39. Não há uma estabilização do momento torçor, como encontrado nas ferramentas produzidas pela própria empresa.



**Figura 4.39 – Esforços de usinagem para ferramentas revestidas**

Pode-se supor que este comportamento instável do processo se reflita na formação de erros geométricos do furo, como por exemplo, o erro de cilindridade indicado na Figura 4.38.

Assim sendo, estes resultados de aspectos de superfície e erros de forma levaram à finalização dos ensaios de vida, pois as peças produzidas não apresentaram qualidade satisfatória.

#### b) Ferramenta de gumes retos

Após a avaliação das ferramentas helicoidais, foram realizados dois testes com uma ferramenta de gumes retos, fornecida pela empresa A. Foi observado nas ferramentas helicoidais que os valores de rugosidade estavam muito próximos, e às vezes, acima da tolerância de  $2 \mu\text{m}$  no parâmetro  $R_a$ . O objetivo do teste com a ferramenta de canais retos era observar se a rugosidade obtida era adequada ou não.

Esta ferramenta foi submetida a duas condições de corte. A primeira condição é a padrão utilizada no chão-de-fábrica, com a ferramenta trabalhando a 1.000 rpm (neste caso 31 m/min), e o avanço igual ao das ferramentas de diâmetro 9,011 mm, com valor de 0,48 mm. A segunda condição foi o aumento da velocidade de corte para 52,7 m/min, mantendo-se o avanço por rotação. Esta velocidade foi escolhida para avaliar se maior solicitação da ferramenta sobre as peças provocaria o surgimento de adesões nos gumes, como os encontrados com maior facilidade nas ferramentas helicoidais.

Como pode ser observado na Figura 4.40, em nenhum dos casos, foram obtidos valores de rugosidade abaixo da tolerância, isto é,  $R_a < 2 \mu\text{m}$ . Por isso, não foram realizados demais testes com esta ferramenta.

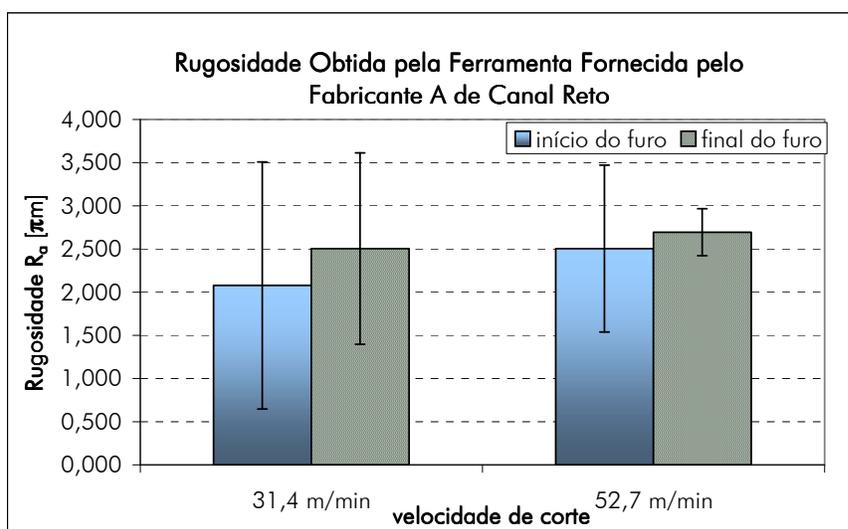


Figura 4.40 – Rugosidade obtida pela ferramenta do fabricante A de gumes retos

Entretanto, não foi observada a ocorrência de riscos na superfície do furo, decorrentes da saída da ferramenta da peça. Observando-se as fotos de topo dos

alargadores de gumes retos em comparação aos helicoidais, pode-se concluir que os esforços de usinagem nas ferramentas helicoidais são maiores devido ao ângulo de saída negativo. Isso pode provocar maiores deformações no cavaco, facilitando assim a adesão de material no gume, que seria responsável pelas marcas na superfície.

#### 4.3.3 Ferramentas do Fabricante B

Dando continuidade aos ensaios com diferentes geometrias de alargadores, foram testadas ferramentas do fornecedor B. Estas ferramentas foram selecionadas no catálogo do fornecedor por serem semelhantes às utilizadas em chão-de-fábrica. Entretanto, apresentam algumas diferenças, por exemplo, não possuem o rebaixo do diâmetro na ponta da ferramenta (guia).

Após a avaliação inicial das ferramentas (registros fotográficos, análise dimensional), foram testadas com a mesma condição dos ensaios de vida ( $v_c=28$  m/min,  $f=0,48$  mm e sobremedida 0,6 mm). Condição esta que foi definida como padrão no pré-teste realizado no chão-de-fábrica.

Foram utilizadas duas ferramentas iguais, sendo que cada uma usinou 3 peças, sendo avaliadas a força de usinagem e a rugosidade do furo. Os alargadores testados até o momento apresentaram uma certa dificuldade em produzir peças com rugosidade abaixo do limite de tolerância. Com estas ferramentas, foram obtidos resultados semelhantes, conforme indicado na Figura 4.41. Apesar dos valores estarem acima do limite de tolerância, nas duas ferramentas os resultados foram praticamente idênticos, demonstrando boa repetitividade.

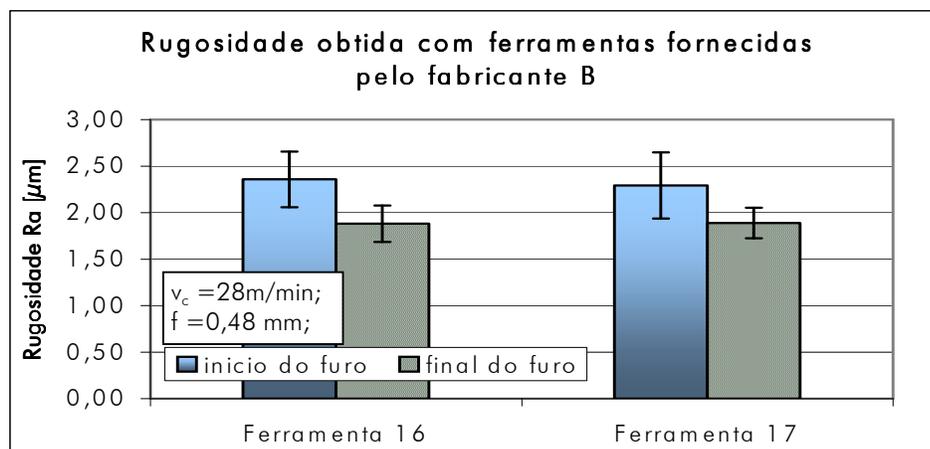
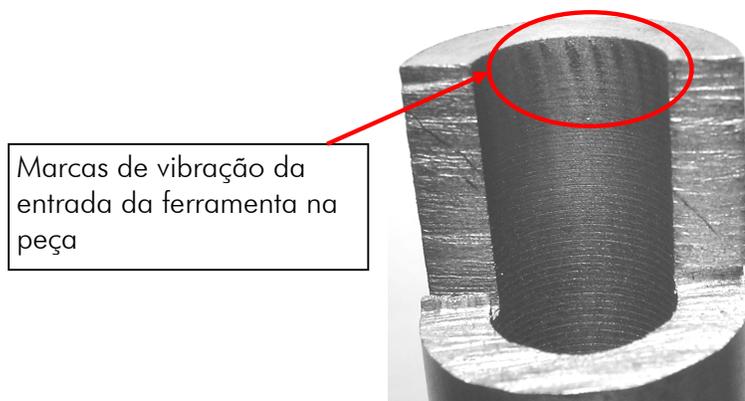


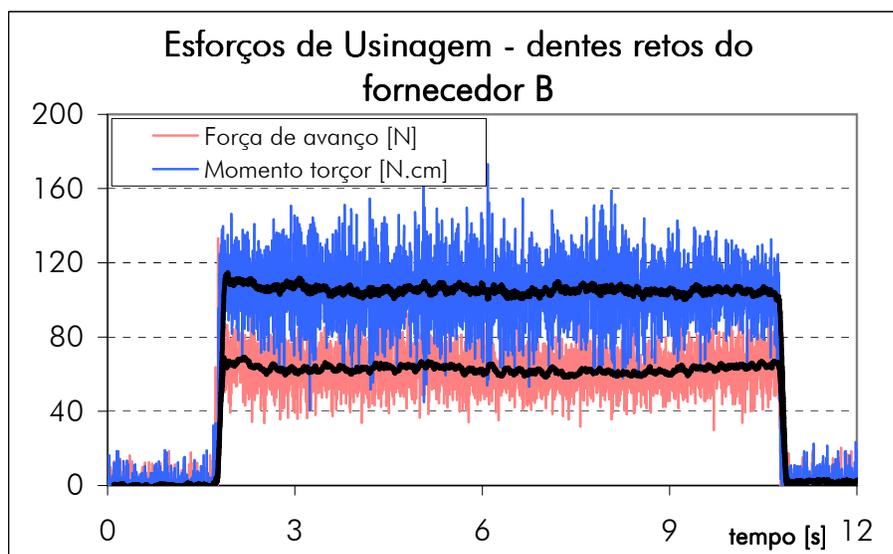
Figura 4.41 – Rugosidade obtida pelas ferramentas do fabricante B

O uso de cabeçote flutuante faz com que a entrada da ferramenta na peça seja um tanto quanto irregular quando a ferramenta não possui um rebaixo guia na ponta. Isso foi observado nas peças, como pode ser visto na Figura 4.42.



**Figura 4.42 – Vibrações na entrada do furo com ferramentas sem rebaixo guia**

Outra característica importante encontrada nos ensaios com estas ferramentas foi a estabilidade dos esforços de usinagem. Ao contrário do observado nas ferramentas helicoidais (Figura 4.39), a evolução do momento torçor ao longo da usinagem é praticamente constante, como pode ser visto na Figura 4.43.



**Figura 4.43 – Esforços de usinagem gerados pela ferramenta do fabricante B**

Considerando que a rugosidade obtida com o uso destas ferramentas não atendeu às exigências, estes alargadores também não foram submetidos aos ensaios de vida.

### 4.3.4 Análise dos Perfis das Superfícies Alargadas

Sabe-se que interpretações dos parâmetros de rugosidade são difíceis, e que devem ser escolhidos parâmetros adequados a cada caso. No processo em estudo, devido às exigências do cliente, devem-se manter níveis de tolerâncias medindo-se a média aritmética dos picos de rugosidade,  $R_a$ . Entretanto, apenas o valor numérico de  $R_a$  não permite uma definição muito precisa da textura da superfície obtida.

Para um melhor estudo das superfícies, foram comparados os perfis obtidos pelas diferentes ferramentas, onde uma importante diferença pôde ser percebida.

Inicialmente foi gerado o perfil de uma peça produzida por uma ferramenta da empresa, conforme Figura 4.44, cujas peças apresentavam rugosidade satisfatória. Este perfil foi comparado com os gerados pelas ferramentas produzidas pelas demais ferramentas, nas Figuras 4.52, 4.53, 4.54 e 4.55 na seqüência.

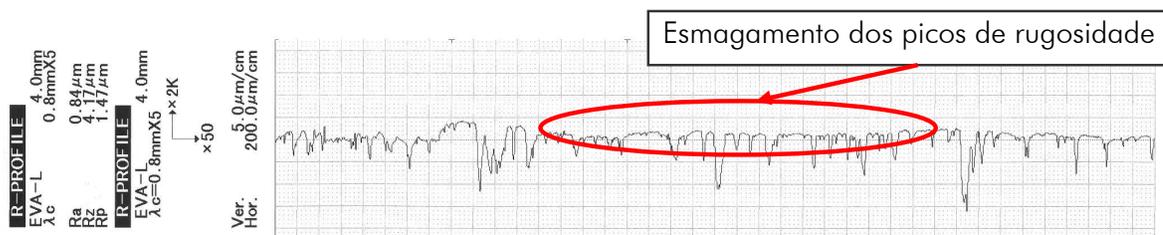


Figura 4.44 – Perfil de rugosidade de uma peça gerado por uma ferramenta de fabricação própria

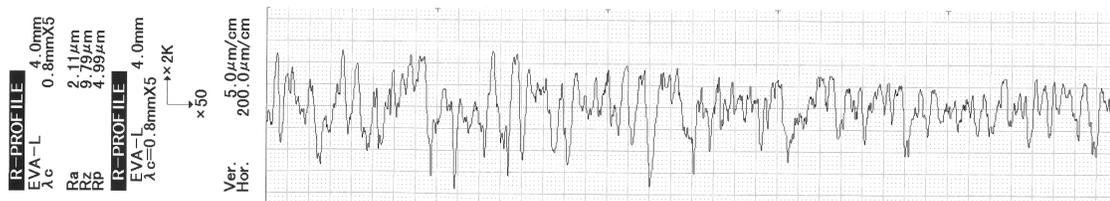


Figura 4.45 – Perfil de rugosidade gerado por uma ferramenta helicoidal do fabricante A sem revestimento

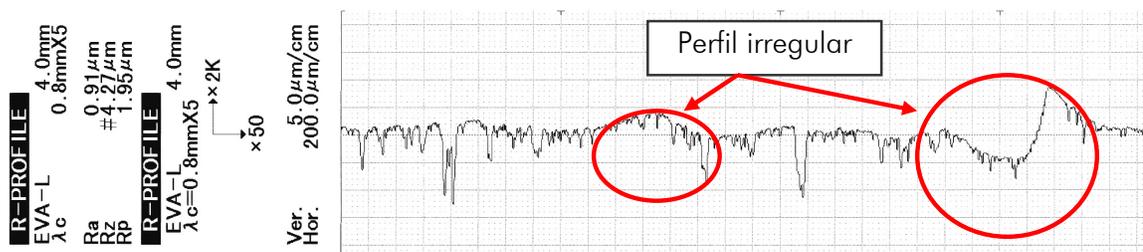


Figura 4.46 – Perfil de rugosidade gerado por uma ferramenta helicoidal do fabricante A com revestimento

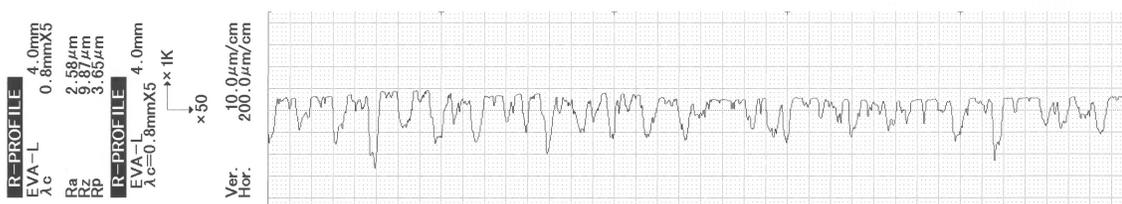


Figura 4.47 – Perfil de rugosidade gerado por uma ferramenta de gumes retos do fabricante A

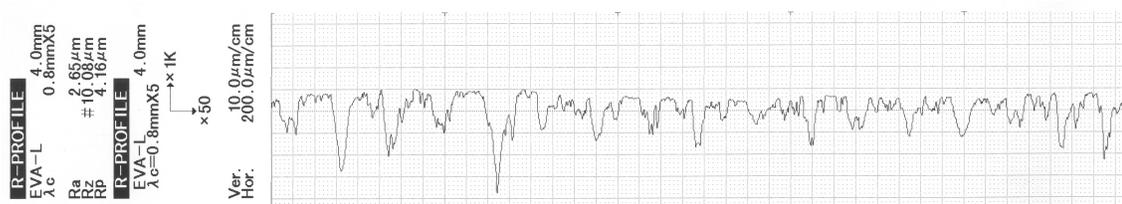


Figura 4.48 – Perfil de rugosidade gerado por uma ferramenta do fabricante B

Pode ser observado que no perfil gerado pela ferramenta atualmente empregada em chão-de-fábrica, com baixo valor de  $R_a$ , os picos estão mais achatados em relação aos outros perfis. A peça que mais se aproxima deste perfil é usinada pela ferramenta do fabricante A com revestimento, onde foram obtidos valores de  $R_a$  não muito elevados. Entretanto, nesta ferramenta, podem ser observadas irregularidades na superfície, provavelmente decorrentes dos esforços de usinagem excessivos, como apresentado no item 4.3.2.

Com base nessas figuras e nas observações feitas sobre as ferramentas de fabricação própria, pode-se supor que os alargadores que conseguem o amassamento dos picos de rugosidade atingem menores valores para o parâmetro  $R_a$ . Isto foi obtido nas ferramentas de fabricação própria, pelas guias mais largas, e nas ferramentas com

revestimento pelo maior grau de arredondamento do gume. Entretanto, o maior raio de arredondamento do gume provoca um aumento das componentes da força de corte, favorecendo a formação de erros de forma.

Em relação às ferramentas helicoidais sem revestimento (Figura 4.45), observa-se que o perfil é completamente irregular, provavelmente devido à deformação excessiva do material (ângulo de saída negativo), ou devido à tendência que a espiral tem de empurrar os cavacos para a região já usinada. Pode-se observar também que as ferramentas que possuem canais retos, Figura 4.47 e Figura 4.48, apresentam o perfil muito semelhante, com parte dos picos de rugosidade cortados. Entretanto, não é suficiente para reduzir sensivelmente o valor de  $R_a$ .

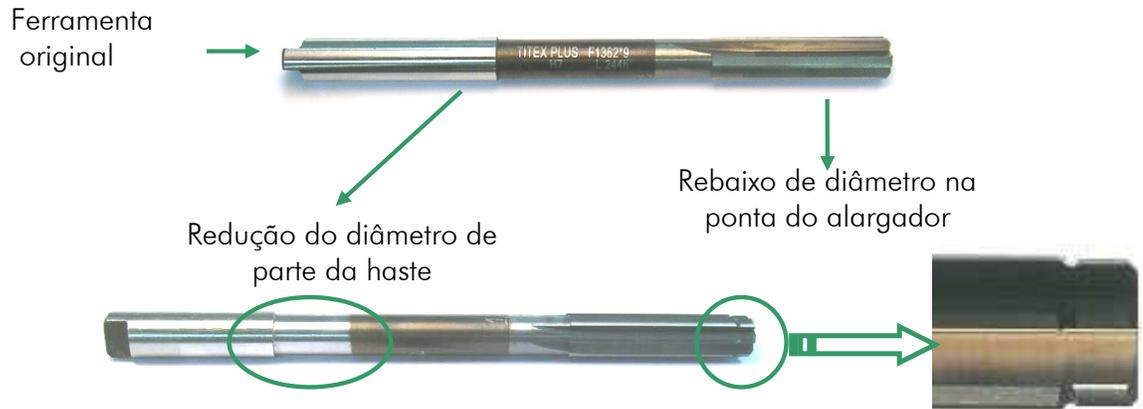
Com isso, sugeriu-se que fossem testadas ferramentas com maiores larguras de guia. As alterações realizadas e os resultados obtidos serão apresentados no próximo item.

#### **4.4 Ensaios com Ferramentas de Geometrias Modificadas**

Após a análise de todos os ensaios, observou-se que as ferramentas empregadas originalmente em chão-de-fábrica, apesar das deficiências na padronização da afiação, apresentaram os melhores resultados em relação à rugosidade. Entretanto, os valores de diâmetro dos furos não foram significativamente diferentes, e todas as ferramentas atenderam a este requisito.

Observando mais atentamente o perfil de rugosidade gerado por diferentes ferramentas, algumas alterações de geometria dos alargadores foram sugeridas e testadas. As alterações foram realizadas nas ferramentas fornecidas pelo fabricante B.

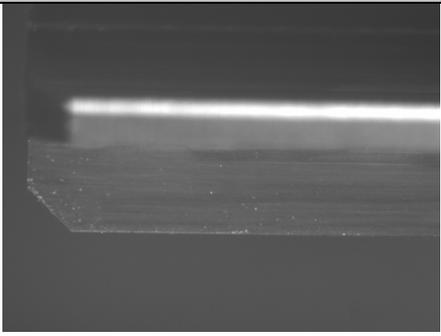
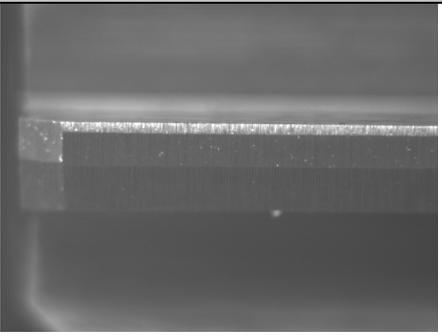
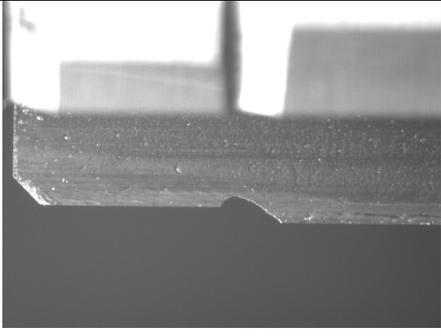
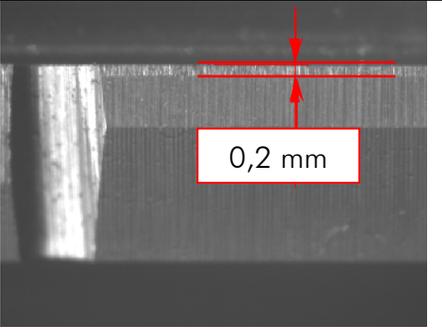
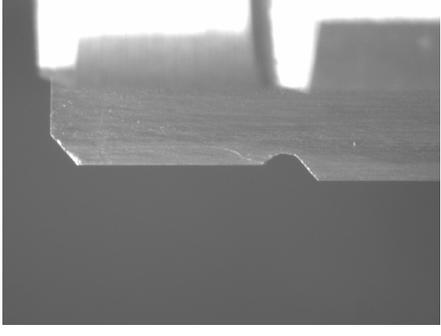
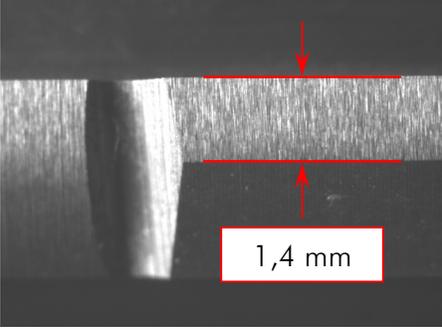
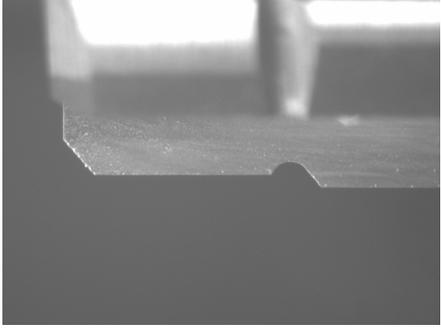
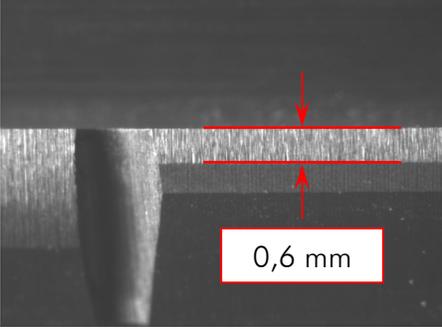
Foi realizado um rebaixo de diâmetro na ponta da ferramenta, para servir como guia no início do furo. A largura das guias foi aumentada pela diminuição do diâmetro das ferramentas, por um processo de retificação cilíndrica. Além disso, parte da haste da ferramenta teve seu diâmetro reduzido, possibilitando as ferramentas usinar furos mais profundos. Esta última alteração foi necessária para compensar o comprimento do rebaixo de diâmetro na ponta da ferramenta. Foram preparadas 3 ferramentas: uma somente com o rebaixo de diâmetro, e as outras duas com diferentes larguras de guias. As alterações podem ser vistas na Figura 4.49.



**Figura 4.49 – Alterações de geometria dos alargadores**

Na Tabela 4.6 há uma comparação das diferentes características das três ferramentas analisadas. O ângulo de incidência foi mantido em 20 graus para as 3 ferramentas.

Tabela 4.6 – Quadro comparativo entre as ferramentas modificadas

Ferramenta	Foto da Face	Foto da Guia
Ferramenta original		
<b>Número: 9#16;</b> Diâmetro: (9,000 ±0,003) mm; - apenas com rebaixo.		
<b>Número: 9#17;</b> Diâmetro: (8,710 ±0,003) mm; - com rebaixo e aumento da largura de guia (1,4 mm).		
<b>Número: 9#18;</b> Diâmetro: (8,930 ±0,003) mm; com rebaixo e aumento da largura de guia (0,6 mm).		

A primeira análise foi a comparação entre os resultados da ferramenta original com os obtidos pela ferramenta 16, que possuía somente o rebaixo de diâmetro na ponta (função de guia no início do furo). Vibrações na entrada da ferramenta (conforme Figura 4.42, da ferramenta sem guia) não foram observadas, entretanto também não houve melhora significativa da rugosidade. A comparação dos valores pode ser vista na Figura

4.50, onde os níveis de rugosidade ainda permanecem muito próximos ao limite de tolerância do processo. Por este motivo, não foram realizados demais ensaios com esta ferramenta.

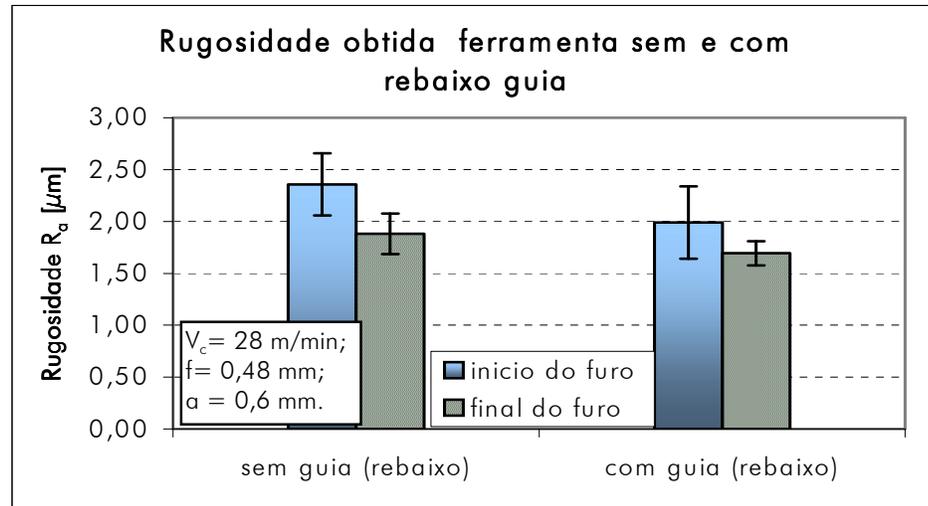


Figura 4.50 – Rugosidade obtida por ferramentas sem e com rebaixo guia

A realização do rebaixo na ponta da ferramenta faz com que as guias desta região se tornem mais largas e aumentem o atrito com a superfície do furo. Com isso, nos gráfico de forças de usinagem, observou-se um aumento das componentes, principalmente o momento torçor, conforme Figura 4.51.

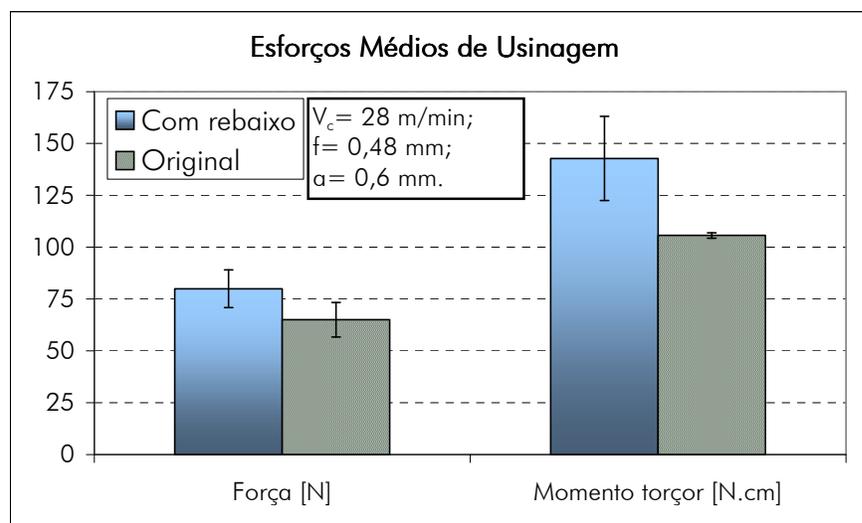


Figura 4.51 – Variação de esforços de usinagem com e sem rebaixo

Este aumento do momento torçor provavelmente irá provocar um aumento da temperatura na região de corte, o que poderá acarretar uma redução da vida da ferramenta.

Em relação às outras duas ferramentas com guias mais largas, uma redução significativa de rugosidade foi obtida. Estas ferramentas foram submetidas a três condições de usinagem, conforme mostrado nos gráficos da Figura 4.52 e da Figura 4.53 a seguir. A primeira combinação de parâmetros é a mesma utilizada para os ensaios de vida. A segunda e terceira combinações são com aumento da velocidade de corte e aumento do avanço respectivamente.

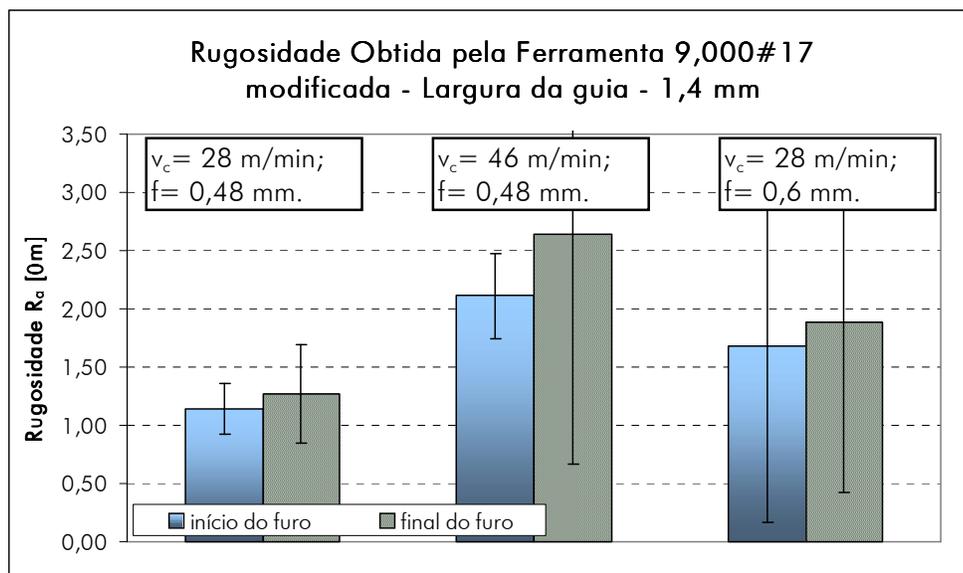
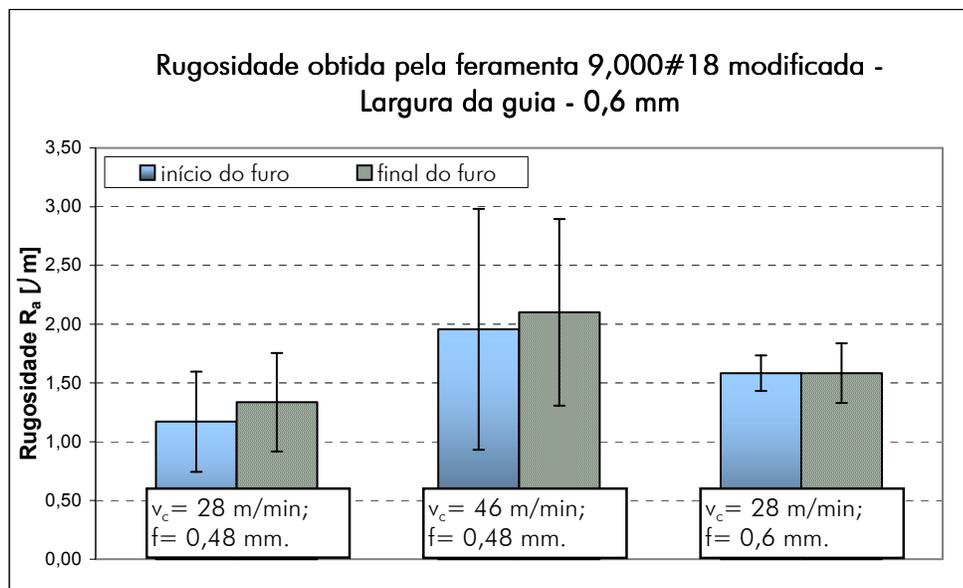


Figura 4.52 – Rugosidade obtida com ferramenta com guias de 1,4 mm de largura



**Figura 4.53 – Rugosidade obtida com ferramenta com guias de 0,6 mm de largura**

Observou-se que, tanto na ferramenta com largura de guia 1,4 mm quanto na de 0,6 mm, os valores de rugosidade para a primeira condição foram semelhantes. Estes valores situam-se próximos da metade dos obtidos pela ferramenta original, isto é, uma redução de até 45%, atendendo assim os requisitos de qualidade exigidos. Pode-se observar também que a ferramenta com largura das guias 0,6 mm apresentou menores valores de rugosidade para as demais condições, e também menor variação entre elas. Isto ocorre provavelmente porque guias mais largas podem atritar excessivamente com a superfície usinada, além do necessário para reduzir a rugosidade. Pode-se supor que o maior atrito prejudica a lubrificação peça/ferramenta. Este efeito de elevação de atrito foi observado no resultado de medição de avanço e momento torçor da ferramenta original comparados com os resultados da ferramenta com rebaixo de diâmetro na ponta (Figura 4.51). Percebe-se então uma relação de compromisso, onde um aumento da largura das guias melhora o amassamento dos picos de rugosidade até o momento em que o excesso de atrito compromete a sua qualidade.

Em relação à variação de diâmetros, ambas as ferramentas atenderam satisfatoriamente os requisitos de tolerâncias, não sendo este fator crítico ao processo. Os resultados podem ser observados na Figura 4.54 e na Figura 4.55.

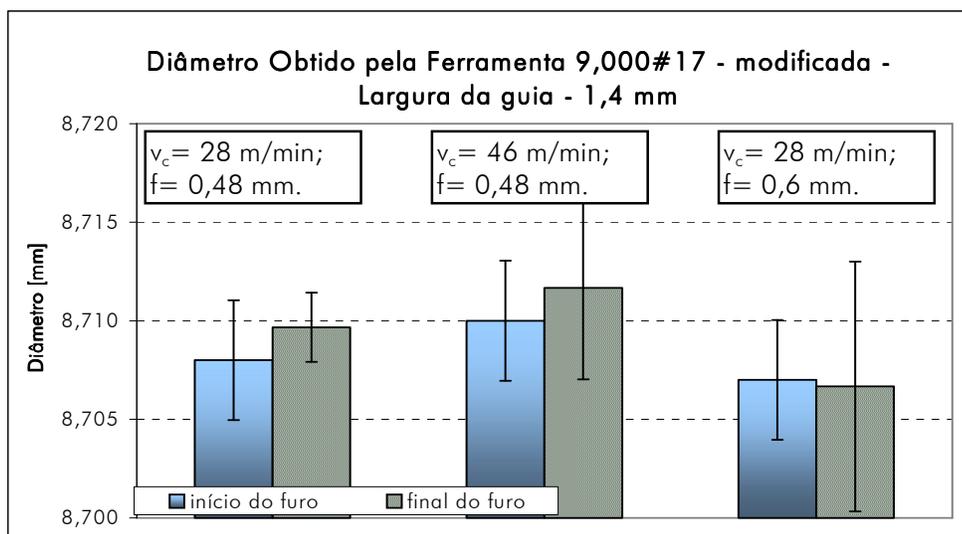


Figura 4.54 – Diâmetro obtido com ferramenta com guias de 1,4 mm de largura

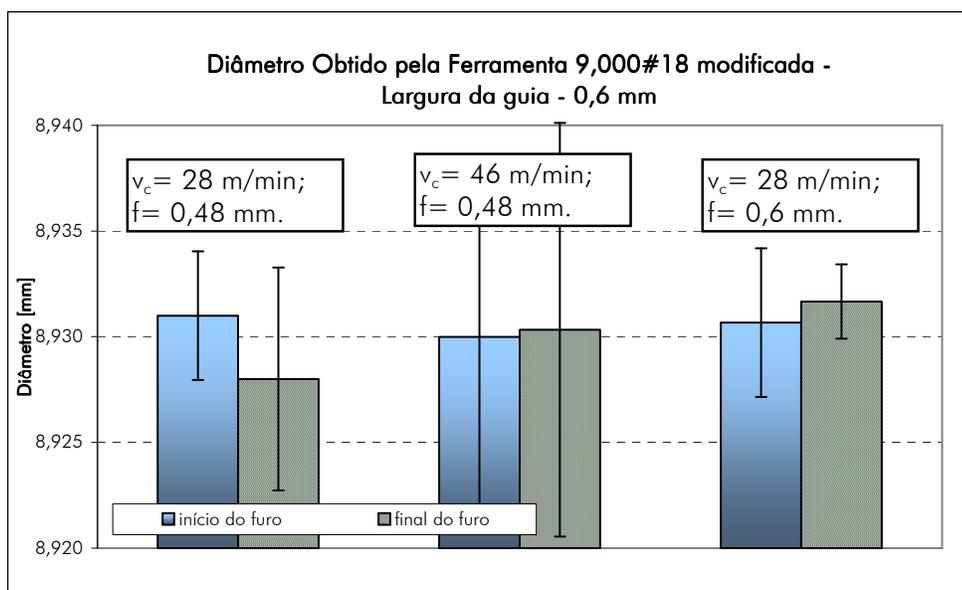


Figura 4.55 – Diâmetro obtido com ferramenta com guias de 0,6 mm de largura

Com base nestas observações, sugere-se que as ferramentas de fabricação própria sejam produzidas com ângulos de incidência de 20 graus e largura das guias de 0,6 mm.

Weinert [15] realizou modificações semelhantes em ferramentas de aço-rápido na usinagem do aço St 52-3 (ABNT 1030-1035). Realizou o aumento da largura das guias dos alargadores e aumento do ângulo de direção do gume  $\kappa_r$ . Com isso, obteve melhora da circularidade e cilindricidade dos furos, além de permitir o uso de velocidades de corte mais altas.

## 5 CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA NOVOS TRABALHOS

Durante a elaboração deste trabalho, várias constatações puderam ser feitas. A primeira observação foi a falta de padronização das ferramentas produzidas pela empresa. Além disso, foram observadas trincas e lascamentos, provenientes provavelmente do manuseio incorreto das ferramentas. Tais diferenças influenciaram diretamente no resultado da usinagem, como foi constatado. Ferramentas teoricamente iguais apresentaram resultados muito díspares em relação ao diâmetro das peças, geometria do furo e principalmente em relação à rugosidade.

Ferramentas fornecidas por fabricantes especializados foram testadas com as mesmas condições utilizadas na avaliação das ferramentas de produção própria. Nestes casos, a repetitividade de resultados atingida foi muito boa. Entretanto, tais ferramentas não apresentaram geometria adequada em relação à rugosidade que deve ser atingida.

No conjunto de ferramentas de outros fornecedores, foram comparadas ferramentas com e sem revestimento. Ferramentas revestidas apresentaram valores de rugosidade pouco abaixo dos obtidos pelos alargadores sem revestimento. Em relação aos valores de diâmetro produzidos, não foi constatada diferença significativa. Entretanto, os esforços de usinagem foram significativamente mais elevados, além de irregulares durante o comprimento do furo. Este fato deve-se provavelmente devido ao arredondamento do gume das ferramentas, isto é, aumento do raio do gume. Isso provocou maior deformação do material pela ferramenta, aumentando os esforços.

Ainda em relação às ferramentas revestidas, foi observada forte relação entre o aumento dos esforços e furos com erros de cilindricidade.

Os testes com ferramentas helicoidais e com ângulo de saída negativo mostraram-se muito severos ao processo. Esta configuração favoreceu a adesão de material nos gumes das ferramentas, principalmente em condições mais elevadas de usinagem. A adesão de material no gume pode ser responsável por riscar peças durante o retorno da ferramenta.

Foi constatado que não existe uma relação direta de aumento de avanço ou velocidade de corte com o aumento da rugosidade da peça. Entretanto, para parâmetros de usinagem mais elevados, tanto avanço ( $f$ ) como velocidade de corte ( $v_c$ ), a rugosidade

da superfície tende a aumentar de forma repentina. Pode-se supor que para tais condições é ultrapassado o limite de capacidade de lubrificação da peça pelo fluido lubri-refrigerante. Até este limite, a alteração dos parâmetros de corte não exerce influência significativa.

Também foram testadas dois tipos de ferramentas de gumes retos. Os resultados em relação à rugosidade não foram adequados, entretanto não foram observados riscos nas peças.

As análises e comparações entre ferramentas que produziam furos com valores de rugosidade adequados com aquelas que produziam com valores excessivamente altos forneceram subsídios para que fossem sugeridas alterações de geometria nas ferramentas comerciais.

A principal característica avaliada foi a largura da guia. Ferramentas produzidas pela empresa, que atendiam às exigências de rugosidade, apresentavam maiores valores de largura em relação às ferramentas comerciais.

Com base nisso, três ferramentas comerciais foram reafiadas com diferentes valores de largura de guias. Observou-se uma melhora significativa em relação aos valores de rugosidade. Entretanto, pode-se supor que o aumento do atrito provocado por valores excessivos de largura da guia prejudicam a capacidade de lubrificação do fluido, podendo prejudicar a qualidade da peça.

Foi constatado que, em testes comparativos entre ferramentas, é dada relativamente pouca importância aos parâmetros de corte e às características do lote do material. As comparações são feitas apenas relacionando-se o número de furos produzidos. Como foi apresentado neste trabalho, estas comparações tão diretas devem ser evitadas porque a dispersão de resultados é muito grande, caso outras variáveis não sejam controladas.

Além disso, estas comparações não levam em consideração os parâmetros de corte utilizados. De imediato, pode-se sugerir alterações nas máquinas-ferramentas no sentido de controlar a velocidade de corte e avanço.

Ainda em relação às ferramentas, observou-se que os técnicos responsáveis pela afiação de ferramentas possuem conhecimento, empírico na maioria, suficiente para solucionar problemas com ferramentas deficientes. Muitas vezes, são limitados pelas restrições impostas pelas máquinas afiadoras. Com isso, não conseguem garantir repetitividade na padronização de ferramentas.

Em decorrência destas limitações, sugere-se também que os alargadores de fabricação própria passem por uma inspeção antes de serem liberados para a produção. As principais características que deveriam ser avaliadas são a largura das guias e o ângulo de incidência das ferramentas, conforme mostrado neste trabalho.

Entretanto, a ferramentaria da empresa apresenta também limitações de equipamentos necessários para esta avaliação. Sugere-se o uso de um microscópio de ferramentaria para esta finalidade. Existem modelos comerciais exclusivos para avaliação de ferramentas como brocas e alargadores. Tais microscópios são utilizados para a inspeção de ferramentas em fabricantes de tais ferramentas.

Entende-se que, com as implementações sugeridas, a empresa teria condições de fornecer ferramentas padronizadas. Aliando-se a isso, o controle dos parâmetros do processo, o comportamento dos alargadores em termos de produtividade deveria ser melhor estudado. Com isso, informações mais seguras poderiam ser obtidas para a caracterização dos diferentes tipos de liga de ferro fundido e, assim, otimizar as ferramentas para cada liga, ou grupo de ligas.

Porém, sem a estabilização do processo, não há como assegurar que alterações nas ferramentas irão solucionar os problemas de produtividade. Caso seja feita a opção pelo compra de ferramentas de empresas especializadas, devem ser repassadas todas as informações necessárias, aproveitando o conhecimento dos funcionários da ferramentaria. A repetitividade entre as ferramentas que não foram produzidas pela própria empresa é fator fundamental a ser atingido pelas ferramentas da empresa.

## 5.1 Sugestões para Trabalhos Futuros

O presente trabalho teve grande importância por destacar alguns pontos do processo que podem ser melhorados. Entretanto, ainda há aspectos a serem explorados mais profundamente, e que trarão ainda mais benefícios para o conhecimento do processo.

Foi mostrado neste trabalho que a presença de guias mais largas aumenta o atrito com as paredes do furo, aumentando também os esforços de usinagem. Este fenômeno deve ser avaliado em função das vidas dos alargadores. Provavelmente o aumento de temperatura provocado pelo atrito levará a uma redução da vida da ferramenta. Deve-se estipular um valor adequado para a largura das guias, que não comprometa

significativamente a vida da ferramenta, mas que atenda as exigências de qualidade da peça, principalmente de rugosidade.

O comportamento do atrito entre tais guias e o furo é fortemente influenciado pelo fluido lubri-refrigerante utilizado, como também foi demonstrado neste trabalho. Outro ponto a ser melhor estudado é a influência de demais tipos de meios lubri-refrigerantes sobre este comportamento. Deve existir uma relação entre a largura das guias e as propriedades deste fluido, cujas potencialidades devem ser exploradas. Normas de controle ambiental têm tido cada vez mais força sobre as empresas, atuando diretamente em seus processos. Exemplo disso é a tendência de utilização de quantidades mínimas de fluido de corte. Além da redução de custos, pode haver um benefício para o meio-ambiente a viabilidade de aplicação desta tecnologia no processo em questão.

Outro aspecto importante, não abordado neste trabalho, é a existência de cinco diferentes ligas de ferro fundido sendo usinadas na linha de produção. No chão-de-fábrica não se verifica a separação entre lotes de diferentes ligas quando as peças entram na linha de produção. É de se esperar que as adaptações sugeridas para as ferramentas em questão não sejam diretamente aplicáveis às demais ligas. Para um processo produtivo otimizado, torna-se necessário que novas geometrias sejam testadas, e relacionadas a cada tipo de liga de ferro fundido.

Entretanto, tal procedimento poderia aumentar demasiadamente a complexidade do planejamento da produção, caso fossem necessários vários diferentes tipos de ferramentas para um mesmo diâmetro. Conseqüentemente, os custos com estoque e preparação de ferramentas se elevariam. Outrossim, o uso de dois ou três geometrias de ferramentas poderia ser implementado, e controlado pelos operadores em conjunto com os colaboradores da ferramentaria. Poderiam ser desenvolvidas, por exemplo, geometrias para ligas mais “moles” e outra para ligas mais “duras”. Nesse caso, há uma relação de custos a ser avaliada.

A adequação da geometria das ferramentas aos novos materiais por si só já é de grande importância para usuários de processos de usinagem. Conhecendo-se ainda as propriedades do fluido lubri-refrigerante e suas relações com a geometria da ferramenta e as características do material, é possível aumentar significativamente o controle sobre o processo. A otimização do processo, seja em relação à máxima produtividade ou mínimo custo, torna-se então uma questão de adaptação de parâmetros já conhecidos.

## 6 REFERÊNCIAS

- [1] KÖNIG, W. **Fertigungsverfahren: Drehen, Fräsen, Bohren**. Dusseldorf: VDI-Verlag, 1997. 471 p.
- [2] SCHROETER, R.B.; WEINGAERTNER, W.L. **Processos de usinagem e ferramentas de corte – nível 1, parte 2**. Laboratório de mecânica de precisão-UFSC. 2001. 213 p.
- [3] SOCIETY OF MANUFACTURING ENGINEERS. **Tool and manufacturing engineers handbook – Machining**. 4. Ed. Dearborn, 1983.
- [4] FERRARESI, D. **Fundamentos da usinagem dos metais**. São Paulo: Edgard Blücher, 1977. 751p.
- [5] ASTM. **Tool Engineers Handbook**. 2. Ed. McGraw-Hill, 1959.
- [6] STEMMER, C. E. **Ferramentas de corte II: Brocas, alargadores, ferramentas de roscar, fresas, brochas, rebolos e abrasivos**. 2. Ed. Florianópolis: ed. UFSC, 1995.
- [7] KRESS, D. Herstellung von Präzisionsbohrungen in der flexiblen Fertigung. **Werkstatt und Betrieb**, número 119, p. 589-592, 1986.
- [8] SCHROETER, R. B. **Alargamento de precisão em alumínio aeronáutico com ferramentas de gume único reguláveis**. 1989. 113 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 1989.
- [9] ECKHARDT, M. **Utilização de alargadores de gume único regulável para obtenção de furos de precisão**. 1993. 128 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 1993.
- [10] FERRARESI, D. **Usinagem dos metais: Furação, alargamento, fresamento e processos não convencionais**. São Paulo, 1973.

- [11] SKF FERRAMENTAS S.A. **Manual técnico**, São Paulo, 1987.
- [12] GUHRING. **Herramientas de corte de precisión**. Catálogo do fabricante, edição 2002.
- [13] MILLER, P. C. **Better tools upgrade boring and reaming**. Tooling & production, outubro 1986. p. 30-32.
- [14] SCHROER, M. **Reiben von Vergütungsstahl mit Einschneiden-Reibahlen**. 2000. Dissertation - Universität Dortmund, Essen: Vulkan-Verlag 2000.
- [15] WEINERT, K.; HAGEDORN, M. Modifizierte Schneidengeometrien für Mehrschneidenreibahlen. **Werkstattstechnik online**, Jahrgang 92 (2002) H.9. Disponível em: <<http://www.technikwissen.de/library/content/17/2002/09/459.pdf>>. Acesso em: 10 dezembro 2004.
- [16] ISCAR LTD, Reamers – Solid H-Ream. Israel, 2003.
- [17] BORK, C. S. **Otimização de variáveis de processo para a furação do aço inoxidável austenítico DIN 1.4541**. Florianópolis: UFSC, 1995. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica), 127 p.
- [18] CASTRO, P. R. A. **Aspectos tecnológicos da usinagem a seco e com mínima quantidade de fluido de corte na furação com broca helicoidal**. 2001. 180 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2001.
- [19] STEMMER, C. E. **Ferramentas de corte I**. 4. Ed. Florianópolis: ed. UFSC, 1995.
- [20] SANDVIK COROMAT. **Modern metal cutting: a practical handbook**. 1. Ed. Suécia, 1994. 840 p.
- [21] RUDNICK, L. **Synthetic Lubricants and High-Performance Functional Fluids**. Second edition. New York, NY: Marcel Dekker Incorporated, 1999.
- [22] MARTINEZ, F. G. Recomendações e cuidados com fluidos de corte solúveis em água. **O Mundo da Usinagem**. Disponível em: <[http://www.omundodausinagem.com.br/geral/jsps/frame.jsp?pagina=/revistasantvik/edicao1-03/fluidos\\_de\\_corte.pdf](http://www.omundodausinagem.com.br/geral/jsps/frame.jsp?pagina=/revistasantvik/edicao1-03/fluidos_de_corte.pdf)>. Acesso em: 28 setembro 2004.

- [23] MOTTA, M. F.; MACHADO, A. R. Fluidos de corte: tipos, funções, seleção, métodos, de aplicação e manutenção. **Máquinas e Metais**, Uberlândia, p. 44-56, setembro 1995.
- [24] BARADIE, M. A. Cutting Fluids: Part I. Characterisation. **Journal of Materials Processing Technology**, 1996. 56, p. 786-797.
- [25] DIN 6580. **Begriffe der Zerspantechnik, Bewegungen und Geometrie des zerspanvorganges**. Berlin, beith – Vertrieb GmbH, abril, 1963.
- [26] TÖNSHOFF, H. et al. **Machining for holes: developments in drilling technology**. Annals of CIRP, 1994. 43 v, p. 551-561.
- [27] SCHROETER, R. B. *et al.* **Alargamento de precisão em alumínio aeronáutico com ferramentas de gume único regulável**. 1989. 113 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 1989.
- [28] KÖNIG, W.; et al. **Diamond machining technology**. Tutrial 6°. Aachen: IPES/UME 2, IPT, maio 1991.
- [29] STOETERAU, R. L. **Desenvolvimento do protótipo de uma máquina-ferramenta comandada numericamente para usinagem de ultraprecisão com ferramenta de geometria definida**. 1999. 217 f. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) - Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 1999.
- [30] BET, L. **Estudo da medição da textura de superfícies com sondas mecânicas e com sondas ópticas tipo seguidor**. 1999. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) - Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 1999.
- [31] SPUR, G.; STÖFERLE, T. **Handbuch der Fertigungstechnik – Spanen**. Band 3/1. Munique: Editora Carl Hanser, 1979. 592 p.
- [32] INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **Tool life testing with single point turning tools**, ISO 3685. 1977. First Edition.
- [33] Tiefbohren. Página da internet. Disponível em: <<http://www.tiefbohren.info>>. Acesso em: 06 outubro 2003.

- [34] CHIAVERINI, V. **Aços e ferros fundidos**. 7. ed. São Paulo: Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais, 1998.
- [35] CALLISTER, W. D. JR. **Materials science and engineering introduction**. 5. ed. John Wiley & Sons, 1999.
- [36] MANGONON, P. L. **The principles of Materials selection for engineering design**. Prentice-Hall, 1999.
- [37] SPERRE. Página da Internet. Disponível em:  
<<http://www.sperre.com/Sperre.nsf/luAlloys/3C1F999AA7BE1CF0412567A10049AE3E?OpenDocument>>. Acesso em: 10 agosto 2003.
- [38] ASM SPECIALTY HANDBOOK – **Cast iron**. 1ª edição. 1996
- [39] CELMAR. Disponível em:  
<<http://www.celmarnet.com.br/produto.asp?categoria=3&produto=36>>. Acesso em: 08 outubro 2004.
- [40] BALZERS. Disponível em: <<http://www.balzers.com>>. Acesso em: 07 julho 2004.
- [41] INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **Tool life testing in milling – Part 1: Face milling**, ISO 8688/1. 1989. First Edition.
- [42] INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **Tool life testing in milling – Part 2: End milling**, ISO 8688/2. 1989. First Edition.
- [43] PINTO, F. W. **Medição das forças de usinagem utilizando plataformas piezelétricas**. 1999. 74f. Trabalho de graduação (Graduação em Engenharia Mecânica) – Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de santa Catarina, Florianópolis, 1999.
- [44] OHGO, K.; SATOH A.; MIZUNO, T.; et al. Relation between cutting conditions and precision in the reaming of gray iron castings. **Wear**, Volume 52, Issue 1, pg. 79-88, Janeiro 1979.
- [45] FERREIRA, J. C. **CAPP – Computer Aided Process Planning**. Apostila de aula, UFSC, 1996

## BIBLIOGRAFIA AUXILIAR

- CAMARGO, A. Óleos lubrificantes e preservação. **O Mundo da Usinagem**. Disponível em:  
<<http://www.omundodausinagem.com.br/geral/jsps/frame.jsp?pagina=/revistasantvik/edicao4-03/fluidos.pdf>>. Acesso em: 28 setembro 2004.
- HUBER, H. Microbiologia e fluidos para usinagem. **O Mundo da Usinagem**. Disponível em:  
<<http://www.omundodausinagem.com.br/geral/jsps/frame.jsp?pagina=/revistasantvik/edicao1-04/produtividade.pdf>>. Acesso em: 28 setembro 2004.
- HUBER, H. Teoria e prática. **O Mundo da Usinagem**. Disponível em:  
<<http://www.omundodausinagem.com.br/geral/jsps/frame.jsp?pagina=/revistasantvik/edicao2-04/produtividade.pdf>>. Acesso em 28 setembro 2004.
- INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **Basic quantities in cutting and grinding – Part 1: Geometry of the active part of cutting tools – General terms, reference systems, tool and working angles, chip breakers**, ISO 3002/1. 1982. Second Edition.
- INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **Basic quantities in cutting and grinding – Part 4: Forces, energy, power**, ISO 3002/4. 1984. First Edition.
- INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **Reamers – Terms, definitions and types**, ISO 5420. 1983. First Edition.
- INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **Special tolerances for reamers**, ISO 522. 1975. First Edition.
- MARTINEZ, F. G.; SARULS, R. Usinagem com e sem refrigeração: verdades, mitos e tendências. **O Mundo da Usinagem**. Disponível em:  
<[http://www.omundodausinagem.com.br/geral/jsps/frame.jsp?pagina=/revistasantvik/edicao4-02/fluidos\\_de\\_corte.pdf](http://www.omundodausinagem.com.br/geral/jsps/frame.jsp?pagina=/revistasantvik/edicao4-02/fluidos_de_corte.pdf)>. Acesso em: 28 setembro 2004.
- PINTO, F. W. **Desenvolvimento de um sistema de mínimas quantidades de fluido de corte integrado ao controle de uma fresadora CNC**. 2002. 146f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2002.
- TEIXEIRA, C. **Influencia dos erros geométricos de afiação nas brocas helicoidais de**

**aço rápido na qualidade dos furos produzidos.** 1995. 110 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 1995.

## Anexo A – Considerações sobre o processo

### A.1 A peça

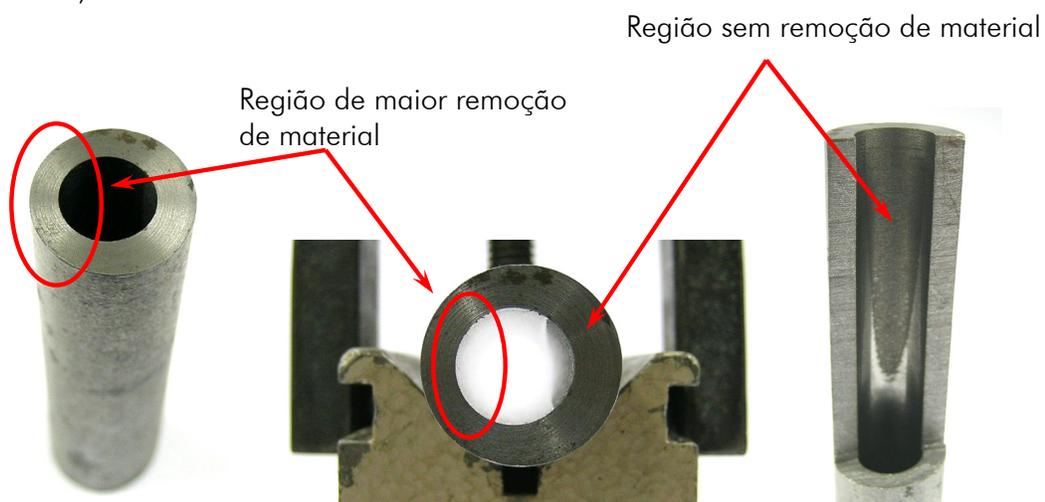
#### a) Furo inicial

A observação do sistema de fixação de peças na etapa de furação anterior ao processo de alargamento mostra que o mesmo apresenta deficiências, pois apresenta problemas em relação ao alinhamento das peças.

O alinhamento do eixo da peça com o eixo da broca é realizado pelo sistema de fixação da peça. Este sistema possui ainda dois sensores eletrônicos que conseguem “perceber” se a peça está alinhada ou não.

Contudo, o posicionamento destes sensores muda de acordo com as dimensões das peças, sendo regulado pelo operador da máquina. Esta regulagem não apresenta sensibilidade suficiente para reconhecer desalinhamentos pequenos, fazendo com que o eixo do furo não coincida com o eixo das peças. Este problema é mais evidente quando estas peças são alargadas, pelo caráter aleatório da ocorrência de peças com desvio de furo.

A Figura A.1 apresenta uma peça furada e alargada. Após a operação de alargamento, observou-se um desvio de furo.



**Figura A.1 – Peça com desvio de furo usinada durante os ensaios**

Este é um problema que ocorre ocasionalmente durante a operação de alargamento, sem que seja determinada uma frequência sistemática.

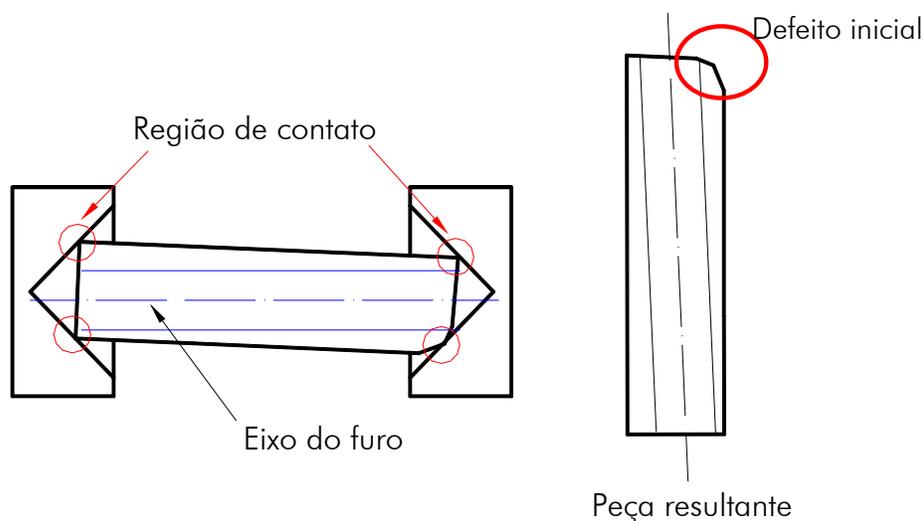
Porém, uma observação mais detalhada da peça mostrou que, devido a um problema ocorrido na fundição, uma das faces da peça não é constituída por uma circunferência (Figura A.2). Como esta é exatamente a região de apoio (referência de apoio) na fixação nas furadeiras, essa característica provocou um desalinhamento na peça, e o eixo do cilindro não coincidiu com o eixo do furo. Nota-se ainda que a região de maior remoção de material pelo alargador (Figura A.1) é oposta à região com problemas de fundição (Figura A.2).



**Figura A.2 – Problema de fundição resultando em problemas de desvio de furo**

Obviamente esta peça representa um caso exagerado de desalinhamento, mas é representativa em relação aos tipos de erro que podem ser gerados.

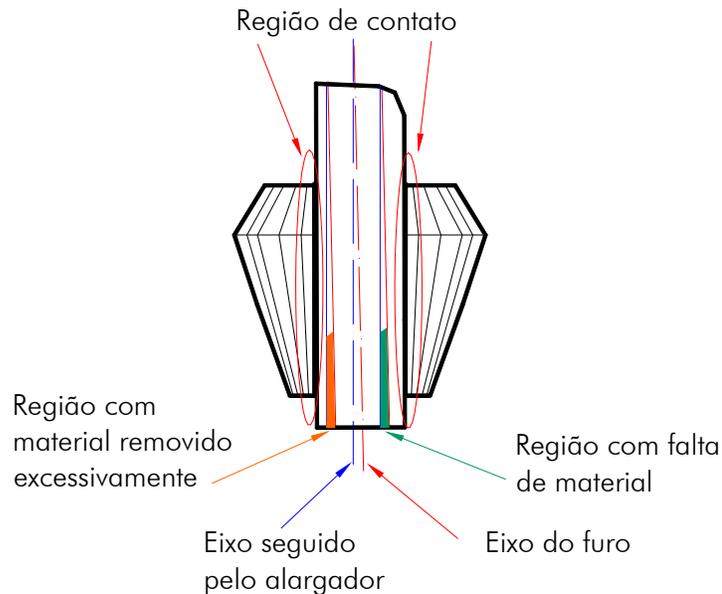
Este processo pode ser melhor entendido pelas figuras esquemáticas abaixo.



**Figura A.3 – Fixação de uma peça defeituosa no processo de furação precedente**

Com isso, o eixo do furo não é paralelo ao eixo do cilindro formado pela peça. Apesar dos alargadores terem a característica de seguir o furo, não conseguem

acompanhar erros excessivos. O resultado é visto na figura abaixo, onde se percebe que a região de retirada de material em excesso é oposta à região de defeito da peça.



**Figura A.4 – Resultado do alargamento de uma peça com furo desalinhado**

Este problema decorre do uso de diferentes superfícies de apoio, de projeto e de fabricação, não obedecendo ao princípio da coincidência de referências [45].

### **b) Material**

É de conhecimento que a taxa de resfriamento durante a solidificação do ferro fundido altera suas propriedades. No processo de fundição de peças cilíndricas e pequenas, a taxa de resfriamento é influenciada pela posição que cada peça encontra-se no molde de areia. Diante disso, visando avaliar quantitativamente estas variações, foram selecionadas peças em diferentes posições do molde.

Pode-se esperar que as peças afastadas do canal tenham maiores taxas de resfriamento, que conseqüentemente produzem peças com maior dureza, devido ao tipo de estrutura formada.

Para avaliar os efeitos destas diferenças de microestrutura na usinagem foram realizados ensaios de medição de forças de corte. Foram selecionadas 4 peças próximas e 4 peças afastadas do canal de fundição. Após selecionadas na fundição, as peças

foram preparadas no LMP, para que não fossem misturadas no processo de fabricação da empresa.

Com os corpos de prova prontos procedeu-se a fixação na máquina-ferramenta do LMP, e executou-se a furação. A broca foi trocada pelo alargador, e realizaram-se então as medições do momento torçor e da força de corte deste processo. Esta seqüência foi repetida até que as 8 peças fossem usinadas.

Os parâmetros de corte utilizados foram os mesmos determinados no chão-de-fábrica. A broca utilizada foi de diâmetro 8,4 mm e o alargador 9,011 mm.

Como esperado, as peças afastadas do canal de vazamento apresentaram maiores valores para os esforços de usinagem. Além disso, os valores do momento torçor apresentaram maiores dispersões. O resultado pode ser visto na Tabela A.1.

**Tabela A.1 – Resultado de medições de  $F_f$  e  $M_t$  das peças próximas e afastadas do canal de vazamento do molde**

		Próximo ao canal	Afastado do canal
$M_t$	Média	115,8 N.cm	127,0 N.cm
	Desvio padrão	1,8	5,2
$F_f$	Média	66,3 N	72,6 N
	Desvio padrão	1,6	1,3

Pelos valores apresentados na tabela acima, pode-se perceber que apenas a posição das peças no molde de fundição pode representar diferenças de esforços da ordem de 10%, demonstrando mais um fator de influência na estabilidade do processo. Pode-se esperar que valores muito maiores possam ser atingidos, comparando-se diferentes moldes e corridas de fundição.

Após a realização dos ensaios, procedeu-se a medição de dureza das peças. Foram realizadas 3 medições em cada corpo de prova, uma próxima a cada extremidade e a terceira no comprimento médio da peça. Os resultados podem ser observados na Tabela A.2.

**Tabela A.2 – Resultado da medição de dureza das peças próximas e afastadas do canal de vazamento**

	Próximo ao canal	Afastado do canal
Média	234 [HB]	252 [HB]
Desvio padrão	4	8

Assim como no caso das forças, houve uma diferença significativa entre os valores dos dois conjuntos de peças. Também foi observada a maior dispersão de resultados apresentada pelas peças afastadas do canal de fundição.

Vale ressaltar que os valores das peças próximas ao canal de vazamento apresentam dispersões de resultados muito pequenas, representadas pelo desvio padrão das medições. Assim justificam-se as dispersões dos valores de medições de forças nos ensaios de vida de ferramentas.

## **A.2 A máquina-ferramenta**

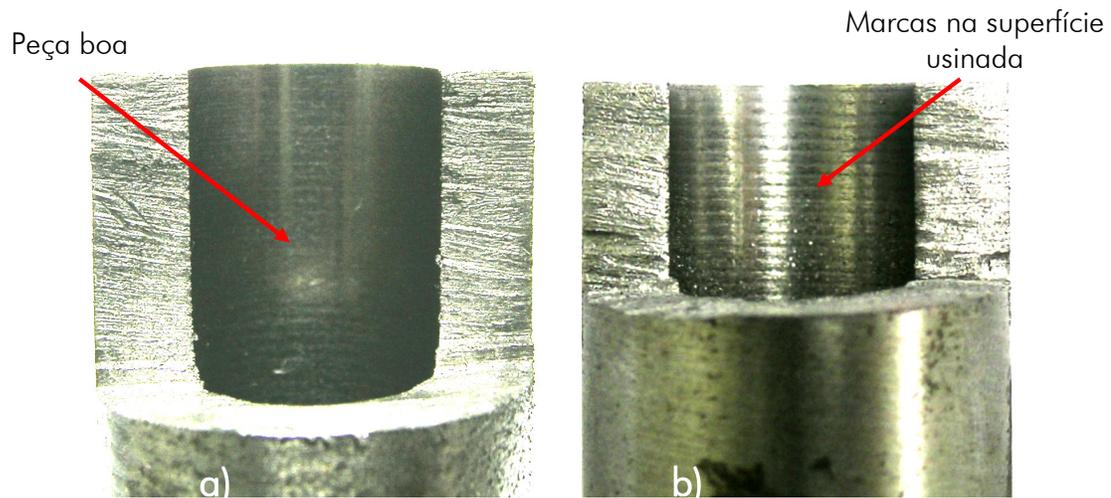
A principal observação realizada em relação à máquina-ferramenta refere-se aos parâmetros de corte. Foi observado que o tipo de controle do avanço não é adequado, por vários motivos. O primeiro é relativo ao tempo de ajuste, interativo, demasiadamente longo.

Além disso, em operações normais de produção, o próprio operador da máquina-ferramenta regula o avanço da maneira que lhe convier, não havendo portanto padronização das condições de usinagem. A velocidade de corte é limitada pela rotação máxima das máquinas-ferramentas, a 1.000 rpm. Esta falta de padronização de parâmetros de corte causa diferentes níveis de desgaste de ferramentas e também alterações da qualidade das peças.

Outra constatação refere-se à fixação das peças. Frequentemente ocorrem acúmulos de cavacos nas pinças, o que provoca desalinhamento entre a peça e o eixo de avanço da ferramenta, produzindo peças com desvio de furo.

## **A.3 Definição de critérios de fim de vida**

Na execução da quarta etapa dos ensaios, foi constatado pelo operador que as peças produzidas pela ferramenta 9,011#3 apresentavam marcas na superfície usinada (Figura A.5). Isso gerou discrepância relativamente aos critérios de definição se as peças estavam ou não atendendo às exigências de qualidade. Enquanto alguns operadores alegavam que tais marcas não poderiam ocorrer, outros diziam que se a rugosidade e o diâmetro estivessem dentro das tolerâncias, não haveria problemas.



**Figura A.5 – a) peça boa b) peça com marcas na superfície usinada**

Foi acatada a decisão do responsável pelo setor de usinagem, de que tais marcas não são permitidas, pois alguns clientes não aceitam peças com essas características. Com esta decisão, foi determinado o fim de vida da ferramenta.

Contudo, após a observação das peças coletadas para as medições de rugosidade e diâmetro (a cada 50 peças), foi constatado que esta ferramenta já produzia peças com tais características desde o início dos ensaios. Na Figura A.5, é apresentada a peça número 50 em corte, mostrando que tais marcas já ocorriam no início dos ensaios. Este exemplo mostra que a falta de informação provocou o desperdício de mais de 800 peças.

#### **A.4 Uso de Ferramentas na Linha de Produção – Análise Estatística**

No início do desenvolvimento deste trabalho, o levantamento de informações foi realizado de modo qualitativo, através de entrevistas e discussões técnicas com os funcionários da empresa. Assim, o planejamento dos ensaios foi realizado com base nestas informações.

Os ensaios de vida foram planejados com base em informações fornecidas pela empresa, onde cada alargador produzia 1.000 a 1.500 peças por afiação. O ensaio de vida mostrou que ferramentas que não tiveram problemas no início da usinagem podem atingir mais de 6.000 furos.

Estas informações demonstraram que, devido à instabilidade do processo, a própria empresa tem dificuldades em descrever adequadamente o comportamento do processo.

Visando fornecer informações estatisticamente confiáveis, foi elaborada uma tabela de acompanhamento das trocas das ferramentas. Para cada alargador que fosse substituído, deveriam ser preenchidas as informações conforme a Tabela A.3.

**Tabela A.3 – Tabela de acompanhamento de troca de ferramentas**

<b>Diâmetro:</b>	<b>Motivo da troca da ferramenta:</b> <input type="checkbox"/> Pino “passa” trancando <input type="checkbox"/> Pino “não-passa” entrando no furo <input type="checkbox"/> Diâmetro maior do que limite (ogiva) <input type="checkbox"/> Diâmetro menor do que limite (ogiva) <input type="checkbox"/> Rugosidade alta <input type="checkbox"/> outro motivo. Explique:.....
<b>Turno:</b>	
<b>Liga:</b>	
<b>Ilha:</b>	
<b>Comprimento da peça alargada:</b> ..... mm	
<b>Quantos furos a ferramenta alargou:..... furos</b>	
<b>Observações:</b>	

O uso desta tabela foi implementado, e seu preenchimento foi realizado pelos operadores de máquinas. Esta tabela foi preenchida para 151 trocas de ferramentas. As observações realizadas são apresentadas a seguir.

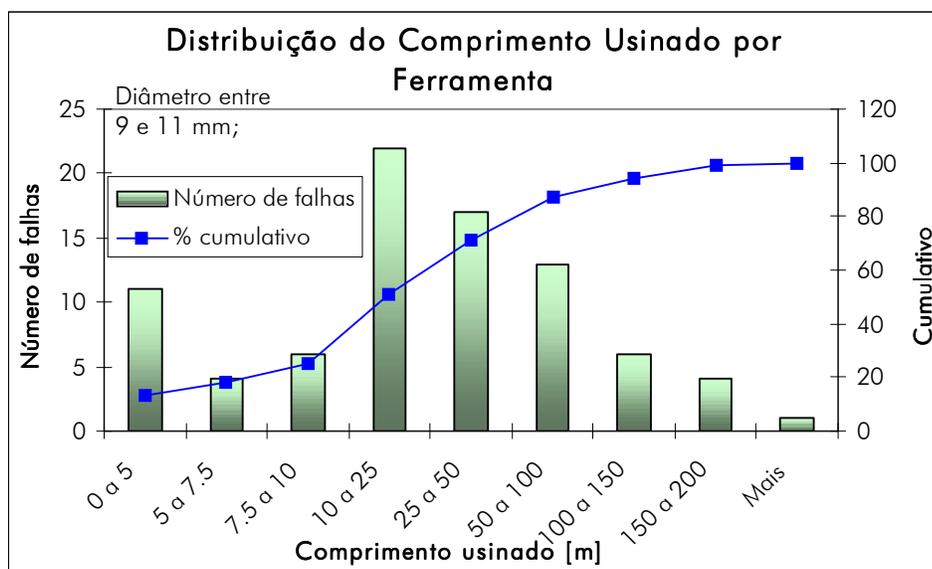
#### **a) Considerações sobre o número de peças usadas**

A primeira constatação refere-se ao número de peças produzidas por cada alargador. Foi observado que o número de peças usadas por cada ferramenta não segue uma distribuição bem definida.

Para esta análise foram necessárias algumas considerações. Devido à grande diversidade de diâmetros (mais de 20), comprimentos de peças (mais de 25), e ainda número de ligas de ferro fundido (5), os resultados foram separados e analisados por conjuntos.

Para isso, os dados foram reunidos em grupos de ferramentas com valores próximos de diâmetros, para a mesma liga, e ainda que apresentassem um número razoável de ocorrências. Ao se restringir, por exemplo, somente um valor de diâmetro, são encontradas apenas poucas ferramentas para se analisar. Para as ferramentas cujos diâmetros situam-se entre 9 e 11 mm, pôde ser formado um grupo com 84 incidências, que usam a mesma liga. Para compensar a diferença entre o comprimento das peças, os dados foram analisados em função do comprimento total usinado (comprimento da peça multiplicado pelo número total de peças produzidas).

Outro aspecto a ser considerado é o fato de que não se pode garantir que as ferramentas trabalharam exatamente com os mesmos parâmetros de usinagem ( $f$ ,  $v_c$ ), pois estes não são quantificados em chão-de-fábrica. A velocidade de corte dentro deste grupo não é constante, pois todas as ferramentas trabalham com a mesma rotação, independentemente do seu diâmetro. O avanço é definido pelo operador, que o maximiza enquanto as ferramentas produzem peças dentro dos limites de rugosidade. Entretanto, apesar destas considerações, estes dados são uma referência inicial para que se possa diagnosticar o processo. Na Figura A.6 é apresentada a distribuição do comprimento usinado por cada ferramenta, bem como o correspondente percentual acumulado.



**Figura A.6 – Distribuição do comprimento usinado por ferramenta**

Pode-se observar que 25% das falhas já ocorrem nos primeiros 10 metros usinados. Isso corresponde a aproximadamente 150 peças (considerando comprimento médio de 67 mm por peça). Deve-se observar que o eixo das abscissas não está em escala linear. Pode-se concluir que esse elevado número de falhas no início do uso das ferramentas é provocado por variações grosseiras de afiação das ferramentas. No caso dos demais alargadores, bom número de peças produzidas com melhor distribuição, sofrem influência mais significativa do uso de diferentes parâmetros de corte.

Outro fato que deve ser reportado é a presença de ferramentas que usinaram apenas duas peças e outras que usinaram mais de 3.000. O cálculo da média simples,

chegaria a um valor de 43 m, com desvio padrão de 49 m, o que demonstra a grande dispersão de resultados.

Ainda em relação ao comprimento das peças, uma ferramenta que alargou 3.200 peças, usinou o mesmo comprimento de outra ferramenta, de diâmetro muito próximo, com 2.230 peças, aproximadamente 157 m. Isso demonstra que a simples comparação entre o número total de peças não é um parâmetro de comparação adequado, entretanto, é muitas vezes utilizado pela empresa. O comprimento total usinado deve ser levado em consideração quando forem comparadas ferramentas fornecidas por outras empresas.

### b) Critérios de fim de vida de alargadores

Outra análise de grande importância realizada é a quantificação dos motivos que levam à substituição da ferramenta da linha de produção. A Figura A.7 representa o percentual das ferramentas trocadas relacionadas a cada critério. Nesta análise, as ferramentas não foram separadas por grupos, assim, estes valores referem-se às 151 ferramentas cadastradas.

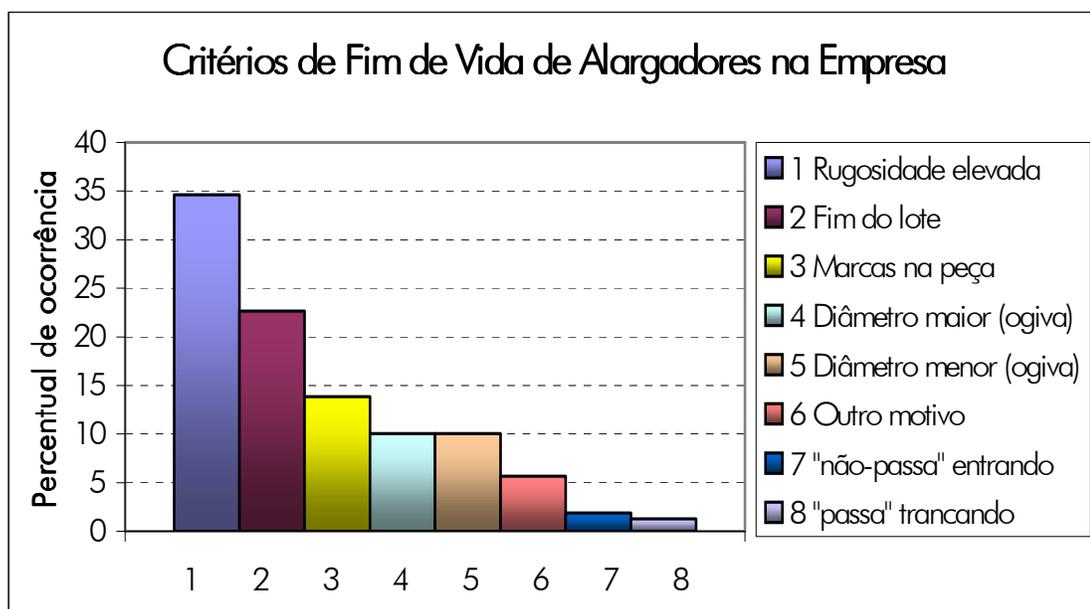


Figura A.7 – Critérios de fim de vida dos alargadores na empresa

Observa-se que, segundo os operadores das máquinas, cerca de 35% das ferramentas, ao chegarem no final de vida, produzem peças com elevada rugosidade, sendo esse o principal motivo da substituição do alargador.

Em segundo lugar na ordem de frequência, é o fato de que mais de 20% das ferramentas são substituídas quando o lote de peças acaba. Ocorre que, após o fim do lote, os alargadores retornam para a ferramentaria e são reafiadas. Com isso, tem-se que 20% das ferramentas são reafiadas sem que se saiba se realmente seja necessário, pois ainda produzem peças dentro dos padrões de qualidade.

Em terceiro lugar, marcas nas peças são as observações qualitativas dos operadores. Foram citadas pelos operadores as expressões “vibrações”, “acabamento ruim” e “riscando a peça”. Como será visto nos próximos tópicos, “vibrações nas peças” são na verdade alisamento excessivo provocado pela ferramenta na superfície do furo. Ferramentas que “riscam a peça” foram constatadas em ensaios onde as condições de corte foram mais agressivas e observou-se adesões nos gumes, que poderiam riscar as peças durante o retorno da ferramenta pelo furo acabado. Pode-se dizer então que aproximadamente 50% das ferramentas são substituídas por apresentarem problemas em relação à qualidade da superfície usinada.

Como outros motivos, foram citados falha elétrica na máquina e alguns casos em que o motivo não foi justificado.

### **c) Considerações sobre os valores de diâmetros utilizados**

Um controle maior das ferramentas pode ser sugerido no sentido de eliminar combinações excessivas de diâmetros de ferramentas. Por exemplo, existem alargadores com diâmetro nominal de 9,011 mm e outros de 9,008 mm. O fato de existirem dois valores de diâmetro tão próximos é questionável, pois o próprio erro de fabricação e/ou medição destes valores já se aproxima muito do valor de 3  $\mu\text{m}$ . Além disso, no caso da ferramenta de 9,011 mm, o campo de tolerância do furo alargado é de 22  $\mu\text{m}$  (9,000 a 9,022 mm), o que pode ser atendido com a ferramenta de 9,008 mm. Outros exemplos destes valores são: 9,539; 9,543; 9,545 e 9,546 mm; 10,007 e 10,011 mm, e ainda 12,009 e 12,012 mm.

Caso seja possível reduzir o número de valores de diâmetro, pode-se reduzir custos com estoques e também reduzir o tempo de preparação das retificadoras de afiação de alargadores.

## Anexo B – Informações complementares sobre as ferramentas de corte

### B.1 Utilização dos alargadores por ensaio

Ao total, foram disponibilizadas 34 ferramentas, fornecidas por 3 diferentes fabricantes conforme apresentado na Tabela B.1. Todas as ferramentas foram marcadas com um código (diâmetro e número), visando permitir sua identificação. A relação dos alargadores utilizados bem como o teste a que foram submetidos são mostrados a seguir.

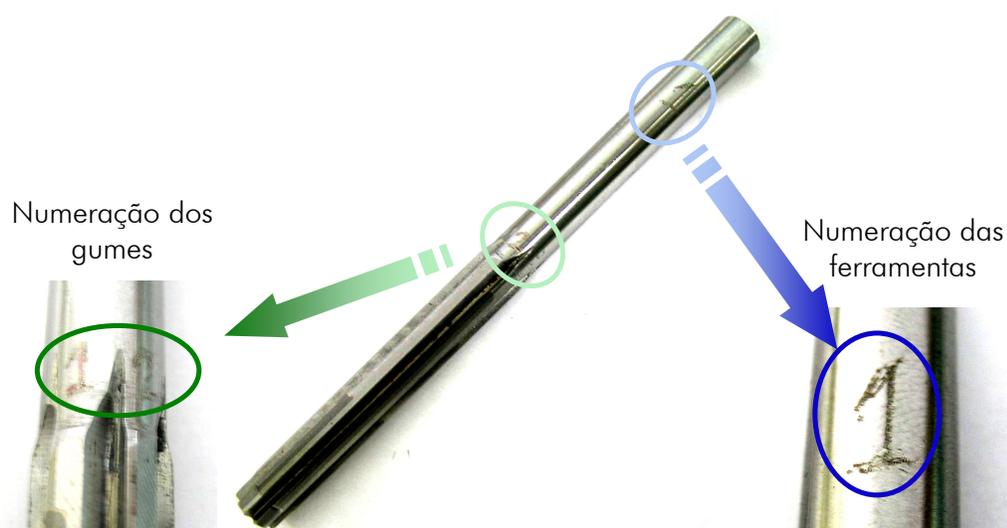
**Tabela B.1 – Descrição das ferramentas utilizadas**

Identificação		Fabricante	Observações
Cód.	$\phi$ [mm]		
P1	7,011	próprio	Ferramentas utilizadas nos ensaios de variação de parâmetros de corte
P2	7,011	próprio	
P1	9,011	próprio	
P2	9,011	próprio	
P1	11,045	próprio	
P2	11,045	próprio	
1	7,011	próprio	Ferramentas utilizadas nos ensaios de vida
2	7,011	próprio	
3	7,011	próprio	
4	7,011	próprio	
1	9,011	próprio	
2	9,011	próprio	
3	9,011	próprio	
4	9,011	próprio	
1	11,011	próprio	
2	11,011	próprio	
3	11,011	próprio	
4	11,011	próprio	
5	9,011	A	Apresentavam marcas de desgaste e foram devolvidas à empresa (Provavelmente haviam sido utilizadas na linha de produção).
6	9,011	A	
7	9,011	A	
8	9,011	A	
9	9,011	A	Apresentava marcas de desgaste e foi devolvida
10	9,011	A	Utilizada em testes de variação de parâmetros de corte
11	9,011	A	Apresentava marcas de desgaste e foi devolvida
12	9,011	A	Utilizada em testes de variação de parâmetros de corte
13	9,011	A	Microgrão – apresentava marcas de desgaste e foi devolvida
14	9,011	A	Revestida com TiNAl – variação de parâmetros de corte
15	9,011	A	Revestida com TiNAl – variação de parâmetros de corte

1	10,37	A	Canais retos – variação de parâmetros de corte
16	9,000	B	Canais retos – ensaios com modificação da geometria
17	9,000	B	Canais retos – ensaios com modificação da geometria
18	9,000	B	Canais retos – ensaios com modificação da geometria
19	9,000	B	Canais retos – ferramenta reserva

## B.2 Identificação das ferramentas

A identificação das ferramentas foi feita pelo diâmetro e pelo seu código. Todas os alargadores receberam a marcação do código nas suas hastes. Os gumes também foram numerados. Os códigos são mostrados na Figura B.1.



**Figura B.1 – Marcação das ferramentas utilizadas**

Devido ao rebaixo de diâmetro na ponta das ferramentas, foi necessária a definição da nomenclatura a ser utilizada por cada região, visto existirem por canal 2 flancos, 2 gumes etc. Desta forma, para este trabalho foi definido que a região da mais próxima à ponta da ferramenta é a cunha, e a outra região o chanfro, conforme Figura B.2.

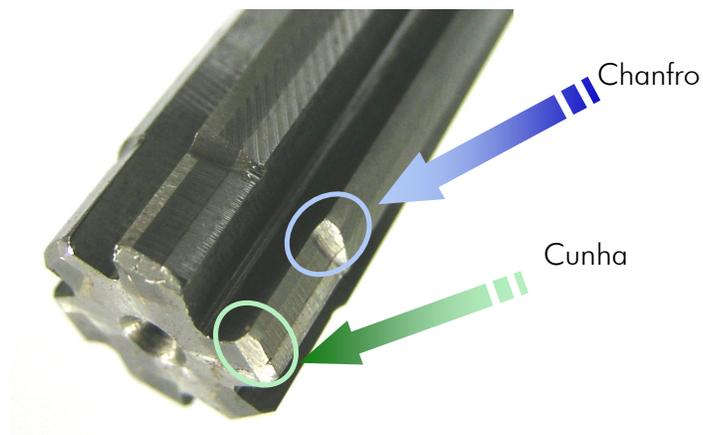


Figura B.2 – Regiões dos alargadores

### B.3 Registro de imagens

Os alargadores foram avaliados tanto qualitativamente quanto quantitativamente.

A análise qualitativa visou a verificação de existência de anomalias nas ferramentas. A observação detalhada das partes constituintes dos alargadores permite observar eventuais falhas, tais como lascamentos e trincas, e identificar eventuais ferramentas fora dos padrões.

A análise quantitativa consistiu na medição de dimensões e ângulos das ferramentas que fossem significativos para a sua caracterização. É interessante observar a importância dessa escolha e da qualidade da medição, já que os valores encontrados nessa etapa serão utilizados não só para a avaliação do estado das ferramentas novas, mas também como padrão para comparações nas etapas de desgaste.

Todas as ferramentas foram documentadas fotograficamente. Os registros foram tomados utilizando-se uma câmera digital, acoplada a um sistema de regulagem de altura montado conforme a Figura B.3.



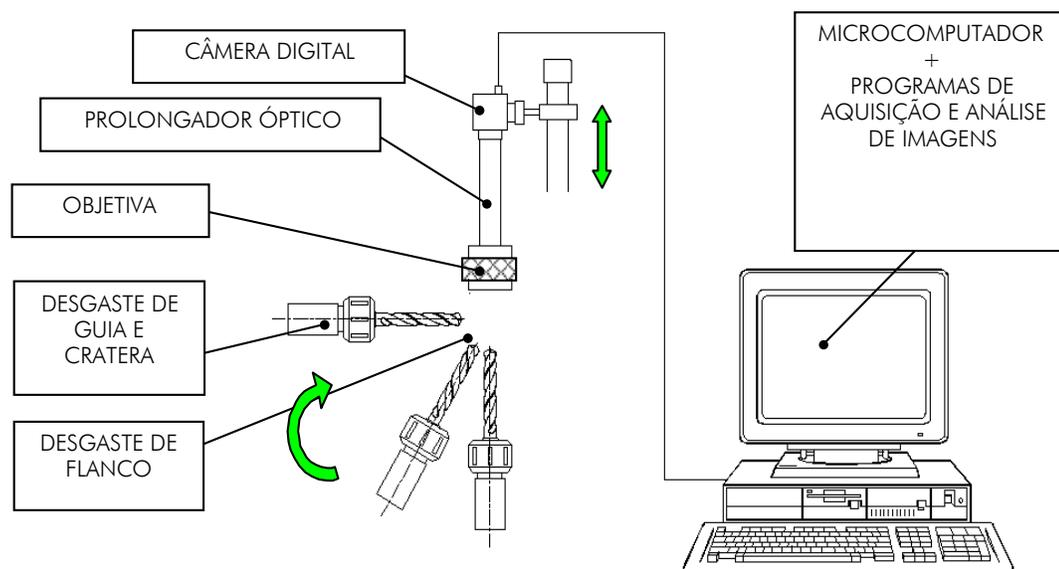
**Figura B.3 – Câmera digital com regulagem de altura**

Juntamente com a câmera, foram montados um conjunto intercambiável de lentes (prolongador óptico) e um sistema de iluminação. As imagens foram armazenadas em um microcomputador que também dispõe de *softwares* de análise de imagens (Figura B.4).



**Figura B.4 – Sistema para aquisição de imagens**

○ funcionamento do sistema pode ser compreendido observando-se a Figura B.5. A ferramenta é posicionada sob a objetiva da câmera, presa a um suporte adaptado para permitir o giro de  $90^\circ$  do seu corpo, possibilitando o registro em qualquer ângulo nesse intervalo. A câmera possui um prolongador óptico (tubo), cuja função é fornecer imagens com maior ou menor ampliação. Quanto mais longo for o tubo, maior será a ampliação. ○ ajuste do foco das lentes é obtido através da regulagem da altura da câmera.



**Figura B.5 – Componentes do sistema de aquisição de imagens**

Para cada ferramenta foi feito um registro fotográfico digital, para que pudessem ser realizadas comparações entre as ferramentas novas e desgastadas, além de identificar quais regiões sofrem mais drasticamente os efeitos de desgastes. Estas imagens serviram ainda como inspeção inicial das ferramentas, como visto no item 4.1.

Inicialmente foram executadas diversas fotos, e escolhidas as que melhor representavam a ferramenta. Para todas as repetições empregou-se o mesmo procedimento, visando obter também uma padronização de imagens. Optou-se por registrar as seguintes imagens:

- Topo (1 por alargador);
- Flanco 1 (1 por canal de cada ferramenta);
- Flanco 2 (1 por canal de cada ferramenta)
- Guias 1 – diâmetro maior (1 por dente de cada ferramenta);
- Guias 2 – diâmetro menor (1 por dente de cada ferramenta);
- Face (1 por canal de cada ferramenta);
- Cunha (1 por canal de cada ferramenta);
- Chanfro (1 por canal de cada ferramenta).

Com exceção da foto de topo, todas as imagens foram registradas para cada um dos gumes, totalizando 29 fotos para as ferramentas de diâmetro 7,011 mm e 43 para as de 9,011 e 11,011 mm.

As fotos abaixo são de uma ferramenta de diâmetro 7,011mm, e ilustram o padrão utilizado em cada uma das imagens.

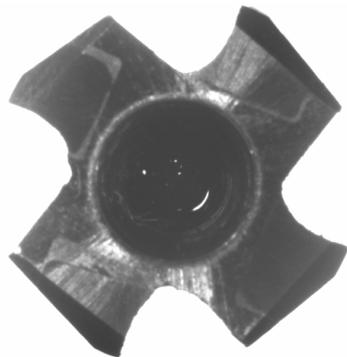


Figura B.6 – Foto de topo

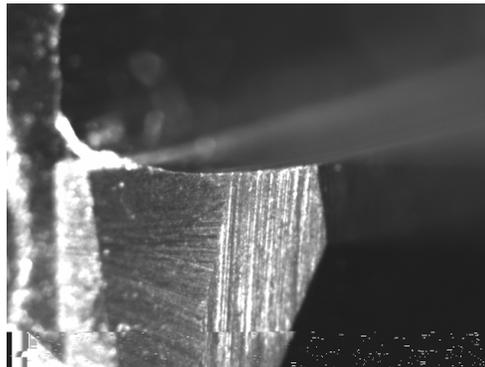


Figura B.7 – Foto do flanco 1

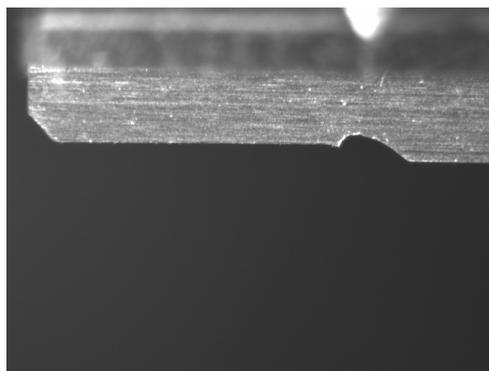


Figura B.8 – Foto da face

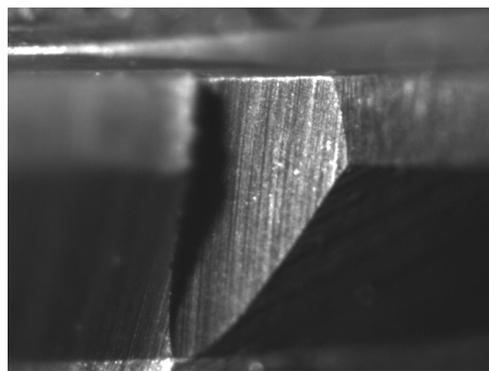


Figura B.9 – Foto do flanco 2

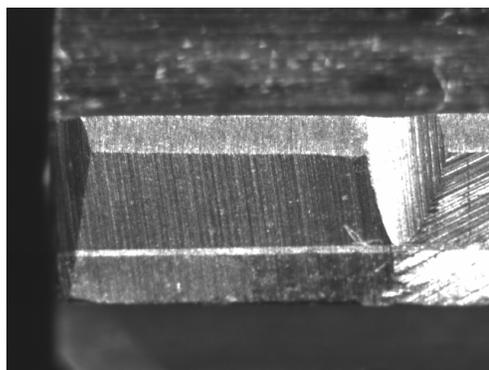


Figura B.10 – Foto da guia 1

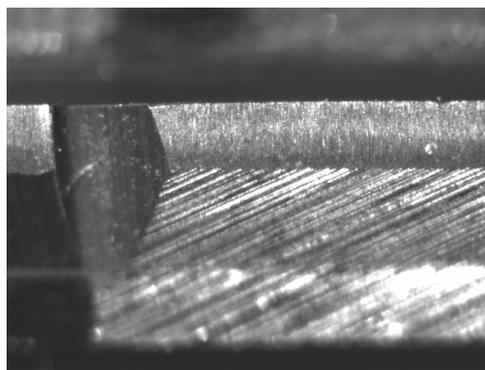


Figura B.11 – Foto da guia 2

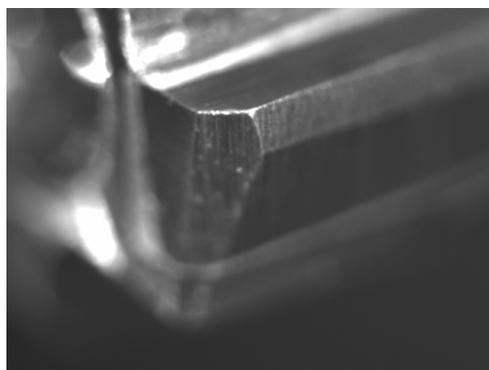


Figura B.12 – Foto da cunha

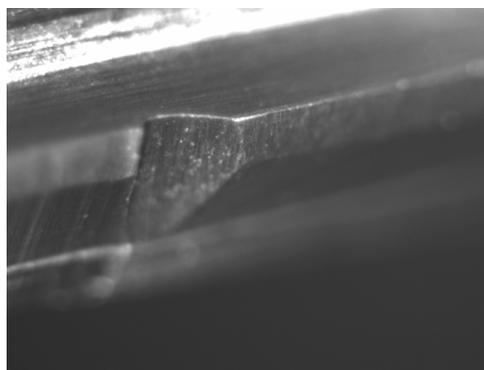
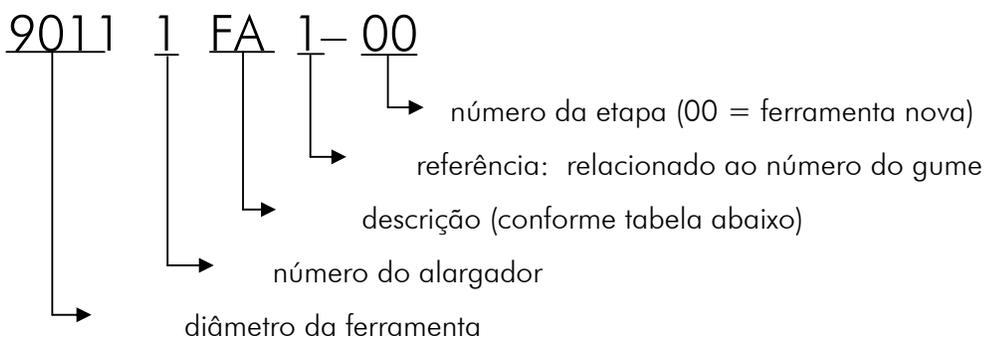


Figura B.13 – Foto do chanfro

Estas fotos foram tiradas para todas as ferramentas recebidas (novas). Para as ferramentas submetidas aos ensaios de vida, as fotos foram repetidas a cada etapa, como será explicado mais adiante.

Devido ao grande número de imagens, e de forma a otimizar o armazenamento e a sua localização, foi estabelecido um padrão de organização dos registros de maneira apropriada até o final da realização dos ensaios. A nomenclatura adotada segue o seguinte padrão:

**EXEMPLO:** Ferramenta de diâmetro 9,011 mm - número 01



A Tabela B.2 relaciona o nome do arquivo de imagem com a respectiva descrição do seu conteúdo.

Tabela B.2 – Descrição do conteúdo dos arquivos de imagem

	código	descrição
1	CH	Chanfro
2	CU	Cunha
3	F2	Flanco 2
4	FA	Face
5	FL	Flanco
6	G1	Guias 1
7	G2	Guias 2
8	TO	Topo

#### B.4 Equipamentos de medição de ferramentas e metodologia

As medições das características das ferramentas foram realizadas por meio de instrumentos de medição diretamente nos alargadores, e no caso de ângulos, com o uso de um *software* para análise das imagens registradas.

##### a) Medições diretas de grandezas

Para cada uma das medições de grandezas nas ferramentas, foram realizadas três medições consecutivas, pelo mesmo operador, de forma a reduzir o erro do resultado final. A dimensão considerada foi a média aritmética dos resultados obtidos nas três medições. O intervalo de confiança das medições foi definido para confiabilidade de 95%.

##### *Diâmetros*

Os diâmetros dos alargadores foram medidos entre gumes opostos, na região próxima à ponta da ferramenta e também logo após o chanfro. Para esta medição fez-se uso de um micrômetro marca Mitutoyo. O diâmetro foi medido para cada par de gumes opostos.

##### *Comprimento dos alargadores*

A medição do comprimento foi realizada entre a ponta da ferramenta e a extremidade final da sua haste. Foi utilizado um micrômetro para estas medições.

##### *Largura das guias dos alargadores*

A largura das guias também foi medida na região próxima à ponta da ferramenta. O equipamento utilizado foi um microscópio de ferramentaria Nikon Measurescope (Figura B. 14).

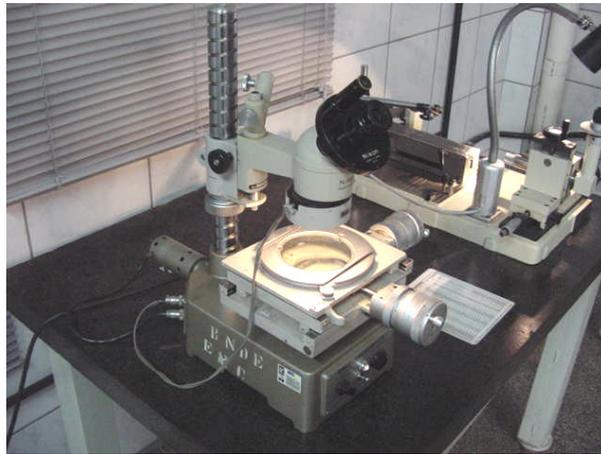


Figura B. 14 – Microscópio de ferramentaria Nikon

#### b) Medições indiretas de grandezas – em imagens digitais

Nas fotos dos alargadores, foram utilizadas diferentes ampliações. Para cada uma, foi fotografada uma régua com comprimento conhecido. Esta dimensão é medida com o uso de um *software* computacional. Com a relação entre a dimensão real e o valor medido, pode-se configurar a escala de um *software* de tratamento de imagens para fornecer o valor real da dimensão.

Tomando-se estes cuidados, pode-se registrar uma unidade padrão (régua graduada, por exemplo) com cada um dos tubos a serem utilizados (cada tubo fornece uma ampliação diferente). Essas imagens serão utilizadas para estabelecer a relação da dimensão real da régua (conhecido) e valor indicado pelo *software* gráfico. Deste modo, pode-se configurar o *software* para calcular esta relação, indicando automaticamente o valor real medido.

Além disso, com o auxílio de um *software* de CAD, pode-se criar formas geométricas ideais sobre as imagens digitais. Este é o caso da análise das fotos de topo.

*Foto de topo*

A foto de topo de uma ferramenta mostra o perfil dos gumes de cada alargador (Figura B.6). Deste ponto de vista, ortogonal ao eixo do alargador, deve ser observada uma circunferência perfeita coincidindo com os gumes da ferramenta.

Sabe-se, contudo, que formas geométricas perfeitas não são obtidas na prática. Os que existe são valores aceitáveis de erro. Para avaliar a ordem de grandeza destes erros, uma circunferência ideal foi criada sobreposta ao perfil de cada ferramenta.

Para adequar uma circunferência a um perfil real, partiu-se do princípio de que 3 pontos definem uma única circunferência. Em cada ferramenta foram escolhidos 3 pontos sobre as guias, e o perfil gerado foi comparado com a posição dos gumes do alargador. Nas ferramentas com 6 gumes, os pontos foram escolhidos sobre gumes alternados, e nas ferramentas de 4 gumes (diâmetro 7,011) um dos gumes não foi utilizado para a definição da circunferência.

## Anexo C – Materiais e equipamentos utilizados

### Fresadora Romi Polaris

Características técnicas	
	
Potência de acionamento (kW): 15	
Rotação máxima (rpm): 6000	
Avanço máximo (mm/min): 30.000	
Curso dos Eixos (mm) X: 710 Y: 420 Z: 600	Erro de Posicionamento dos Eixos (µm) X: 20 Y: 30 Z: 10

### Plataforma Piezelétrica e Amplificadores

Modelo	9273
Fabricante	Kistler Instrumente AG
País de origem	Suíça
Faixa de calibração [N]	0 – 15000N
Linearidade [%]	≤ 0,3
Incerteza da medição [%]	≤ 1
Temperatura de utilização [°C]	0...70

Canal F <sub>f</sub>	
Cabo	1
Canal	1
Amplificador	A
Faixa de calibração [N]	0 – 6000
T (sensibilidade do cristal) [pC/N]	1,96
S (ordem de grandeza da força neste canal) [N/V]	6,0 E+2
Equação de conversão de sinais	$F = (\text{sinal} - 2047,5) / 0,3498$
Incerteza da medição [N]	60

Canal M <sub>t</sub>	
Cabo	2
Canal	2
Amplificador	B
Faixa de calibração [Nm]	0 – 11
T (sensibilidade do cristal) [pC/N]	1,65
S (ordem de grandeza da força neste canal) [Nm/V]	1,10 E+2
Equação de conversão de sinais	$F = (\text{sinal}-2047,5)/1.8554$
Incerteza da medição [Nm]	0,25

### Dados da Câmera Digital

Modelo	TM-7CN
Fabricante	Pulnix American Inc.
País de origem	Estados Unidos
Imagens	½" Interline transfer CCD
Pixel	768 (h) x 494 (v)
Tamanho da célula [µm]	8,4 x 9,8
Varredura	525 linhas 60 Hz
Sincronismo	Cristais internos
Resolução	570 (h) x 350 (v)
Iluminação mínima	0,5 lux (F=1,4)
Potência	19-12 V DC, 220 mA
Temperatura de operação [°C]	-10 a 50

### Fluido de corte

Amostra	01
Produto Analisado	CUT MAX 101
Fabricante	HOUGHTON
Data da coleta	23/01/04
Período de uso	EM USO
Local da coleta	RESERVATORIO
<b>ENSAIOS</b>	<b>RESULTADOS</b>
Cor	CINZA CLARO
Aparência	LIMPIDO
Viscosidade 40°C, cSt	13,32
Ponto de Fulgor, °C	186.0
Nº de Neutralização	0,07
Teor de Água	ISENTO
Contaminantes por centrifugação, %	TRAÇOS