

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

FURAÇÃO PROFUNDA DE FERRO FUNDIDO CINZENTO GG25  
COM BROCAS DE METAL-DURO COM CANAIS RETOS

Dissertação submetida à

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA

para a obtenção do grau de

MESTRE EM ENGENHARIA MECÂNICA

WILLIAN JEFFERSON GONZÁLEZ CASTILLO

Florianópolis, março de 2005

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

FURAÇÃO PROFUNDA DE FERRO FUNDIDO CINZENTO GG25  
COM BROCAS DE METAL-DURO COM CANAIS RETOS

WILLIAN JEFFERSON GONZÁLEZ CASTILLO

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 A. Bellini da Cunha Neto, Dr.  
Coordenador do Curso

BANCA EXAMINADORA

---

Prof. Dr. Ing. Walter Lindolfo Weingaertner  
Presidente

---

Prof. João Carlos Espíndola Ferreira, Ph.D.

---

Prof. Dr. Ing. Joel Martins Crichigno Filho

“Os homens não são prisioneiros do destino,  
mas apenas prisioneiros de suas próprias mentes.”

Franklin Roosevelt

A meus pais Gloria e Rafael,  
a meus irmãos Hegel e Olga,  
a Lílian

## AGRADECIMENTOS

Ao professor Rolf Bertrand Schroeter, pela oportunidade, pelo exemplo de profissionalismo, pelos inúmeros conhecimentos transmitidos, pela orientação e incentivo durante toda a pesquisa.

Ao professor Rodrigo Lima Stoeterau, pela colaboração e companheirismo.

Ao professor Walter Lindolfo Weingaertner, pelo apoio e confiança depositados.

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 Anderson, Jonas, Vincenzo, David, Rovadir, Domitila e Jakson. Também ao Helton, Sérgio, Cleyzer, Eduardo, Leonardo, Rafael, Daniel, Polli, Marco, Sunada, Eriberto, Wagner, Tiagão, Hugo, Fred, Gustavo, Livia, Ana, Elis, Helio, Seu Paulo em fim todos).

Ao programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Santa Catarina, e ao CNPq pelo apoio financeiro.

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.....  | 10 |
| LISTA DE TABELAS .....   | 13 |
| SIMBOLOGIA .....   | 14 |
| RESUMO .....   | 17 |
| ABSTRACT .....   | 18 |
| 1 INTRODUÇÃO.....  | 19 |
| 2 ESTADO DA ARTE.....  | 21 |
| 2.1 O Processo de Furação .....                                  | 21 |
| 2.2 Ferramentas Empregadas na Furação.....                       | 22 |
| 2.2.1 Tipos de brocas .....                                      | 22 |
| 2.2.2 Geometria das brocas helicoidais.....                      | 24 |
| 2.2.3 Influências da geometria no desempenho da ferramenta ..... | 25 |
| 2.2.4 Tipos de afiações.....                                     | 27 |
| 2.3 Furação Profunda .....                                       | 28 |
| 2.3.1 Brocas para furação profunda .....                         | 29 |
| 2.3.2 Máquinas utilizadas em furação profunda .....              | 32 |
| 2.4 Grandezas de Corte.....                                      | 33 |
| 2.4.1 Avanço (f) .....   | 33 |
| 2.4.2 Profundidade de corte ( $a_p$ ) .....                      | 34 |
| 2.4.3 Velocidade de corte ( $v_c$ ) .....                        | 34 |
| 2.4.4 Largura de usinagem (b).....                               | 34 |
| 2.4.5 Espessura de usinagem (h).....                             | 35 |
| 2.5 Desgaste de Ferramentas.....                                 | 36 |
| 2.5.1 Mecanismos de desgaste .....                               | 36 |
| 2.5.2 Formas de desgaste em brocas .....                         | 41 |
| 2.6 Critérios de Fim de Vida .....                               | 43 |
| 2.7 Materiais de Ferramentas para a Furação .....                | 44 |

|          |  |           |
|----------|--|-----------|
| 2.7.1    | Aço-rápido.....                              | 45        |
| 2.7.2    | Metal-duro.....                              | 45        |
| 2.7.3    | Cerâmicas.....                               | 49        |
| 2.7.4    | Materiais Superduros.....                    | 50        |
| 2.7.5    | Revestimentos.....                           | 51        |
| 2.7.6    | Processos de revestimento.....               | 51        |
| 2.7.7    | Principais tipos de revestimentos.....       | 53        |
| 2.8      | Qualidade do processo de furação.....        | 54        |
| 2.8.1    | Erros de forma.....                          | 55        |
| 2.8.2    | Erros de posição.....                        | 57        |
| 2.8.3    | Erros de dimensão.....                       | 58        |
| 2.8.4    | Erros de acabamento.....                     | 58        |
| 2.8.5    | Qualidade da superfície na furação.....      | 60        |
| 2.9      | Forças na Furação.....                       | 62        |
| 2.9.1    | Determinação das forças na furação.....      | 66        |
| 2.9.2    | Equação de Kienzle.....                      | 67        |
| 2.10     | Meios Lubri-refrigerantes.....               | 68        |
| 2.10.1   | Tipos de meios lubri-refrigerantes.....      | 69        |
| 2.11     | Ferro Fundido Cinzento.....                  | 70        |
| 2.11.1   | Usinabilidade do ferro fundido cinzento..... | 71        |
| 2.12     | Custos da Usinagem.....                      | 73        |
| <b>3</b> | <b>MATERIAIS E MÉTODOS.....</b>              | <b>76</b> |
| 3.1      | Corpos de Prova.....                         | 76        |
| 3.1.1    | Material dos corpos de prova.....            | 77        |
| 3.1.2    | Análise microestrutural.....                 | 77        |
| 3.2      | Máquina-ferramenta.....                      | 78        |
| 3.3      | Ferramentas de Corte.....                    | 79        |
| 3.4      | Parâmetros de Corte Utilizados.....          | 81        |
| 3.5      | Meio Lubri-refrigerante.....                 | 81        |
| 3.6      | Medição de Desgastes.....                    | 82        |
| 3.7      | Ensaio de Medição de Forças de Usinagem..... | 83        |
| 3.7.1    | Infra-estrutura dos ensaios.....             | 84        |
| 3.7.2    | Metodologia dos ensaios.....                 | 85        |

|          |   |            |
|----------|---|------------|
| 3.7.3    | Metodologia de avaliação .....  | 85         |
| 3.8      | Avaliação da Qualidade dos Furos.....   | 86         |
| 3.8.1    | Metodologia de avaliação da qualidade dos furos.....  | 86         |
| 3.8.2    | Equipamentos.....   | 87         |
| <b>4</b> | <b>ANÁLISE DOS RESULTADOS.....</b>  | <b>89</b>  |
| 4.1      | Influências da Velocidade de Corte e do Avanço sobre as Grandezas de Saída no<br>Processo de Furação Profunda de Ferro Fundido Cinzento GG25..... | 89         |
| 4.1.1    | Análise da rugosidade dos furos.....  | 89         |
| 4.1.2    | Análise do diâmetro dos furos.....  | 90         |
| 4.1.3    | Análise da cilindricidade.....  | 91         |
| 4.1.4    | Análise da circularidade .....  | 92         |
| 4.1.5    | Análise dos esforços de usinagem .....  | 94         |
| 4.2      | Validação da Metodologia Utilizada na Avaliação das Forças de Usinagem e<br>desgastes .....   | 95         |
| 4.2.1    | Resultados da vida das ferramentas .....  | 95         |
| 4.2.2    | Resultados dos esforços de usinagem .....   | 96         |
| 4.3      | Análise Comparativa para Diferentes Geometrias de Ferramentas.....  | 97         |
| 4.3.1    | Desgaste de flanco máximo .....   | 97         |
| 4.3.2    | Curva de vida das ferramentas.....  | 104        |
| 4.3.3    | Análise econômica.....  | 105        |
| 4.3.4    | Resultados das medições dos esforços de usinagem.....   | 107        |
| 4.3.5    | Considerações sobre os resultados dos esforços de usinagem.....   | 111        |
| 4.3.6    | Qualidade da superfície .....   | 112        |
| 4.3.7    | Considerações sobre os resultados de rugosidade .....   | 114        |
| 4.3.8    | Erro de circularidade.....  | 114        |
| 4.3.9    | Considerações sobre os resultados do erro de circularidade.....   | 116        |
| 4.3.10   | Erro de cilindricidade .....  | 116        |
| 4.3.11   | Considerações sobre os resultados do erro de cilindricidade.....  | 119        |
| 4.3.12   | Diâmetro médio do furo .....  | 119        |
| 4.3.13   | Considerações sobre os resultados do diâmetro médio dos furos .....   | 121        |
| 4.3.14   | Análise qualitativa dos furos usinados .....  | 121        |
| <b>5</b> | <b>CONCLUSÕES E SUGESTÕES.....</b>  | <b>124</b> |



|     |  |     |
|-----|--|-----|
| 5.1 | Conclusões .....                       | 124 |
| 5.2 | Sugestões para Futuros Trabalhos ..... | 127 |
| 6   | REFERÊNCIAS.....                       | 128 |

## LISTA DE FIGURAS

|   |    |
|---|----|
| Figura 2.1 – Variantes do processo de furação .....   | 22 |
| Figura 2.2 – Tipos de brocas para furação curta.....  | 23 |
| Figura 2.3 – Broca helicoidal com haste cônica.....   | 24 |
| Figura 2.4 – Geometria na cunha de uma broca helicoidal .....   | 25 |
| Figura 2.5 – Influência do ângulo de ponta na vida da ferramenta na usinagem de uma liga de titânio com broca helicoidal de metal-duro revestida.....           | 26 |
| Figura 2.6 – Influência do ângulo de incidência sobre a vida da ferramenta na usinagem de uma liga de titânio com broca helicoidal de metal-duro revestida..... | 27 |
| Figura 2.7 – Tipos de afiações especiais de brocas .....  | 28 |
| Figura 2.8 – Broca canhão .....   | 30 |
| Figura 2.9 – Cabeçote de furar BTA .....  | 30 |
| Figura 2.10 – Cabeçote “Ejector” .....  | 31 |
| Figura 2.11 – Broca de canais retos .....   | 31 |
| Figura 2.12 – Geometria de uma broca de canais retos.....   | 32 |
| Figura 2.13 – Concepções básicas de máquinas para a furação profunda.....   | 33 |
| Figura 2.14 – Largura e profundidade de corte na furação .....  | 35 |
| Figura 2.15 – Falhas em ferramentas de corte.....   | 36 |
| Figura 2.16 – Causas de desgaste na usinagem .....  | 37 |
| Figura 2.17 – Formação de fissuras no fresamento .....  | 37 |
| Figura 2.18 – Desgaste abrasivo devido à formação de gume postiço.....  | 39 |
| Figura 2.19 – Modelo de desgaste por difusão.....   | 40 |
| Figura 2.20 – Zonas de oxidação em ferramenta de torneamento de metal-duro .....  | 40 |
| Figura 2.21 – Desgaste de uma broca helicoidal .....  | 41 |
| Figura 2.22 – Tipos de desgaste em brocas .....   | 42 |
| Figura 2.23 – a) Desgaste do gume transversal .....   | 42 |
| Figura 2.24 – Desgaste de flanco em brocas helicoidais.....   | 43 |
| Figura 2.25 – Tamanhos de grão do carboneto de tungstênio WC.....   | 48 |
| Figura 2.26 – Ferramentas cerâmicas .....   | 50 |
| Figura 2.27 – Diagrama esquemático do processo CVD .....  | 52 |
| Figura 2.28 – Revestimento de diamante por PVD.....   | 53 |
| Figura 2.29 – Processo PVD – Sputtering.....  | 53 |

|  |    |
|--|----|
| Figura 2.30 – Erros comuns no processo de furação .....                                      | 55 |
| Figura 2.31 – Tolerância de circularidade .....  | 56 |
| Figura 2.32 – Tolerância de cilindricidade .....   | 56 |
| Figura 2.33 – Tolerância de batimento radial .....   | 57 |
| Figura 2.34 – Tolerância de batimento axial.....   | 58 |
| Figura 2.35 – Rebarbas na furação de ferro fundido .....                                     | 59 |
| Figura 2.36 – Quebras da borda do furo.....  | 60 |
| Figura 2.37 – Marcas na parede do furo .....   | 60 |
| Figura 2.38 – Conceitos básicos na avaliação de superfícies .....                            | 61 |
| Figura 2.39 – Componentes da força de usinagem.....  | 63 |
| Figura 2.40 – Influência do comprimento do gume transversal na força de avanço.....          | 64 |
| Figura 2.41 – Medição de forças com plataforma piezométrica .....                            | 66 |
| Figura 2.42 – Determinação gráfica da força específica de corte segundo Kienzle.....         | 67 |
| Figura 2.43 – Custo de fabricação e parcelas de custos envolvidas no processo .....          | 74 |
| Figura 3.1 – Corpos de prova ensaiados .....   | 76 |
| Figura 3.2 – Micrografia do ferro fundido cinzento GG25.....                                 | 77 |
| Figura 3.3 – Fresadora utilizada na realização dos ensaios de aquisição de forças.....       | 78 |
| Figura 3.5 – Geometrias de brocas testadas.....  | 80 |
| Figura 3.6 – Sistema utilizado na aquisição de imagens de desgaste .....                     | 82 |
| Figura 3.7 – Metodologia de medição do desgaste de flanco $VB_{Max}$ .....                   | 83 |
| Figura 3.8– Infra-estrutura do ensaio de força .....   | 84 |
| Figura 3.9 – Bancada de aquisição de sinais.....   | 85 |
| Figura 3.10 – Intervalo de medição de esforços.....  | 86 |
| Figura 3.11 – Rugosímetro .....  | 87 |
| Figura 3.12 – Circularímetro Mitutoyo RA-400.....  | 88 |
| Figura 3.13 – Micrômetro de três pontos .....  | 88 |
| Figura 4.1 – Variação da rugosidade em função dos parâmetros de corte .....                  | 90 |
| Figura 4.2 – Variação do diâmetro do furo em função dos parâmetros de corte.....             | 91 |
| Figura 4.3 – Variação da cilindricidade em função do avanço e da velocidade de corte.....    | 92 |
| Figura 4.4 – Variação da circularidade em função do avanço e da velocidade de corte.....     | 93 |
| Figura 4.5 – Variação da força em função do avanço e a velocidade de corte.....              | 94 |
| Figura 4.6 – Variação do momento torçor em função do avanço e a velocidade de corte<br>..... | 95 |
| Figura 4.7 – Repetitividade dos resultados de desgaste vs. comprimento usinado .....         | 96 |

|   |     |
|---|-----|
| Figura 4.8 – Repetitividade dos resultados de força de avanço vs. comprimento usinado ..... | 97  |
| Figura 4.9 – Resultados de vida na condição 1 .....   | 98  |
| Figura 4.10 – Caracterização do desgaste – condição 1 .....                                 | 99  |
| Figura 4.11 – Resultados de vida na condição 2 .....  | 100 |
| Figura 4.12 – Caracterização do desgaste – condição 2 .....                                 | 101 |
| Figura 4.13 – Espectro da análise química – geometria C, condição 2 .....                   | 101 |
| Figura 4.14 – Resultados de vida na condição 3 .....  | 102 |
| Figura 4.15 – Caracterização do desgaste – condição 3 .....                                 | 103 |
| Figura 4.16 – Comparação da vida das ferramentas com diferentes geometrias.....             | 103 |
| Figura 4.17 – Curvas de vida para as geometrias A, B, C e D .....                           | 104 |
| Figura 4.18 – Forças de avanço nas três condições ensaiadas .....                           | 107 |
| Figura 4.19 – Forças de avanço para ferramentas novas.....                                  | 108 |
| Figura 4.20 – Momento torçor nas três condições ensaiadas .....                             | 110 |
| Figura 4.21 – Momento torçor na condição de ferramentas novas .....                         | 111 |
| Figura 4.22 – Curvas de rugosidade $R_a$ – condição 1 .....                                 | 112 |
| Figura 4.23 – Curvas de rugosidade $R_a$ – condição 2.....                                  | 113 |
| Figura 4.24 – Curvas de rugosidade $R_a$ – condição 3.....                                  | 114 |
| Figura 4.25 – Curvas de circularidade– condição 1 .....                                     | 115 |
| Figura 4.26 – Curvas de circularidade– condição 2 .....                                     | 115 |
| Figura 4.27 – Curvas de circularidade– condição 3 .....                                     | 116 |
| Figura 4.28 – Curvas de cilindridade– condição 1 .....                                      | 117 |
| Figura 4.29 – Curvas de cilindridade– condição 2 .....                                      | 118 |
| Figura 4.30 – Curvas de cilindridade– condição 3 .....                                      | 118 |
| Figura 4.31 – Curvas da evolução do diâmetro – condição 1 .....                             | 120 |
| Figura 4.32 – Curvas da evolução do diâmetro – condição 2.....                              | 120 |
| Figura 4.33 – Curvas da evolução do diâmetro – condição 3.....                              | 121 |
| Figura 4.34 – Análise qualitativa dos furos .....   | 123 |

## LISTA DE TABELAS

|  |     |
|--|-----|
| Tabela 2.1 – Classificação dos metais duros .....                        | 47  |
| Tabela 2.2 – Precisão de furos produzidos com brocas helicoidais .....   | 58  |
| Tabela 2.3 – Classificação dos ferros fundidos cinzentos .....           | 71  |
| Tabela 3.1 – Composição química do ferro fundido cinzento GG25 .....     | 77  |
| Tabela 3.2 – Dureza Brinell dos corpos de prova .....                    | 78  |
| Tabela 3.3 – Especificações das ferramentas utilizadas no trabalho ..... | 79  |
| Tabela 3.4 – Parâmetros de corte utilizados nos ensaios.....             | 81  |
| Tabela 4.1 – Cálculo das constantes da equação de Taylor.....            | 105 |
| Tabela 4.2 – Resultados da análise econômica.....                        | 106 |

## SIMBOLOGIA

|                                |                      |   |
|--------------------------------|----------------------|---|
| $a_p$                          | [mm]                 | Profundidade de corte   |
| $b$                            | [mm]                 | Largura de corte  |
| $d$                            | [mm]                 | Diâmetro da broca   |
| $f$                            | [mm]                 | Avanço  |
| $f_z$                          | [N]                  | Força na direção Z  |
| $h$                            | [mm]                 | Espessura de corte  |
| $k$                            |                      | Componente de inclinação da equação de Taylor                             |
| $k_{cl.1}$                     | [N/mm <sup>2</sup> ] | Pressão específica de corte para uma seção de cavaco de 1 mm <sup>2</sup> |
| $m$                            |                      | Tamanho do lote   |
| $r$                            | [mm]                 | Raio da broca   |
| $r_\epsilon$                   | [mm]                 | Raio de quina   |
| $t_c$                          | [mm]                 | Tolerância de cilindricidade  |
| $t$                            | [mm]                 | Batimento radial  |
| $t_a$                          | [mm]                 | Batimento axial   |
| $t_e$                          | [min]                | Tempo de fabricação por peça  |
| $t_h$                          | [min]                | Tempo principal de usinagem   |
| $t_n$                          | [min]                | Tempos secundários  |
| $t_r$                          | [min]                | Tempo de preparação da máquina  |
| $t_w$                          | [min]                | Tempo de troca da ferramenta  |
| $v_c$                          | [m/min]              | Velocidade de corte   |
| ABNT                           |                      | Associação Brasileira de Normas Técnicas                                  |
| Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> |                      | Oxido de alumínio   |
| BTA                            |                      | <i>Boring and Trepanning Association</i>                                  |
| $C_m$                          | [min]                | Desgaste no gume transversal (largura)                                    |
| CNC                            |                      | Control numérico computadorizado  |
| $C_t$                          | [min]                | Desgaste no gume transversal (altura)                                     |
| $C_v$                          |                      | Constante que representa a vida T para uma $v_c=1$ m/min Eq. Taylor       |
| CVD                            |                      | <i>Chemical Vapor Deposition</i>  |
| D                              | [mm]                 | Diâmetro de furo  |

|                   |           |  |
|-------------------|-----------|--|
| DIN               |           | <i>Deutsches Institut für Normung</i>            |
| F                 | [N]       | Força de usinagem                                |
| F <sub>c</sub>    | [N]       | Força de corte                                   |
| F <sub>f</sub>    | [N]       | Força de avanço                                  |
| F <sub>p</sub>    | [N]       | Força passiva                                    |
| ISO               |           | International Organization for Standardization   |
| IT                |           | <i>ISO Tolerance</i>                             |
| KT                | [min]     | Profundidade de cratera                          |
| K <sub>w</sub>    | [min]     | Desgaste de cratera                              |
| L                 | [mm]      | Comprimento de furo                              |
| MEV               |           | Microscópio eletrónico de varredura              |
| M <sub>w</sub>    | [mm]      | Desgaste de guia lateral                         |
| M <sub>z</sub>    | [N.cm]    | Momento torços                                   |
| PACVD             |           | <i>Plasma-Assisted Chemical Vapor Deposition</i> |
| PCBN              |           | Nitreto de boro cúbico                           |
| PCD               |           | Diamante policristalino                          |
| PVD               |           | <i>Physical Vapor Deposition</i>                 |
| T                 | [min]     | Vida da ferramenta                               |
| TiAlN             |           | Nitreto de titânio alumínio                      |
| TiC               |           | Carboneto de titânio                             |
| TiCN              |           | Carbonitreto de titânio                          |
| TiN               |           | Nitreto de titânio                               |
| T <sub>ok</sub>   | [min]     | Vida de ótimo tempo de fabricação                |
| T <sub>oz</sub>   | [min]     | Vida para mínimo tempo de fabricação             |
| VB                | [mm]      | Largura média de desgaste do flanco              |
| VB <sub>max</sub> | [mm]      | Largura máxima de desgaste do flanco             |
| W                 | [mm]      | Desgaste de quina                                |
| K <sub>foz</sub>  | [\$]      | Custo mínimo de produção                         |
| K <sub>fok</sub>  | [\$]      | Custo de máxima produção                         |
| K <sub>w</sub>    | [mm]      | Desgaste de cratera                              |
| K <sub>F</sub>    | [\$/peça] | Custo de fabricação por peça                     |
| K <sub>ML</sub>   | [\$/h]    | Custo de máquina e operador por hora             |

|               |         |  |
|---------------|---------|--|
| $K_{WT}$      | [\$]    | Custo de ferramenta por vida                               |
| $WC$          |         | Carboneto de tungstênio                                    |
| $1-m_c$       |         | Expoente da equação de força de corte proposta por Kienzle |
| $\alpha$      | [graus] | Ângulo de incidência                                       |
| $\beta$       | [graus] | Ângulo de cunha  |
| $\varepsilon$ | [graus] | Ângulo de quina  |
| $\sigma$      | [graus] | Ângulo de ponta  |
| $\psi$        | [graus] | Ângulo do gume transversal                                 |
| $\pi$         |         | Pi   |



## RESUMO

O processo de furação é um dos mais utilizados na indústria manufatureira, responsável por cerca de 30% de todas as operações de usinagem. Estima-se que 60% de todas as aplicações de furação na indústria mecânica referem-se a furos curtos, com uma profundidade de até 2,5 vezes o diâmetro da ferramenta. No entanto, um grande número de operações na indústria exige profundidades de furo maiores que 5 vezes o diâmetro. Esse tipo de operação, denominada furação profunda, normalmente requer o emprego de ferramentas e equipamentos especiais. A furação profunda é um processo que possui um grau de complexidade maior do que a furação convencional, devido às condições críticas de usinagem em que se realiza. Tais condições envolvem a dificuldade da formação e do escoamento do cavaco, o comprimento em balanço da ferramenta, a qualidade da superfície e as tolerâncias geométricas e de forma do furo. Este trabalho tem como objetivo principal aprofundar a pesquisa sobre o processo de furação profunda com brocas de canais retos em ferro fundido cinzento GG25, visando um melhor entendimento do processo. Os experimentos foram realizados em linha de produção e em laboratório, utilizando brocas de metal-duro integral com canais retos e com orifícios internos de refrigeração. Como grandeza de saída avaliaram-se a rugosidade, a cilindridade e a circularidade dos furos, bem como o desgaste de flanco das ferramentas, a força de avanço e o momento torçor gerados. Com os resultados obtidos neste trabalho foi possível adquirir um maior conhecimento sobre o processo de furação profunda em ferro fundido cinzento, que permite melhoras na produção de peças em escala industrial.

**Palavras-chave:** Furação profunda, ferro fundido cinzento GG25, brocas de metal-duro, brocas de canais retos.

## ABSTRACT

The drilling process is one of the most important processes of metal cutting used in the manufacturing industry, responsible for approximately 30% of all the machining operations. Almost 60% of all the drilling applications in the mechanical industry are related to short holes, with a depth up to 2.5 times the tool diameter. However, a great number of operations in industry require a length-to-diameter ratio greater than 5 times the tool diameter. These type of operations, known as deep drilling, normally need the use of special tools and equipments. The deep drilling is a process of high complexity due to its special difficulties such as cutting in a closed and limited space, high cutting temperature and the difficulty of chip formation and removal. The objective of this study is to analyze the performance of four different types of carbide drills geometries in drilling GG25 gray cast iron. The experiments have been carried out in line of production and laboratory, using tungsten carbide drills with straight flutes and internal cutting fluid. This research verified the influence of geometry modifications on the tool over the quality of deep holes. The variables evaluated were the cylindricity, roundness, surface roughness and diameter of the holes, as well as the tool flank wear, the thrust force and the torcional force. With the results obtained in this work it was possible to acquire a major knowledge on the deep drilling process of gray cast iron, which allow improvements in the production of pieces in industrial scale.

**Keywords:** deep drilling, carbide drills, straight flutes, GG25 gray cast iron.

## 1 INTRODUÇÃO

Dentre dos processos de usinagem, a furação ocupa um lugar destacado, tanto pela sua enorme utilização, quanto pela dificuldade das operações. Com cerca de 30% de todas as operações de usinagem, na furação a maioria dos furos é realizada com brocas helicoidais, e aproximadamente 60% de todas as aplicações de furação na indústria mecânica referem-se a furos curtos, com uma profundidade de até 2,5 vezes o diâmetro [1, 2]. No entanto, um grande número de operações na indústria exige profundidades de furo maiores que 5 vezes o diâmetro. Esse tipo de operação, denominada de furação profunda, normalmente requer o emprego de ferramentas e equipamentos especiais [3, 4, 5, 6]. Porém, em alguns casos, pode-se também executar a furação profunda com brocas helicoidais convencionais, utilizando ciclos de interrupção do processo para a retirada dos cavacos [3, 7, 8].

Este processo distingue-se da furação convencional pelos tipos de ferramentas empregadas e pela alimentação do fluido lubri-refrigerante, que é fornecido sob pressão diretamente sobre as regiões de corte, já que este é o único responsável pela remoção dos cavacos [9].

A furação profunda é amplamente utilizada, principalmente na fabricação de componentes mecânicos como virabrequins, bielas, cilindros hidráulicos, elementos para motores a diesel, turbinas, trocadores de calor etc. [10]. No entanto, é um processo que possui um grau de complexidade maior do que a furação convencional, devido às condições críticas de usinagem nas quais ocorre. Tais condições envolvem a dificuldade da formação e o escoamento do cavaco, o comprimento em balanço da ferramenta, a qualidade da superfície e as tolerâncias geométricas e de forma do furo (diâmetro, linearidade, cilindridade, circularidade etc.).

Em um mercado cada vez mais competitivo, no qual é necessário atender a normas de qualidade rígidas, um processo de usinagem dentro de uma linha de produção deve conjugar a qualidade das peças usinadas e a vida da ferramenta, em tempos de fabricação reduzidos.

Este trabalho tem como objetivo principal fazer uma contribuição à compreensão do processo de furação profunda com brocas de canais retos em ferro fundido cinzento GG25. A escolha desse material foi motivada por sua grande utilização na área industrial, principalmente no campo automotivo, e a necessidade de se obter furos

profundos de boa qualidade na linha de produção de uma empresa do ramo de autopeças.

Este estudo também objetiva a avaliação do desempenho de quatro diferentes geometrias de afiação de brocas, na furação de ferro fundido cinzento. É realizada uma comparação das geometrias em função das grandezas de saída do processo e uma análise econômica do desempenho das mesmas. Esta investigação visa também verificar a influência das modificações na geometria da ferramenta sobre a qualidade dos furos usinados. Além disso, a pesquisa tem por objetivo gerar informações sobre os fatores perturbadores do processo, os quais estão diretamente relacionados com a máquina-ferramenta, a ferramenta, peça usinada e os parâmetros de usinagem.

Neste trabalho, o material utilizado para os corpos de prova e as ferramentas testadas foram os mesmos empregados em produção seriada de uma empresa parceira do ramo de autopeças, que também disponibilizou para os ensaios seus laboratórios de metrologia e materiais. Os experimentos foram realizados em linha de produção e em laboratório (LMP-UFSC), utilizando brocas de metal-duro com canais retos e com orifícios internos de refrigeração. Como grandeza de saída avaliaram-se a rugosidade, a cilindricidade e a circularidade dos furos, bem como o desgaste de flanco das ferramentas, a força de avanço e o momento torçor gerados.

Com os resultados obtidos neste trabalho, foi possível a implementação de melhoras no processo de furação profunda de peças produzidas em ferro fundido cinzento em escala industrial.

## 2 ESTADO DA ARTE

### 2.1 O Processo de Furação

Desde a era do ferro já eram utilizadas brocas em forma de ponta. Em 1800 surgiram as primeiras publicações sobre furação de metais. Foi pela primeira vez, em 1822, que a broca helicoidal foi citada no "*Gills Technical Repository*". Em 1884 Morse fundou a "*Morse Twist Drill and Machine Company*". Posteriormente, na Alemanha, Robert Stock fez em 1891 os primeiros testes de furação e, em 1896, deu maior ênfase à produção de brocas helicoidais. Essa ferramenta foi melhorada e desenvolvida até os dias de hoje e ainda a broca helicoidal de aço-rápido é a ferramenta mais utilizada na furação [2, 4, 6].

De acordo com a norma alemã DIN 8589, a furação é definida como um processo de usinagem com movimento de corte circular, ou seja, com movimento rotativo principal. A ferramenta possui movimento de avanço apenas na direção do seu eixo de rotação, que mantém sua posição em relação à ferramenta e à peça.

A furação com brocas está incluída no grupo de processos de fabricação por usinagem com gumes de geometria definida, sendo um dos processos mais utilizados. Junto com o torneamento, é uma das operações mais importantes, envolvendo aproximadamente 30% de todas as operações de usinagem de metal [1]. O processo de furação é responsável por 75% do volume de material removido na usinagem [11].

O processo de furação é realizado sob condições relativamente severas, dentre as quais podem ser citadas [2, 6]:

- A velocidade de corte não é uniforme, variando de zero no centro do furo até máximo na periferia;
- O processo de geração de cavaco é de difícil observação;
- O fluido de corte, que deve atuar como refrigerante, lubrificante e meio de transporte de cavacos, chega com dificuldade ao gume da ferramenta, onde é mais necessário;
- Há uma distribuição inadequada de calor na região de corte e ocorre atrito e desgaste pronunciado nas quinas com cantos vivos.

As variações mais comuns do processo e as suas direções de movimentos estão resumidas na **Figura 2.1**.

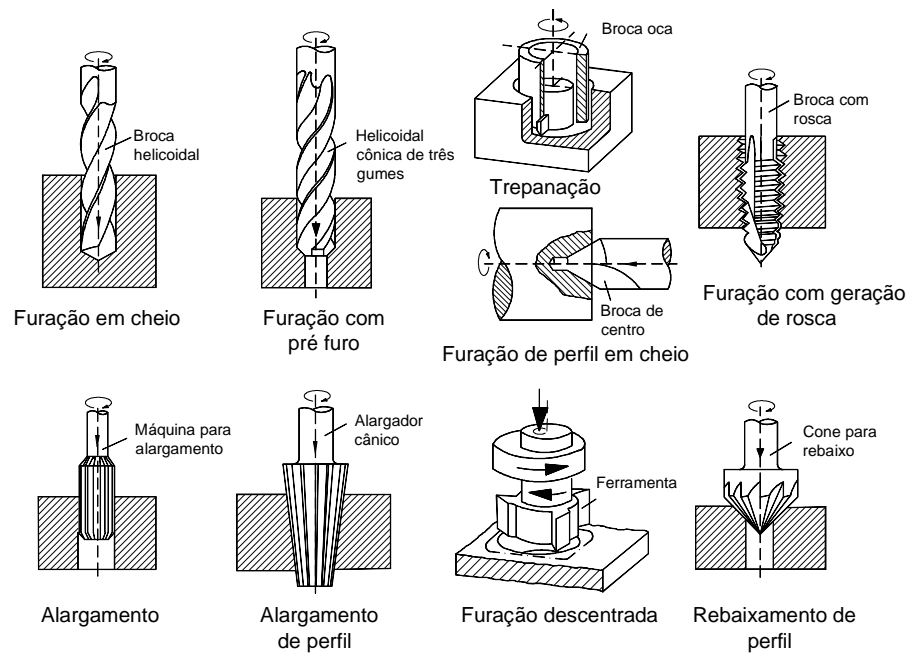


Figura 2.1 – Variantes do processo de furação com ferramentas de geometria definida segundo DIN 8589 [6]

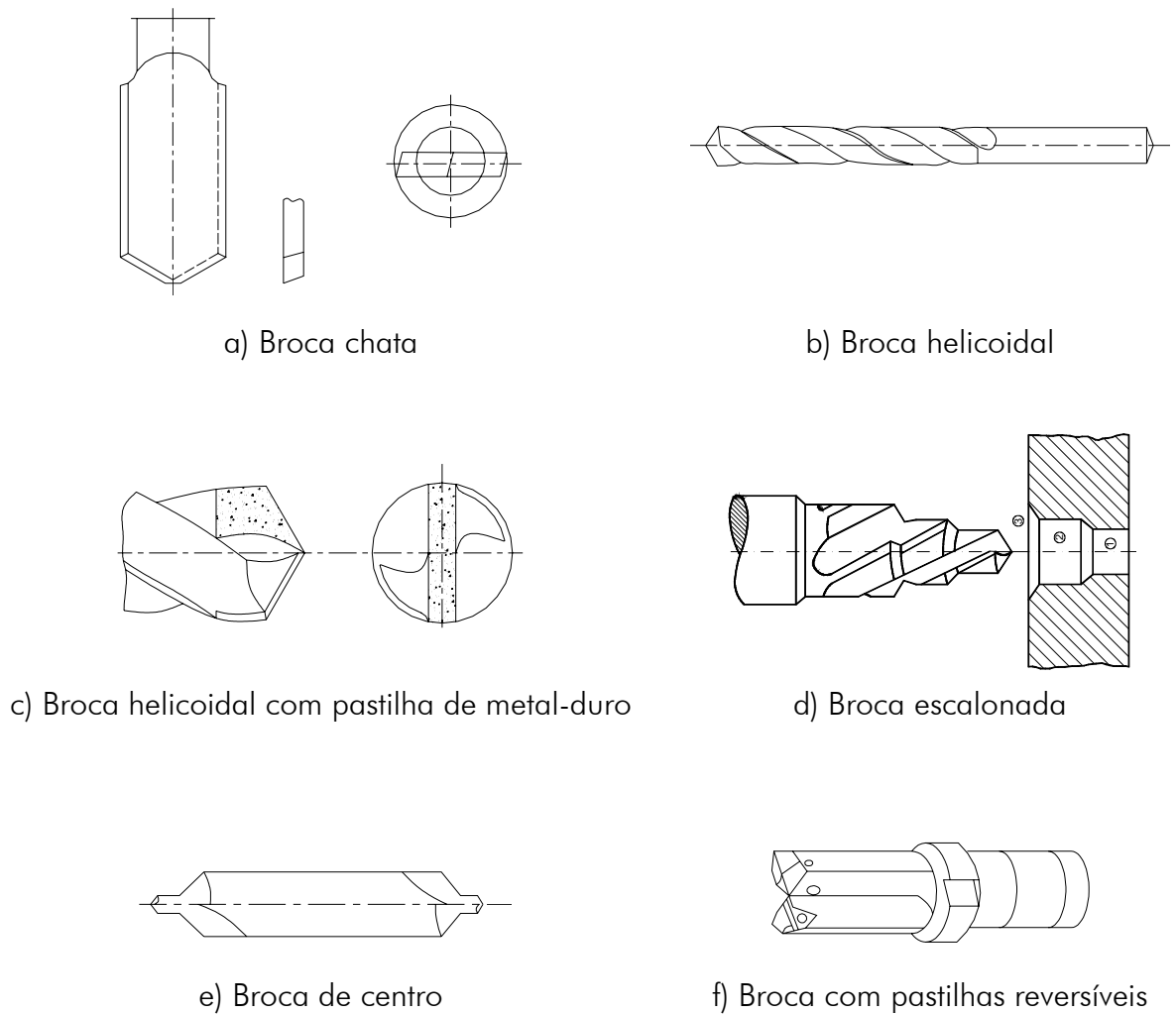
## 2.2 Ferramentas Empregadas na Furação

No processo de furação são empregadas comumente brocas chatas, brocas helicoidais, brocas escalonadas, brocas de centro, brocas helicoidais com pastilhas de metal-duro e brocas de insertos reversíveis e brocas ocas, entre outras [2, 12]. A broca helicoidal é a ferramenta mais utilizada para a produção de furos [2]. No Brasil, mais da metade das operações de furação ainda são realizadas com brocas helicoidais de aço-rápido com ou sem camada de revestimento [4].

### 2.2.1 Tipos de brocas

Em função das características da furação (diâmetro do furo, profundidade, tolerâncias de forma, medidas e volume de produção), podem ser empregados diferentes tipos de brocas, como mostra a **Figura 2.2** [2, 6].

a) **Bocas chatas:** são as ferramentas de furação mais antigas. São fabricadas através do achatamento a quente de uma parte de uma barra cilíndrica. As brocas chatas têm aplicação semelhante às brocas escalonadas ou brocas de lâmina para furações pouco profundas em materiais frágeis, como ferro fundido, bronze e latão. As brocas chatas só suportam momentos torçores muito limitados e a remoção de cavacos, crítica em furos mais profundos, é deficiente. Estes fatores limitam muito seu emprego.



**Figura 2.2** – Tipos de brocas para furação curta [2]

**b) Brocas helicoidais:** as brocas helicoidais são projetadas para furação em cheio e para peças com pré-furos. São classificadas de acordo com o tipo de material do qual são fabricadas, forma da haste, número de canais, sentido de corte, comprimento, diâmetro e afiação da ponta.

**c) Brocas helicoidais com pastilhas de metal-duro:** são ferramentas utilizadas na execução de furos em materiais muito abrasivos, tais como: concreto, cerâmica e não-metálicos, numerosos tipos de plásticos, metais leves com ligas de silício e ferros fundidos duros.

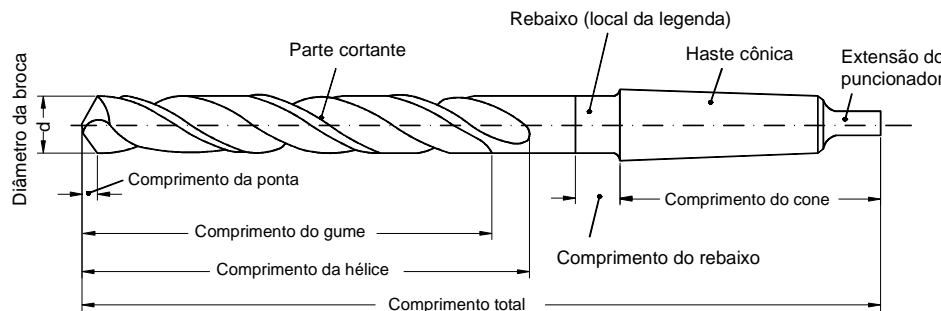
**d) Brocas escalonadas:** são brocas que possuem dois ou mais diâmetros retificados em bocas padronizadas sendo indicadas para a produção seriada em tornos automáticos na execução de furos com dois ou mais diâmetros diferentes, ou para combinar operações de furação, alargamento ou chanframento.

e) **Brocas de centro:** são usadas para marcar o centro dos furos, especialmente em peças que deverão ser usinadas entre pontas, em operações de precisão ou em furação profunda.

f) **Brocas com pastilhas reversíveis:** são empregadas na furação curta. Neste tipo de ferramenta, há eliminação do gume transversal devido ao posicionamento dos gumes de corte, o que permite um corte da peça até o eixo da ferramenta.

## 2.2.2 Geometria das brocas helicoidais

De modo simplificado, uma broca helicoidal é composta de uma haste e uma parte cortante, conforme mostra a **Figura 2.3**. Só uma análise mais detalhada é capaz de revelar a complexidade geométrica de uma broca, principalmente em sua ponta.



**Figura 2.3** – Broca helicoidal com haste cônica segundo DIN 1412 [6]

A **Figura 2.4** mostra, de forma simplificada, a geometria da parte cortante de uma broca helicoidal. Segundo a definição, os gumes principais se mostram no sentido do avanço. Assim, o gume transversal se torna uma parte integrante do gume principal, mesmo que, em decorrência do ângulo de saída negativo, praticamente não apresente um corte e sim deforme o material plasticamente e o extrude na direção das parcelas cortantes do gume principal.

A forma e o ângulo de hélice da broca definem o ângulo de saída  $\gamma$ , que não é constante ao longo do gume principal, mas apresenta o seu valor máximo na quina da broca e diminui no sentido de centro desta, tornando-se negativo na passagem para o gume transversal.



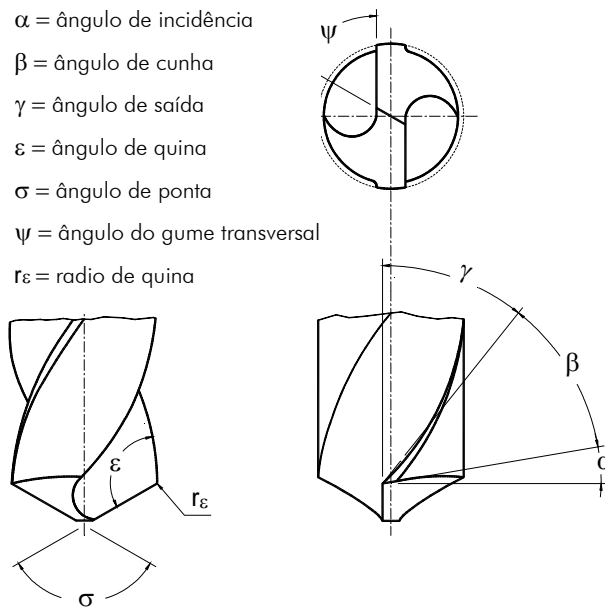


Figura 2.4 – Geometria na cunha de uma broca helicoidal [13]

### 2.2.3 Influências da geometria no desempenho da ferramenta

O desempenho de uma ferramenta de corte é diretamente influenciado pela sua geometria.

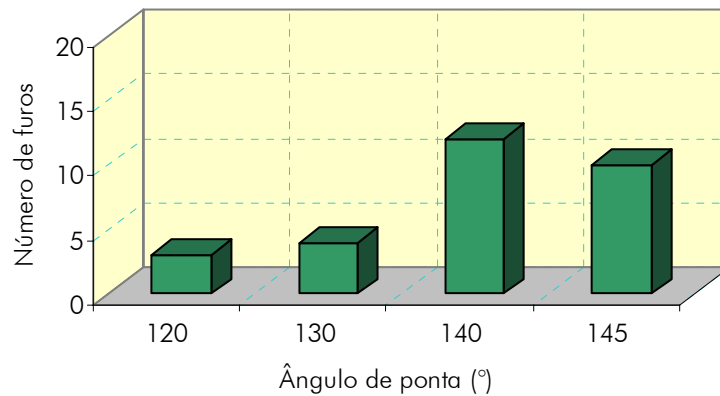
a) O **ângulo de ponta  $\sigma$**  em brocas tem as seguintes funções e vantagens [2]:

- Diminui a espessura do cavaco e aumenta o comprimento atuante do gume;
- Com o aumento do ângulo de ponta conseqüentemente aumenta o ângulo de quina  $\varepsilon$ , elevando sua resistência mecânica e a dissipação do calor;
- É responsável pelas forças passivas que ajudam a eliminar eventuais vibrações;
- Influi na direção da saída do cavaco.

Com o aumento do ângulo de ponta da broca, a espessura do cavaco, para um mesmo avanço  $f$ , diminui. O emprego de um ângulo de ponta menor faz com que o cavaco seja mais fino e mais largo. Para o caso de alguns materiais de difícil usinabilidade, o cavaco mais grosso é mais vantajoso, pelo fato de fazer contato na face, num ponto mais afastado do gume.

Um grande ângulo de ponta permite, usualmente, o aumento do avanço. Isto possibilita uma substancial redução no tempo de usinagem. Com o aumento do ângulo de ponta a centragem da ferramenta e o momento torçor tendem a diminuir [14].

A **Figura 2.5** mostra a influência do ângulo de ponta sobre a vida da ferramenta na furação de uma liga de titânio com broca de metal-duro revestida. Observa-se claramente nesse caso que o ângulo de ponta de melhor desempenho de vida é o de 140°.



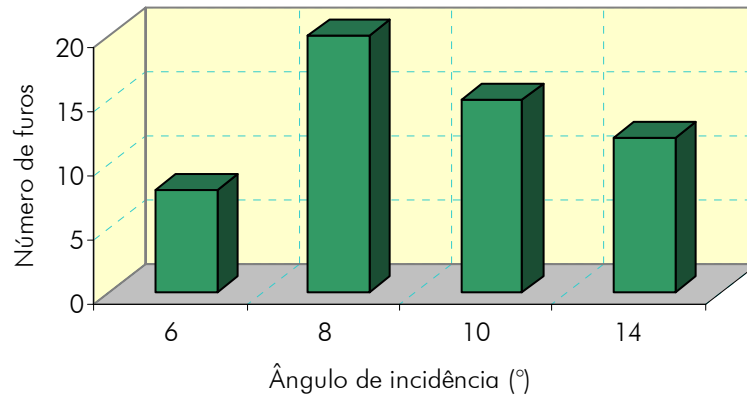
**Figura 2.5** – Influência do ângulo de ponta na vida da ferramenta na usinagem de uma liga de titânio com broca helicoidal de metal-duro revestida [15]

b) **O ângulo de incidência  $\alpha$ :** tem como função principal evitar o atrito entre a superfície de corte e o flanco da ferramenta e permitir que o gume penetre no material e o corte livremente. Se o ângulo de incidência é muito pequeno, o gume não pode penetrar convenientemente no material e a ferramenta cega rapidamente. Assim, ocorre forte atrito com a peça, superaquecimento da ferramenta e mau acabamento superficial. Se o ângulo de incidência é demasiadamente grande, o gume quebra ou pode sofrer pequenos lascamentos em virtude do apoio deficiente. A grandeza do ângulo de incidência depende principalmente dos seguintes fatores [2]:

- Resistência do material da ferramenta;
- Resistência e dureza do material da peça a ser usinada.

Usualmente, se o material da ferramenta apresenta alta tenacidade, pode-se usar ângulos de incidência grandes, sem perigo de quebras. Assim, podem ser usados ângulos maiores em ferramentas de aço-rápido do que em ferramentas de metal-duro, devido à maior resistência e tenacidade do aço. Já a usinagem de materiais moles como o alumínio, permite usar ângulos bem maiores do que a usinagem de materiais duros como o aço.

Na furação de titânio com brocas helicoidais revestidas com TiAlN, Chen (2003) realizou testes com diferentes ângulos de incidência, referenciando a influência deste sobre a vida da ferramenta (**Figura 2.6**).



**Figura 2.6** – Influência do ângulo de incidência sobre a vida da ferramenta na usinagem de uma liga de titânio com broca helicoidal de metal-duro revestida [15]

c) **O ângulo de saída do cavaco  $\gamma$ :** é o ângulo entre a superfície de saída e o plano de referência, medido no plano de medida da cunha cortante [16]. Maiores avanços provocam cortes mais pesados, exigindo menores ângulos de saída. Quanto menor o avanço, maior pode ser o ângulo de saída [2].

Para avanços muito pequenos, normalmente ocorre o contrário, pelas seguintes razões:

- Com avanços pequenos, a zona de pressão se situa muito próxima ao gume, fazendo com que este sofra maior aquecimento e desgaste;
- Ângulos de saída pequenos resultam num melhor acabamento.

Ângulos de saída negativos são empregados em ferramentas de metal-duro no corte de materiais de difícil usinabilidade e em cortes interrompidos, como no fresamento. O principal objetivo do ângulo de saída negativo é fazer com que a solicitação da ferramenta, perto do gume, seja quase que exclusivamente de compressão. As desvantagens do ângulo de saída negativo são: menor qualidade da superfície usinada, necessidade de maior força e potência de usinagem e maior calor gerado na ferramenta.

#### 2.2.4 Tipos de afiações

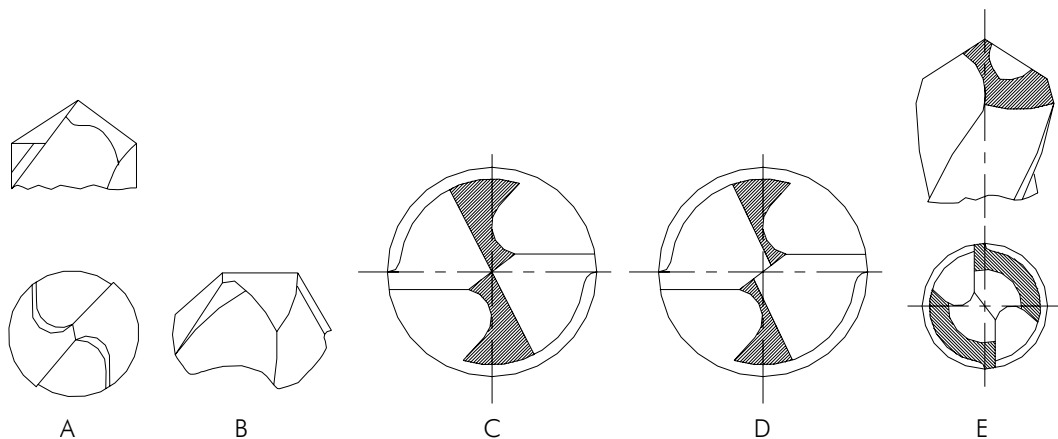
Vários tipos de afiações, hoje em dia utilizados também em brocas retas de metal-duro, são mostradas a seguir [2]:

a) **Diminuição do gume transversal:** para reduzir a força de avanço, retifica-se uma reentrância na ponta da broca, reduzindo o gume transversal como mostra a **Figura 2.7 A**.

b) **Correção do ângulo de saída com diminuição do gume transversal:** como mostra a **Figura 2.7 B**, retifica-se um chanfro que simultaneamente corrige o ângulo de saída da broca, no centro e afina o gume principal, melhorando as condições de corte.

c) **Afiação cruzada:** consiste em retificar um plano inclinado nos flancos da ferramenta, eliminando total ou parcialmente o gume transversal (**Figura 2.7 C e D**). Em lugar do gume transversal, formam-se dois novos gumes principais, que fazem um ângulo menor que  $90^\circ$  com o eixo principal, provocando um efeito centrante na broca. Este tipo de afiação é principalmente utilizado em brocas para furos profundos.

d) **Afiação na região da quina:** como mostra a **Figura 2.7 E**, além da ponta principal, com um ângulo de  $118^\circ$ , retifica-se uma segunda ponta, com ângulo de  $80$  a  $90^\circ$ . Este tipo de afiação tem dado bom resultado na furação de peças de ferro fundido cinzento. O objetivo da ponta secundária é de reduzir o super-aquecimento na parte mais externa dos gumes, onde a velocidade de corte é máxima.



**Figura 2.7** – Tipos de afiações especiais de brocas [2]

### 2.3 Furação Profunda

Os processos de furação com relações de profundidade do furo e diâmetro da ferramenta maiores do que cinco ( $L/D > 5$ ), são denominados de processos de furação profunda [3, 4, 6].

A furação profunda é uma operação de usinagem complexa, na qual a qualidade dos furos é fortemente influenciada pela alimentação do fluido de corte sob pressão diretamente para as regiões de corte. Isso ocorre porque o fluido de corte é o único responsável pelo transporte de cavacos. Assim, a furação profunda exige condições especiais para ser executada.

Este processo pode ser realizado utilizando-se brocas helicoidais com ciclos de reversão do avanço da furação para esvaziar os canais de saída de cavacos. Esses ciclos de furação são denominados de “pica-pau”. É possível executar a furação profunda com um único ciclo de avanço empregando brocas especiais, como brocas canhão, brocas BTA e brocas ejector [3, 7, 8].

A importância deste processo está na sua grande utilização, pois uma ampla gama de componentes mecânicos como por exemplo virabrequins, cilindros hidráulicos, elementos de motores a diesel, turbinas, trocadores de calor etc., requerem de furos profundos para na sua fabricação [10].

### 2.3.1 Brocas para furação profunda

a) **Brocas canhão (Figura 2.8)**: normalmente são dotadas de pastilhas de metal-duro em sua parte cortante e conseguem realizar furos compridos ( $L/D$  até 125) com qualidade IT 9. No processo de gume único, como também é chamada a furação com broca canhão, a característica específica e a vantagem principal é que nessa ferramenta, a alimentação do fluido de corte é feita através da sua haste oca e o transporte de cavaco ocorre pelo canal em forma de V, na periferia da ferramenta. O diâmetro típico das brocas canhão está situado na faixa de 1 a 32 mm. A seção transversal para os canais de alimentação do fluido de corte para brocas de diâmetros inferiores a 1 mm são tão pequenos que não podem mais realizar a sua função. O limite superior para ferramentas de furação profunda de gume único é estabelecido pelo fato de outros processos, como o BTA, serem mais econômicos e adequados [6].

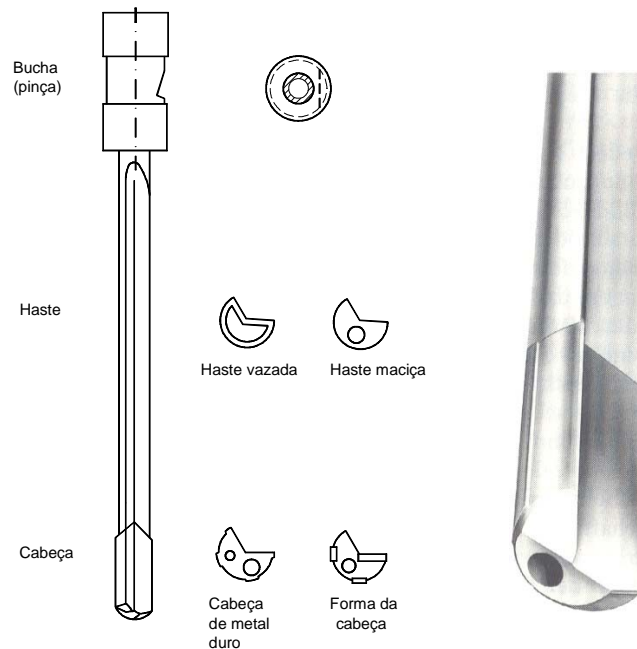


Figura 2.8 – Broca canhão [6]

b) **Brocas BTA (Figura 2.9):** esta ferramenta foi desenvolvida pela Boring and Trepanning Association, BTA. Este processo se caracteriza por uma broca de gume único com alimentação do fluido de corte através da área anelar em torno da ferramenta. O retorno do fluido ocorre em conjunto com os cavacos subindo pela boca de cavacos através do tubo central, que deve ter diâmetro mínimo de 6 mm (Figura 2.9). O limite superior para furação em cheio pelo sistema BTA está na ordem de 300 mm e para ferramentas de alargamento de furo na ordem de 1000 mm, onde estes limites basicamente são definidos pela potência instalada da máquina-ferramenta [6].

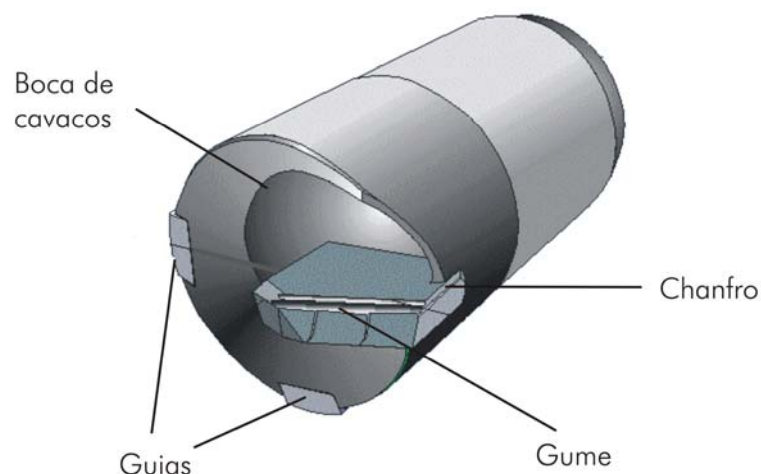


Figura 2.9 – Cabeçote de furar BTA [6]

c) **Brocas "Ejector" (Figura 2.10):** para permitir a furação profunda em máquinas-ferramentas não desenvolvidas especificamente para o processo em questão,

desenvolveu-se a broca “Ejector”, que é uma patente da empresa SANDVIK e sua cabeça é semelhante à da broca BTA. Difere desta somente pelo sistema de retirada do cavaco. O sistema de condução do fluido de corte sob pressão até a região de corte é constituído de dois tubos concêntricos. Na broca Ejector, o tubo interno possui alguns furos em sua parede que permitem que parte do óleo que está a caminho da cabeça da broca pelo tubo externo, retorne pelo interno, gerando uma pressão negativa nesse tubo que ajuda na retirada do cavaco. Sua aplicação e qualidade do furo obtido são similares às da broca BTA [4].

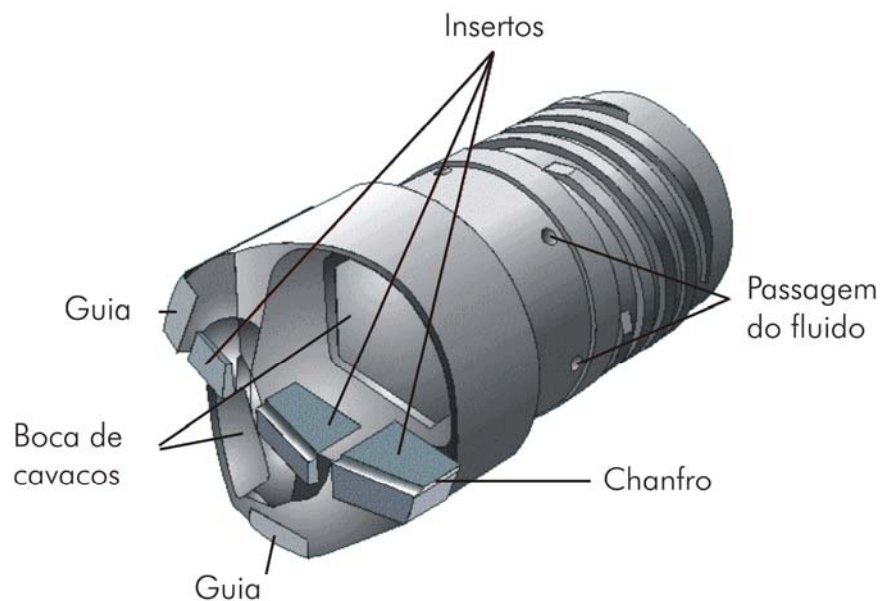


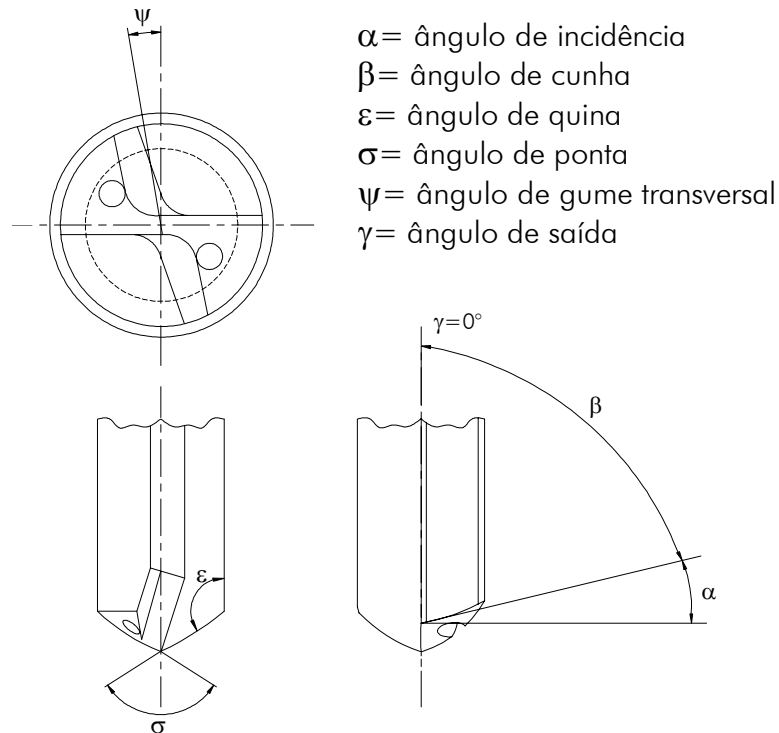
Figura 2.10 – Cabeçote “Ejector” [5]

d) **Brocas de canais retos (Figura 2.11):** são projetadas para furação em cheio e caracterizam-se por uma boa resistência à torção. As brocas de canais retos são utilizadas principalmente para furação profunda de ferros fundidos do tipo GG, GGG e ligas de alumínio AlSi, sendo seu uso limitado a furos de 15D de comprimento [2, 17].



Figura 2.11 – Broca de canais retos [18]

As brocas de canais retos possuem uma geometria característica, com algumas variações em relação às brocas helicoidais. A geometria de uma broca de canal reto é resumida na **Figura 2.12**.



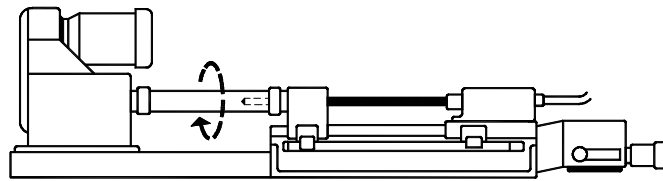
**Figura 2.12** – Geometria de uma broca de canais retos [18]

### 2.3.2 Máquinas utilizadas em furação profunda

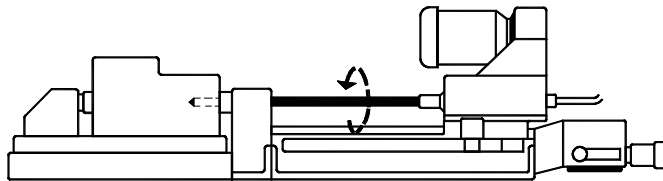
Devido às particularidades do processo, em linhas de produção são utilizadas máquinas dedicadas, que cumprem os requisitos de estabilidade, precisão e dispõem de sistemas de injeção de fluido a alta pressão. Quanto às concepções de máquinas-ferramentas para furação profunda, as configurações básicas podem ser observadas na **Figura 2.13**. Nessas máquinas, de acordo com a forma de trabalho, é visível que o movimento principal pode ser executado pela ferramenta e ou pela peça, bem como por ambas as partes.

Para ferramentas rotativas e peças paradas, a máquina pode ser empregada para uma ampla variedade de peças. As máquinas que são construídas com dispositivos de carga e eventualmente com vários fusos são mais adequadas para a produção de grandes séries.

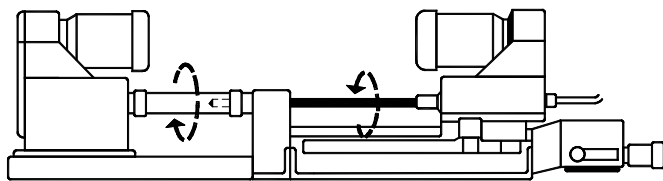




Processo: Peça rotativa e ferramenta parada



Processo: Ferramenta rotativa - Peça parada



Processo: Rotação da ferramenta - Rotação contrária da peça

Figura 2.13 – Concepções básicas de máquinas para a furação profunda [6]

No processo com peças rotativas, só podem ser empregadas peças com simetria de rotação e com pequena massa, já que um pequeno desbalanceamento da peça rotativa pode levar a resultados não adequados na furação.

## 2.4 Grandezas de Corte

As grandezas de corte no processo de furação são aquelas que devem ser ajustadas na máquina, direta ou indiretamente, para a retirada do cavaco.

### 2.4.1 Avanço ( $f$ )

O avanço ( $f$ ) é o percurso linear por revolução, numa direção paralela ou coincidente com o eixo do furo [16]. O crescimento do avanço facilita a quebra e, conseqüentemente, a remoção do cavaco de dentro do furo. Existe um limite para o crescimento do avanço determinado pelas características da máquina e a resistência estrutural da ferramenta. Acima de um valor determinado, o avanço pode causar a quebra da broca ou a paralisação do avanço da máquina [4, 9].

### 2.4.2 Profundidade de corte ( $a_p$ )

A profundidade de corte ( $a_p$ ) é a profundidade de penetração do gume principal, medida perpendicularmente ao plano de trabalho. Na furação em cheio, corresponde à metade do diâmetro da broca (**Figura 2.14**) [4].

### 2.4.3 Velocidade de corte ( $v_c$ )

A velocidade de corte ( $v_c$ ) é a velocidade instantânea no ponto de referência do gume cortante, segundo uma direção e sentido de corte. A velocidade de corte está relacionada diretamente com o diâmetro do furo e com a rotação da ferramenta (**Equação 2.1**), e mantém uma dependência direta com a vida da ferramenta, material usinado, tempo de usinagem, acabamento superficial e a potência consumida pela máquina-ferramenta [2].

Em velocidades de corte elevadas o atrito faz com que o gume ultrapasse a temperatura admitida pelo material da ferramenta, ocasionando uma perda da capacidade de corte [12].

$$v_c = \frac{\pi d n}{1000} \quad (\text{m/min}) \quad (2.1)$$

Onde:  $d$  = diâmetro da broca [mm];  
 $n$  = rotações por minuto [rpm].

### 2.4.4 Largura de usinagem ( $b$ )

A largura de usinagem ( $b$ ) é a largura de cavaco a ser retirado, medida na superfície de corte, segundo a direção normal à direção de corte (**Figura 2.14**). É medida na intersecção da superfície de corte com o plano normal à velocidade de corte, passando pelo ponto de referência do gume (**Equação 2.2**) [16].

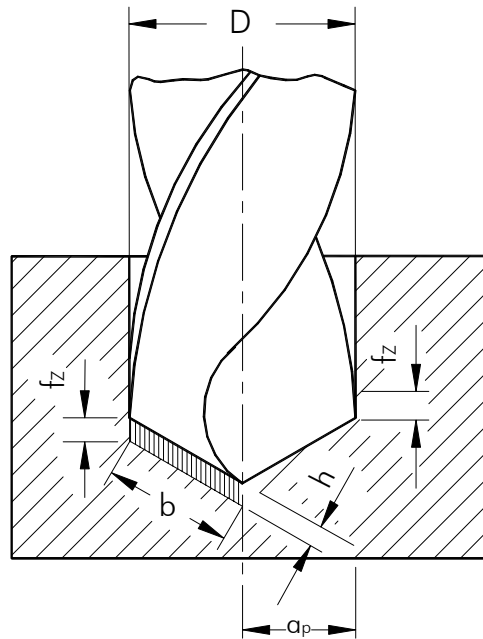


Figura 2.14 – Largura e profundidade de corte na furação [2]

$$b = \frac{D}{2 \cdot \text{sen}\left(\frac{\sigma}{2}\right)} \quad (2.2)$$

Onde:  $D$  = diâmetro da ferramenta [mm];  
 $\sigma$  = ângulo da ponta da ferramenta [graus].

#### 2.4.5 Espessura de usinagem (h)

A espessura de usinagem é proporcional ao avanço e é medida perpendicularmente ao gume e está definida pela **Equação 2.3**.

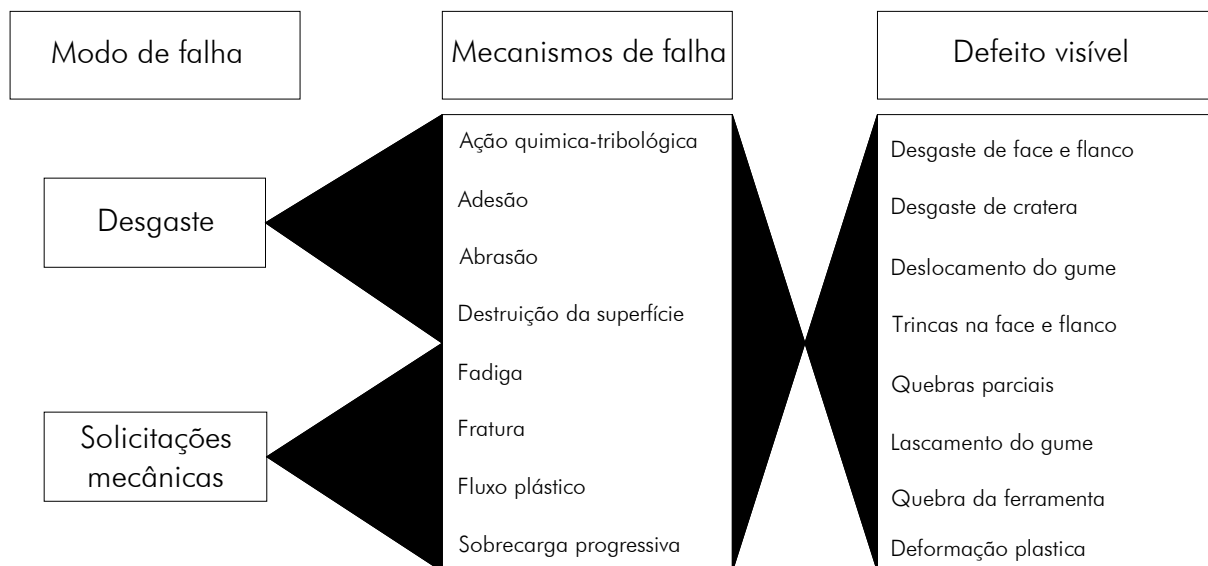
$$h = \frac{f}{2} \cdot \text{sen}\left(\frac{\sigma}{2}\right) \quad (2.3)$$

Onde:  $\sigma$  = ângulo da ponta da ferramenta [graus];  
 $f$  = avanço da ferramenta [mm].

## 2.5 Desgaste de Ferramentas

### 2.5.1 Mecanismos de desgaste

Solicitações mecânicas, térmicas e tribológicas decorrentes dos processos de usinagem levam a desgastes e sobrecargas mecânicas e térmicas dos gumes de ferramentas de corte. A **Figura 2.15** mostra os mecanismos de falha que podem resultar em sinais típicos de desgaste, *e.g.*, desgaste de cratera, de flanco, lascamentos de várias dimensões ou deformações plásticas. Os diversos mecanismos de desgaste agem simultaneamente, de forma que tanto sua causa como seu efeito dificilmente podem ser distinguidos entre si, resultando em uma complexa interação de vários fatores de desgaste [6, 19].



**Figura 2.15** – Falhas em ferramentas de corte [19]

O desgaste pode ser definido como a perda gradual de material pela ação mútua entre o cavaco e a ferramenta e entre a peça e a ferramenta, decorrente das solicitações mecânicas, térmicas e químicas [20]. As principais causas influentes sobre o desgaste da ferramenta estão relacionados na **Figura 2.16** [6, 20, 21]:

- Danificação do gume devido às solicitações mecânicas e térmicas excessivas;
- Abrasão mecânica;
- Adesão;
- Difusão;
- Oxidação.

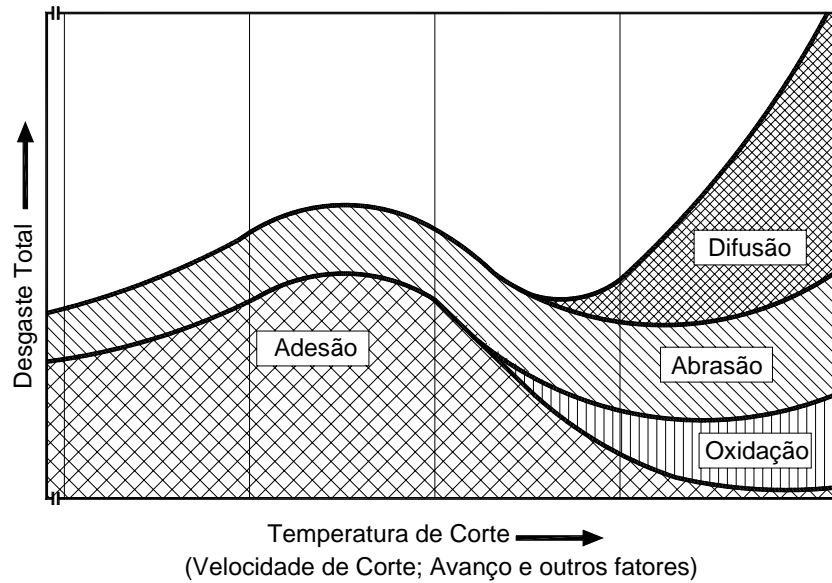


Figura 2.16 – Causas de desgaste na usinagem [6]

a) **Solicitações térmicas e mecânicas excessivas:** durante a entrada da ferramenta na peça, o gume atinge rapidamente elevadas temperaturas. Após a saída, ocorre o resfriamento. A diferença entre a mais alta e a mais baixa temperatura depende do material, das solicitações de corte e da relação entre o material e o ar. A aplicação de meios lubri-refrigerantes em cortes interrompidos é de grande importância, devido à grande diferença de temperaturas e a capacidade de resfriamento. A combinação destes fenômenos pode levar à formação de fissuras (Figura 2.17), principalmente em ferramentas pouco tenazes [2, 6, 16, 21].

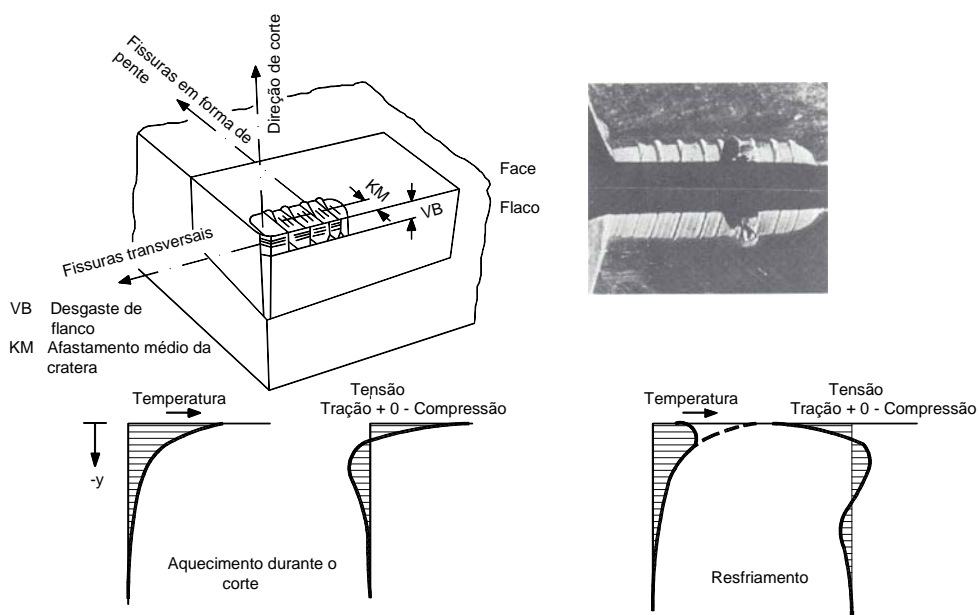


Figura 2.17 – Formação de fissuras no fresamento [6]

b) **Abrasão mecânica:** é o arrancamento de finas partículas de material, como conseqüência do atrito sob alta pressão e temperatura entre a peça e a ferramenta. Esta forma de desgaste se torna mais intensa com o aumento no número de inclusões e partículas duras no material usinado, *e.g.*, carbonetos e óxidos. A presença de carbonetos em peças de ferro fundido ou de partículas de areia, provenientes do molde de fundição, são especialmente nocivas para a vida da ferramenta. A resistência à abrasão depende essencialmente da dureza da ferramenta e do material da peça. O incremento da velocidade de corte resulta num aumento considerável da velocidade de desgaste, em virtude da diminuição na resistência da ferramenta à abrasão em temperaturas de trabalho mais altas [2].

c) **Adesão:** este mecanismo de desgaste ocorre devido à ruptura dos microcaldeamentos na face da ferramenta. Os caldeamentos formam-se devido à ação de forças elevadas ou devido à interação das superfícies inferiores do cavaco e face da ferramenta que, por estarem relativamente livres de óxidos, soldam-se por adesão. A resistência das soldagens por adesão é tanto maior quanto maior for a deformação. A prova que essas aderências podem se formar é o gume postiço, formado por partículas que se soldam na face da ferramenta e apresentam um elevado grau de deformação a frio, isto é, estão encruadas, duras e resistentes [2, 6, 16, 20, 21].

Na **Figura 2.18** tem-se a representação da curva de desgaste em relação à velocidade de corte (curva  $VB \times v_c$ ) no torneamento. Como se pode ver, o desgaste de flanco aumenta com o aumento da velocidade de corte. No entanto, não como uma função contínua e sim com dois valores extremos característicos. O desgaste atinge inicialmente um máximo na velocidade onde a formação do gume postiço tem sua maior intensidade. Um desgaste mínimo ocorre na velocidade onde não se tem mais formação do gume postiço [6].

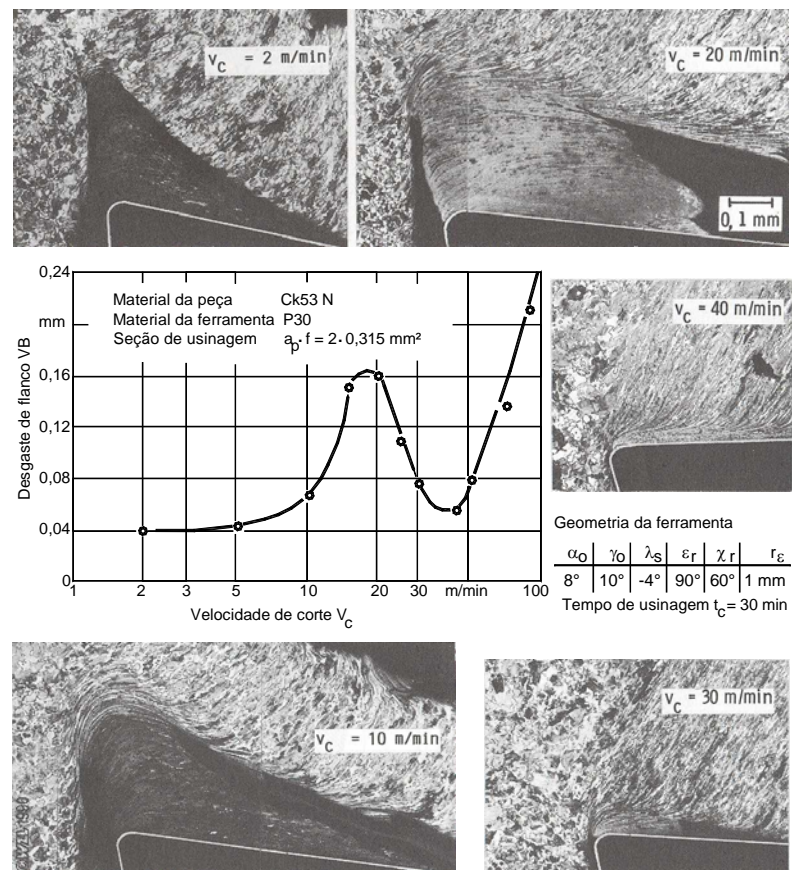


Figura 2.18 – Desgaste abrasivo devido à formação de gume postiço [6]

c) **Difusão:** o desgaste de difusão ocorre a temperaturas elevadas quando a ferramenta e o material possuem elementos com afinidade química. Este fenômeno depende da temperatura na interface peça e ferramenta, da afinidade química entre os materiais e do tempo de contato [2, 19, 20]. Para ferramentas de aço-rápido esta forma de desgaste não é significativa, pois a faixa de temperaturas de difusão é bem mais alta que a temperatura de amolecimento do material da ferramenta. Diferente é a situação em ferramentas de metal-duro na usinagem do aço a temperaturas na faixa de 700 a 1.300°C, onde a difusão ocorre formando geralmente uma cratera na face da ferramenta. Como mostra a **Figura 2.19**, neste caso, podem ocorrer os seguintes fenômenos [6, 16, 20, 21, 22]:

- Difusão do ferro no ligante de cobalto;
- Difusão do cobalto no aço, onde ferro e cobalto podem mutuamente e integralmente se dissolver formando cristais mistos;
- Difusão do carbono no aço;
- Dissolução do carboneto de tungstênio, formando cristais mistos.

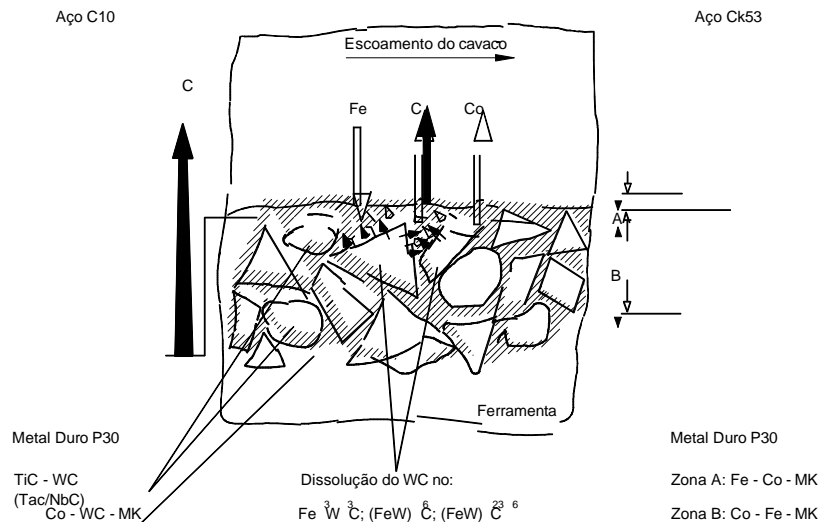


Figura 2.19 – Modelo de desgaste por difusão [6]

e) **Oxidação:** a oxidação ocorre a altas temperaturas, quando compostos químicos são formados por reações entre a peça e a ferramenta (ou com outros materiais tais como oxigênio do ar ou enxofre e cloro do fluido de corte), resultando numa película de óxido, que pode ser causa de desgaste (Figura 2.20).

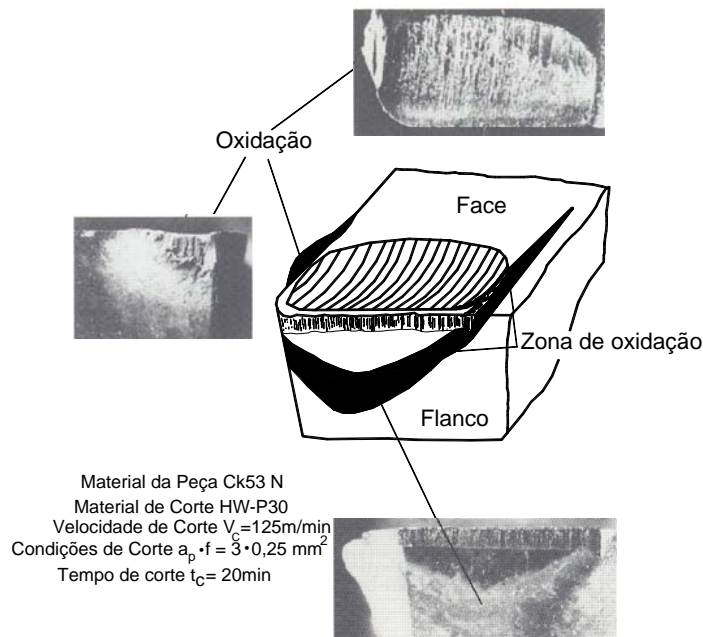


Figura 2.20 – Zonas de oxidação em ferramenta de torneamento de metal-duro [6]

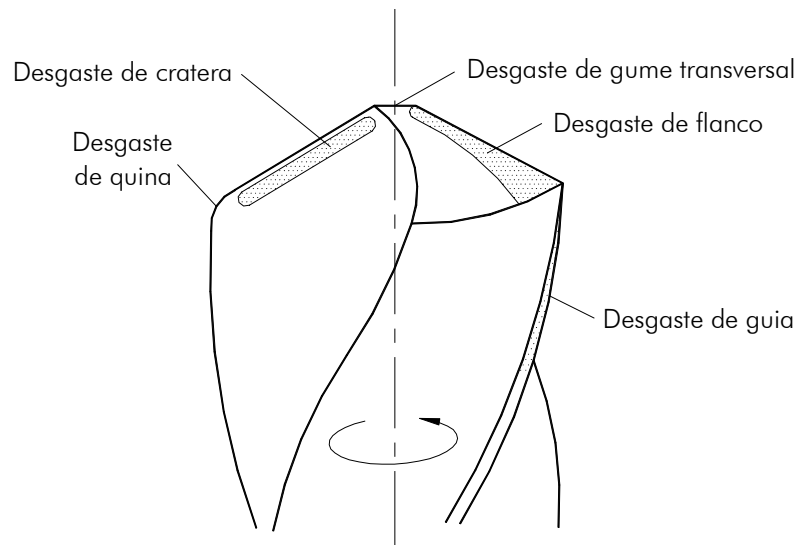
A oxidação freqüentemente é responsável pela deterioração do gume secundário de corte, fazendo com que piore rapidamente a qualidade da superfície das peças usinadas e, portanto, a vida das ferramentas. Os aços-rápidos só formam camadas de óxido a temperaturas bem maiores que a temperatura de amolecimento da ferramenta. O metal-duro já inicia sua oxidação na faixa de temperatura de 700 a 800°C, sendo que os metais-duros compostos exclusivamente de carboneto de tungstênio e cobalto oxidam



mais facilmente do que aquelas ferramentas com adição de carboneto de titânio e outros carbonetos [2, 6, 16, 21, 23].

### 2.5.2 Formas de desgaste em brocas

Em furação, os desgastes usualmente mensurados são o de flanco e o de cratera (na face), sendo utilizados como critério de fim de vida de uma ferramenta [13, 24]. O desgaste pode ocorrer no gume transversal, na quina e nas guias laterais, conforme mostrado na **Figura 2.21**.



**Figura 2.21** – Desgaste de uma broca helicoidal [6, 24]

Kanai *et al.* (1978) realizou testes de desempenho de brocas na usinagem de aço carbono S45C, onde quantificou e avaliou sete tipos diferentes de desgaste (**Figura 2.22**) em brocas helicoidais,:

- Desgaste de quina,  $W$ ;
- Desgaste de flanco médio,  $VB$ ;
- Desgaste de flanco máximo,  $VB_{max}$ ;
- Desgaste de guia lateral,  $M_w$ ;
- Desgaste de cratera,  $K_w$ ;
- Desgaste no gume transversal medido em relação ao gume de corte (altura),  $C_{,,}$  e desgaste no gume transversal medido em relação ao gume de corte (largura),  $C_{m,i}$ ;
- Altura ( $P_t$ ) e largura ( $P_m$ ) do lascamento

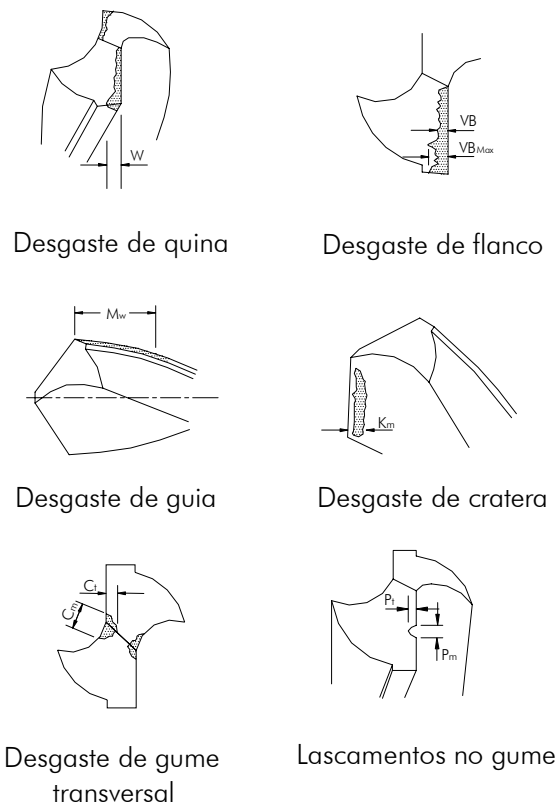


Figura 2.22 – Tipos de desgaste em brocas [25]

Uma das zonas mais críticas da broca é a zona do gume transversal, onde ocorrem danos a partir do primeiro contato com o material a usinar. As grandes solicitações mecânicas, ao mesmo tempo em que as velocidades de corte nesse ponto tendem a zero, levam a um desgaste progressivo pelo esmagamento do material. Estes esforços podem causar lascamentos e conseqüente destruição do gume transversal, podendo provocar caldeamento da ferramenta e quebra da mesma (Figura 2.23).

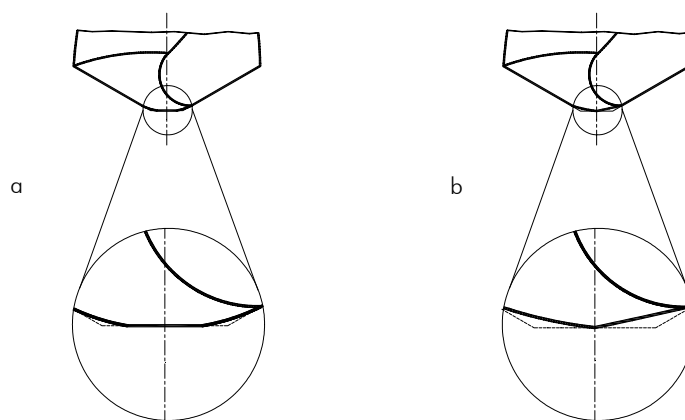
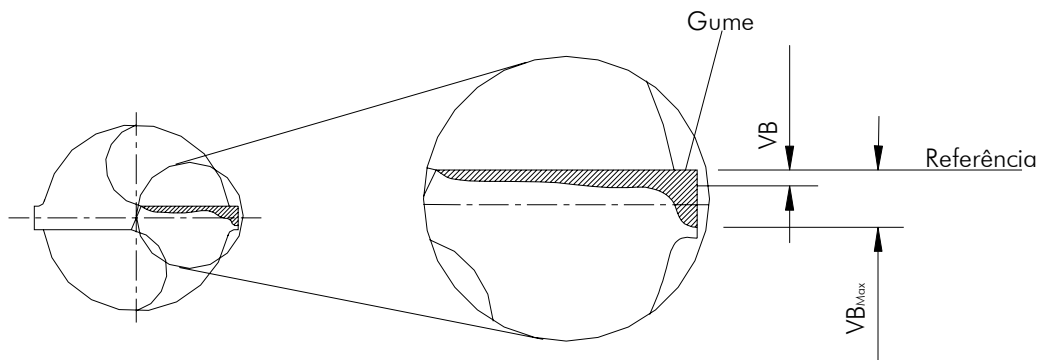


Figura 2.23 – a) Desgaste do gume transversal; b) Arredondamento do gume transversal [13]

Nas quinas predominam as solicitações térmicas devidas à maior velocidade de corte, ao corte dos gumes principais e ao calor gerado pelo atrito dos cavacos contra a superfície de saída, assim como o atrito das guias da ferramenta contra a parede do furo [13].

A **Figura 2.24** mostra em detalhe o desgaste médio  $VB$  e o máximo  $VB_{max}$  nos flancos de uma broca. A medição pode 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 necessária a utilização de uma referência.



**Figura 2.24** – Desgaste de flanco em brocas helicoidais [13]

## 2.6 Critérios de Fim de Vida

Define-se vida de uma ferramenta o tempo que a mesma trabalha efetivamente (deduzidos os tempos passivos), até perder a sua capacidade de corte, dentro de um critério previamente estabelecido [16]. À medida que a ferramenta vai se desgastando, observam-se variações no processo de usinagem. A temperatura se eleva progressivamente, a força de corte e a potência consumida aumentam, as dimensões da superfície se alteram e o acabamento da superfície piora. Em ferramentas de metal-duro, por exemplo, o aumento das forças de corte, no caso de um desgaste excessivo, provoca o lascamento e destruição total do gume. A utilização de uma ferramenta até este ponto é desaconselhável, pois será necessário um longo trabalho de reafiação com remoção de uma extensa camada de material, antes que se possa restabelecer um gume adequado. Infelizmente, não existe uma única relação entre o desgaste da ferramenta, a qualidade e

as dimensões da superfície usinada. Tentar medir o desgaste da ferramenta incrementaria os tempos não-produtivos. Por este motivo, em grandes produções industriais, como consequência das dificuldades de medição e interpretação dos desgastes, simplesmente é adotado como critério de fim de vida o número de peças usinadas por ferramenta. Tal número é calculado cuidadosamente através de um teste inicial e deve ser empregado um fator de segurança, o que leva a custos adicionais de usinagem [2, 21].

Em laboratórios, o critério mais utilizado é o desgaste, devido à facilidade de ser quantificado. O desgaste de flanco é frequentemente utilizado como critério de fim de vida pela sua influência direta com a rugosidade da superfície do material usinado e as dimensões da peça.

A escolha dos critérios de fim de vida depende de vários fatores, tais com exigências da usinagem, material da ferramenta, processo etc., sendo os mais comuns [2, 16, 20, 21].

- Falha completa da ferramenta;
- Falha preliminar da ferramenta;
- Largura da marca de desgaste no flanco  $VB_{max}$ ;
- Vibrações intensas da peça ou da ferramenta;
- Profundidade da cratera KT;
- Deficiência no acabamento da superfície;
- Formação de rebarbas;
- Variação na forma dos cavacos;
- Alteração das dimensões da peça;
- Força de corte, torque ou potência;
- Aumento da força de avanço;
- Aumento da temperatura do gume;
- Número de peças usinadas.

## 2.7 Materiais de Ferramentas para a Furação

As brocas geralmente trabalham sob condições severas de temperatura e atrito e por isso precisam ser fabricadas com materiais altamente resistentes a estas condições. Os principais materiais para ferramentas que satisfazem essas exigências são o aço-rápido e o metal-duro, que podem ser revestidos para melhorar suas características de corte [26].

### 2.7.1 Aço-rápido

O aço-rápido é um aço ferramenta de alta liga. Os aços-rápidos contêm carbono, tungstênio, cromo, vanádio, molibdênio, cobalto e ferro em teores que podem variar segundo as propriedades que se deseje nas ferramentas.

Este material é tenaz, apresenta elevada resistência ao desgaste e elevada dureza a quente (se comparados com os aços carbono usados para ferramentas), podendo ser utilizado até temperaturas de corte da ordem de 600°C. A estrutura metalográfica do aço-rápido no estado temperado é a martensítica básica, com carbonetos incrustados [2, 4].

Uma das desvantagens do aço-rápido é o tratamento térmico complexo, exigindo temperaturas em torno de 1.300°C para a têmpera [2].

Atualmente, as brocas de aço-rápido são amplamente utilizadas na indústria. Elas podem receber tratamentos superficiais, com o objetivo de melhorar seu desempenho, como por exemplo: revestimento a vapor, nitretação, oxidação negra, niquelagem, revestimento de nitreto de titânio e carbonitreto de titânio, entre outros [5, 6, 22, 27, 30].

### 2.7.2 Metal-duro

O metal-duro é um importante material comumente utilizado na indústria atual em fabricação de ferramentas de corte. Este material conjuga dureza à temperatura ambiente e dureza a quente, resistência ao desgaste e tenacidade, combinação possível de se obter pela variação de sua composição.

Basicamente, o metal-duro é obtido a partir de um ligante metálico dúctil, habitualmente cobalto ou níquel, e de carbonetos (W, Ti, Ta, Nb) embutidos no ligante através da metalurgia do pó [2, 6].

Os materiais de corte de metal-duro podem ser divididos em três grupos sendo metais duros com base de [6]: WC-Co; WC-(Ti, Ta, Nb)C-Co e TiC/TiN-Co, Ni.

a) **WC-Co:** os metais duros desse grupo são constituídos principalmente de carboneto de tungstênio, fase ligante de cobalto e possuem apenas pequenas quantidades (menor que 2,5%) de TiC, TaC e NbC. Os metais duros WC-Co caracterizam-se por uma alta resistência à compressão. Em razão da grande tendência à difusão do carboneto de tungstênio não são aconselháveis para a usinagem de materiais

de aço mole. São utilizados em materiais de cavaco curto, materiais fundidos, materiais não-ferrosos e não- metálicos, e materiais resistentes ao calor assim como em usinagem de pedra e madeira.

b) **WC-(Ti, Ta, Nb)C-Co**: os metais duros desse grupo contêm, além do carboneto de tungstênio, também carboneto de titânio, carboneto de tântalo e carboneto de nióbio. Comparados com os metais duros WC-Co possuem melhores propriedades sob altas temperaturas. Isso vale principalmente para dureza a quente, ou seja, resistência ao calor, resistência à oxidação e resistência à difusão com materiais ferrosos. O principal campo de aplicação é a usinagem de materiais de aço com cavacos longos.

c) **TiC/TiN-Co, Ni (Cermets)**: para este tipo de metal-duro foi estabelecida a denominação de "*Cermets*". São materiais que recebem este nome devido a sua composição de uma fase metálica ligante e uma ou mais fases cerâmicas. Os *Cermets* se compõem de uma base de carboneto de titânio e nitreto de titânio com a fase ligante Ni, Co. Os *Cermets* atuais são complexos sistemas de múltiplos materiais que podem conter outros elementos como tungstênio, tântalo, nióbio, molibdênio ou carbonetos complexos dos quais se formam fases intermetálicas durante a sinterização. Os *Cermets* possuem grande dureza, baixa tendência à difusão, assim como grande resistência a quente. Outras propriedades dos *cermets* são: alta resistência à oxidação e baixa tendência à formação de gume postiço [2, 4, 5]. Em razão da sua grande resistência de gume, da grande resistência ao desgaste e da baixa tendência à aderência, os *Cermets* são apropriados para o acabamento de aços. A principal aplicação de *Cermets* até o momento é na usinagem de aços com alta velocidade de corte e pequenas seções de corte transversais.

Como critério de classificação para os metais-duros na indústria, na maioria dos casos, é utilizada a aplicação do metal-duro, pois, de acordo com a composição química e as propriedades, torna-se difícil uma padronização baseada em outras características [2, 28].

A norma ISO classifica os metais duros em três grupos codificados em por cores: metal-duro de grau convencional (letra K, cor vermelha), metal-duro de alto grau de liga (letra P, cor azul) usado principalmente para a usinagem de aço e metal-duro de liga moderada (letra M, cor amarelo) o qual pode-se usar em aços ligados, ferros fundidos etc. Cada classe dentro dos grupos é designada por um número entre 01 e 50, representando a faixa de máxima dureza à máxima tenacidade, (**Tabela 2.1**).

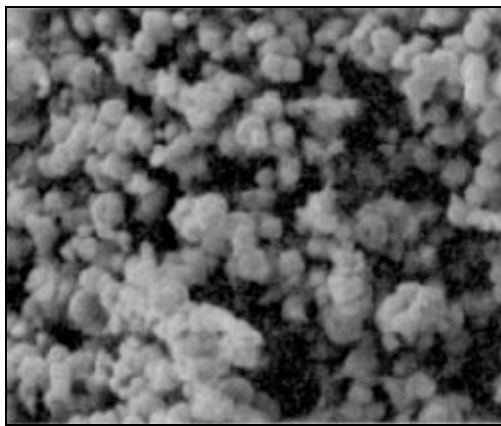
Tabela 2.1 – Classificação dos metais duros segundo a norma ISO [28]

| Principal grupo de usinagem   | Cor de identificação  | Grupo de aplicação | Operações e condições de usinagem   |
|---|---|--------------------|---|
| P<br>Aços maleáveis de cavacos longos   | Azul  | P01                | Torneamento e mandrilamento de precisão, altas velocidades de corte, pequenas seções de cavaco, alta qualidade dimensional, superfícies com bom acabamento sob condições livres de vibrações.                 |
|   |   | P10                | Torneamento, copiado, rosqueamento, altas velocidades de corte, pequenas seções de cavaco moderadas.  |
|   |   | P20                | Torneamento, copiado, rosqueamento, velocidades moderadas de corte, seções de cavaco moderadas. Aplainamento com pequenas seções de cavaco.   |
|   |   | P30                | Torneamento, aplainamento, fresamento, baixas velocidades de corte, e grandes seções de cavaco, grandes ângulos de saída, condições desfavoráveis de usinagem.  |
|   |   | P40                | Torneamento, aplainamento, fresamento, baixas velocidades de corte, e grandes seções de cavaco (desbaste), grandes ângulos de saída, condições desfavoráveis de usinagem. Também para torneamento automático. |
| P50   | Em processos que exigem grandes solicitações sob o metal-duro (alta tenacidade): torneamento, aplainamento, fresamento, baixas velocidades de corte, e grandes seções de cavaco, grandes ângulos de saída, condições desfavoráveis de usinagem. Também para torneamento automático. |                    |   |
| M<br>Aço, aço fundido, aço austenítico, aços inoxidáveis  | Amarelo   | M10                | Torneamento, moderadas a altas velocidades de usinagem, pequenas a moderadas seções de cavaco.  |
|   |   | M20                | Torneamento, fresamento sob moderadas velocidades de corte e seções moderadas de cavaco.  |
|   |   | M30                | Torneamento, fresamento, aplainamento, com moderadas velocidades de corte e seções de cavaco moderadas a grandes.   |
|   |   | M40                | Torneamento, torneamento de formas, usinagem em cortes interrompidos.   |
| K<br>Ferros fundidos, ferro fundido coquilhado, ferro fundido maleável de cavacos curtos, Aços endurecidos, metais não-ferrosos, materiais não-metálicos. | Vermelho  | K01                | Torneamento, torneamento e, mandrilamento de precisão, fresamento de acabamento, rasqueteadado.   |
|   |   | K10                | Torneamento, fresamento, mandrilamento, furação, alargamento rasqueteadado e brochamento.   |
|   |   | K20                | Torneamento, fresamento, mandrilamento, furação, alargamento, rasqueteadado e brochamento sob maiores solicitações que do que o K10.  |
|   |   | K30                | Torneamento, fresamento, aplainamento, sob condições adversas de usinagem, grandes ângulos de saída.  |
| K40   | Torneamento, fresamento, aplainamento, sob condições adversas de usinagem, grandes ângulos de saída.  |                    |   |

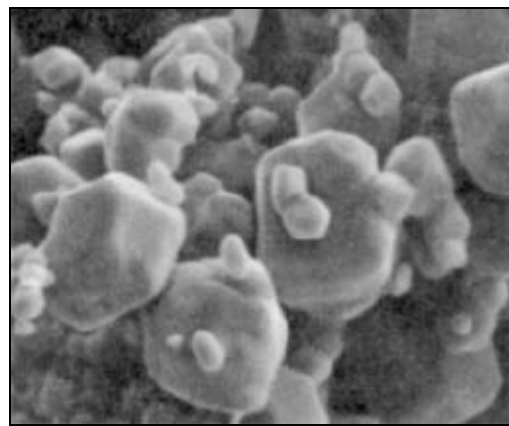
A Tabela 2.1 mostra em detalhe a classificação ISO para os metais-duros e o tipo de operações e condições de usinagem recomendadas. Na usinagem de ferro fundido cinzento, é utilizado o metal-duro do grupo de aplicação K. Este é indicado para a

usinagem de ferro fundido comum e coquilhado, ferros fundidos maleáveis de cavacos curtos, aços temperados, metais não ferrosos, e materiais não metálicos [2, 6, 28].

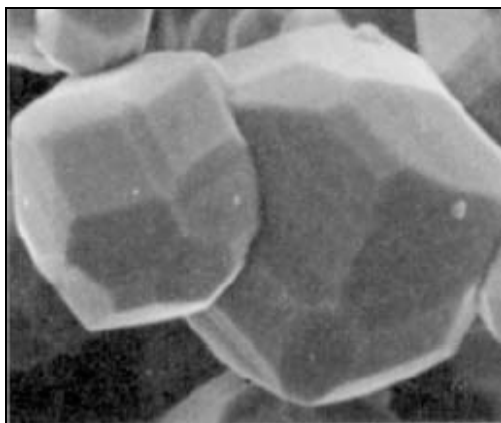
Um outro aspecto importante na classificação dos metais-duros é o tamanho de grão. A **Figura 2.25** mostra alguns dos tamanhos de grão de carbonetos de tungstênio com uma ampliação de 20.000x.



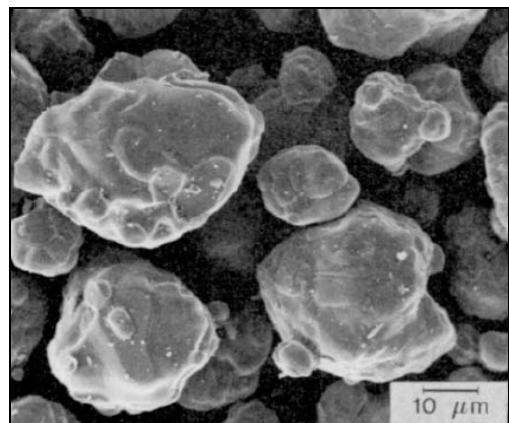
a) Extrafino



b) Convencional



c) Grosseiro



**Figura 2.25** – Tamanhos de grão do carboneto de tungstênio WC [29]

A tenacidade do metal-duro depende em grande medida do tamanho do grão devido a isto a tendência atual é de usar tamanhos de grãos cada vez menores e finos. Basicamente os fabricantes de ferramentas conseguem com isto duas vantagens importantes [30]:

- quanto menor é o tamanho do grão, tanto mais tenaz é a ferramenta, fazendo possível a sua aplicação em condições de instabilidade do processo;
- os tamanhos de grãos menores permitem cortes mais precisos.



Uma classificação sugerida por um fabricante de ferramentas em relação ao tamanho de grão, ainda não padronizada, é descrita abaixo [30]:

- Grão convencional                      tamanho de grão menor que  $2,5 \mu\text{m}$ ;
- Grão fino                                    tamanho de grão menor que  $1,5 \mu\text{m}$ ;
- Grão muito fino                          tamanho de grão menor que  $0,7 \mu\text{m}$ ;
- Grão extrafino                            tamanho de grão menor que  $0,5 \mu\text{m}$ ;
- Nano-grão                                   tamanho de grão menor que  $0,1 \mu\text{m}$ .

### 2.7.3 Cerâmicas

As cerâmicas já são amplamente utilizadas em fresamento e torneamento. Devido à sua alta estabilidade química e resistência ao desgaste, são utilizadas na usinagem de aços e ferros fundidos. Atualmente, na indústria, as cerâmicas são amplamente utilizadas em furação na forma de insertos intercambiáveis em ferramentas para furos de grande diâmetro. Para diâmetros menores, têm sido realizados testes em furação com cerâmicas à base de nitreto de silício, apresentando um bom desempenho na usinagem de ferro fundido [1].

As dificuldades para a implementação das cerâmicas na furação são as características críticas nas quais este processo se realiza, a alta sensibilidade à torção e à flexão das cerâmicas, além da difícil afiação das geometrias das brocas [31]. No entanto, pesquisas são direcionadas à utilização das cerâmicas em furação. Uhlmann (2000) realizou testes com brocas helicoidais (DIN 6537,  $\varnothing 10 \text{ mm}$ ) à base de nitreto de silício revestidas com diamante. Numa análise comparativa, na usinagem de ligas de alumínio e cobre, mostrou a superioridade das ferramentas cerâmicas nos processos de torneamento e fresamento sobre as ferramentas de metal-duro, utilizando o mesmo revestimento. Já na furação os resultados dessa pesquisa verificaram vidas inferiores nas ferramentas cerâmicas. Tal resultado é explicado pelo maior contato do material usinado com a superfície de saída da ferramenta na furação, em comparação por exemplo, com o torneamento cilíndrico. Existe também na furação a influência do atrito constante gerado pelas guias na parede do furo. A menor condutividade térmica do substrato cerâmico diferente do metal-duro, reduz a transferência de calor entre o substrato e o material usinado. Os altos esforços termo-mecânicos incrementam o desgaste progressivo da ferramenta que se reflete na menor vida da ferramenta. Por outro lado, o substrato de

metal-duro por ter uma condutividade térmica cinco vezes maior à da cerâmica, suporta melhor o calor removido da zona de contato, o contribui para um menor desgaste da ferramenta [32].

A motivação para a aplicação das ferramentas de cerâmica na usinagem vem principalmente das maiores velocidades de corte alcançadas e ao enorme incremento da produtividade associado. Hoje em dia, são fabricadas brocas à base de nitreto de silício para a furação de pequenos diâmetros de furo (de 5 a 12 mm), que prometem excelentes resultados a altas velocidades (**Figura 2.26**). Porém, freqüentemente todo o potencial destas ferramentas não é explorado devido ao uso de máquinas inadequadas (rigidez, potência, aceleração etc.) para a usinagem com ferramentas cerâmicas [31].



**Figura 2.26** – Ferramentas cerâmicas [31]

#### 2.7.4 Materiais Superduros

Assim como os materiais cerâmicos, o diamante policristalino (PCD) e o nitreto de boro cúbico policristalino (PCBN) são também usados em torneamento e fresamento. Esses materiais podem ser utilizados em furação na forma de insertos intercambiáveis para ferramentas de grandes diâmetros. Particularmente, o PCBN é utilizado para a usinagem de materiais duros, mas a vida da ferramenta é extremamente dependente do tipo de material. Tentativas de furação com brocas helicoidais de insertos de PCBN têm fracassado na maioria das vezes, devido à união entre o inserto e a base da ferramenta permanecerem sob constante sobrecarga térmica e mecânica. Em ligas de alumínio, é possível a utilização de brocas helicoidais com insertos de materiais superduros, devido às

características de menores esforços apresentados nestas ligas. A vida da ferramenta, nesse caso, supera o tempo de vida de ferramentas convencionais [1]

### 2.7.5 Revestimentos

Os revestimentos são normalmente mais duros que a própria ferramenta, com o objetivo de melhorar as propriedades de resistência ao desgaste abrasivo e químico, além de ter uma boa aderência ao substrato. Os três materiais mais comuns que satisfazem esses critérios são TiN, TiC e  $Al_2O_3$ . É comumente citado que o TiC é o revestimento mais duro e também o mais resistente ao desgaste abrasivo, que o  $Al_2O_3$  é o que menos reage quimicamente e o TiN é bom para a maioria dos propósitos [21].

Nas últimas décadas, ocorreram importantes avanços na área de revestimentos e alguns destes são [33]:

- Ligas de nitretos de Ti, *e.g.*, (Ti, Al) N;
- Carbonitretos de Ti, *e.g.*, Ti (C,N);
- Revestimentos multicamada de diferentes nitretos;
- Ferramentas revestidas com diamante por CVD e PACVD para a usinagem de metais não-ferrosos e compósitos com matriz de polímero. Uma camada de base de nitreto de silício é usada para fixar a camada de diamante sobre ferramentas de metal-duro;
- Revestimentos de nitreto de boro cúbico por métodos de PVD de plasma assistido e CVD para a usinagem de materiais ferrosos.

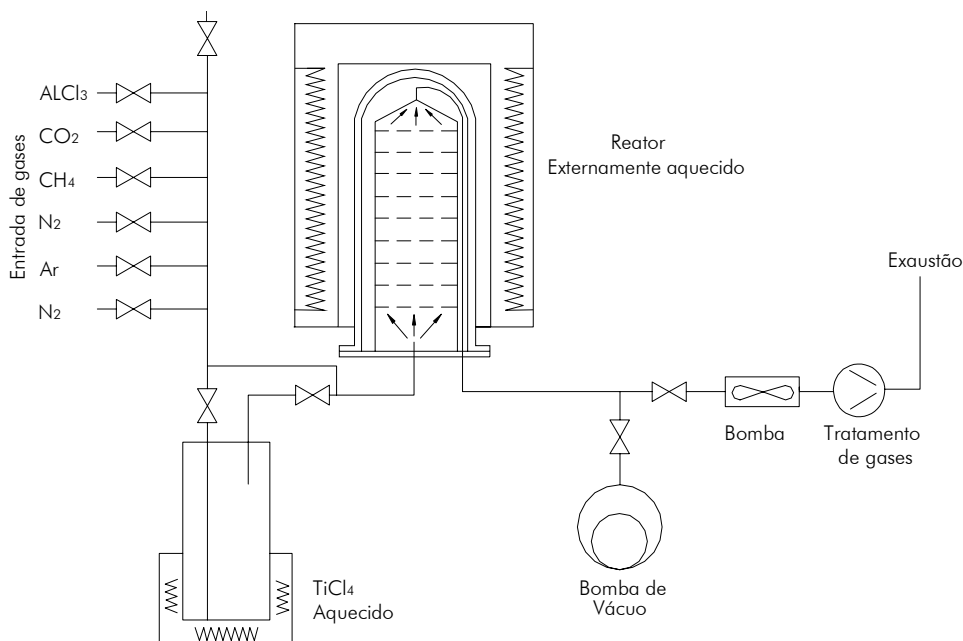
### 2.7.6 Processos de revestimento

A aplicação de revestimentos em ferramentas de corte é realizada 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). A espessura desses revestimentos está normalmente na faixa de 1 a 10  $\mu m$ , o que não é relevante dimensionalmente em ferramentas para aplicações de pouca exatidão [12].

a) **Deposição química de vapor – CVD (Chemical Vapor Deposition):** a deposição química de vapor pode ser definida como a deposição de um elemento sólido sobre uma superfície aquecida, através de uma reação química em fase de vapor. O CVD é parte da classe de processos de transferência de vapor do tipo atômico, a qual faz

a deposição de materiais em forma de átomos, de moléculas, ou a combinação destes [34].

A ilustração esquemática de um sistema para revestimentos por deposição química é mostrada na **Figura 2.27**. Consiste em uma câmara reatora externamente aquecida e ligada a várias conexões de gases reagentes. As peças ou componentes, totalmente limpos, são colocados dentro do reator. Logo após, o reator é fechado e todo o oxigênio é extraído, fornecendo uma atmosfera protetora controlada. Subseqüentemente, o reator é aquecido até uma temperatura determinada para a execução do processo e a atmosfera de gás protetor é substituída pelos gases usados na reação. Para a conclusão do processo de revestimento, é utilizada uma atmosfera de gás inerte durante todo o ciclo de refrigeração [28].



**Figura 2.27** – Diagrama esquemático do processo CVD [28]

b) **Deposição física de vapor – PVD (Physical vapor deposition)**: os processos de deposição física de vapor (comumente chamados processos de camadas finas) são processos de deposição atômica, no qual o material de revestimento em estado sólido ou líquido, é vaporizado na forma de átomos ou moléculas e transportado em forma de vapor através de um meio de vácuo ou de baixa pressão até o substrato onde é condensado. Comumente, os processos de PVD são usados para depositar filmes de uma faixa de espessura desde poucos até milhares de nanômetros [35].

A **Figura 2.28** mostra um exemplo de revestimento de diamante sobre um substrato de metal-duro realizado pelo processo PVD.

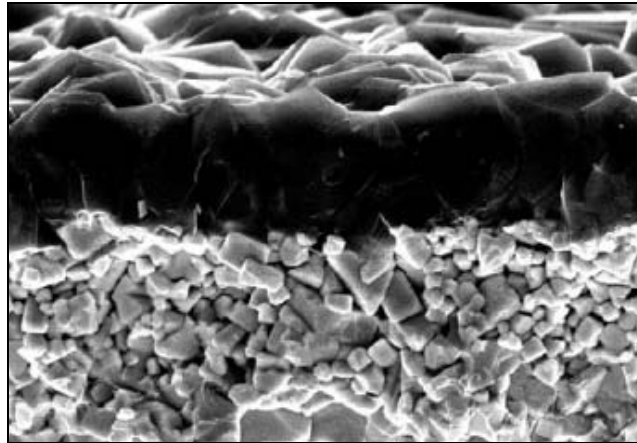


Figura 2.28 – Revestimento de diamante por PVD [37]

As mais avançadas tecnologias de PVD usadas para a aplicação de revestimentos sobre substratos de WC-Co são: *Sputtering*, *íon plating*, evaporação reativa ativada e implantação iônica. O processo *Sputtering*, por exemplo, que é realizado dentro de uma câmara a alto vácuo, baseia-se no fato de íons com alta energia cinética situarem-se na placa do material a ser vaporizado e assim, através da transferência de impulsos elétricos em presença de um gás de processo (usualmente argônio), serem projetados para os átomos responsáveis pelo revestimento (Figura 2.29). A nuvem de átomos e moléculas do material da camada espalha-se pela câmara de revestimento e é depositada no substrato como uma camada [6, 28].

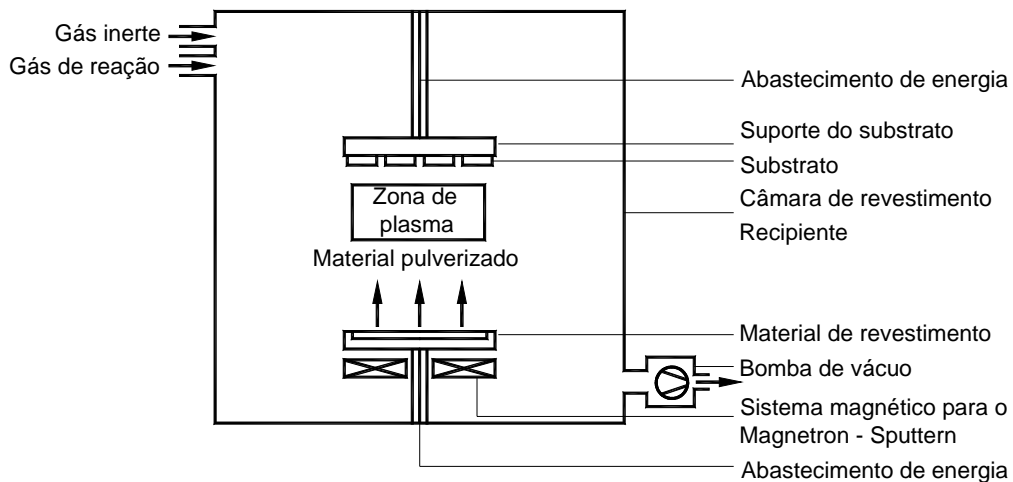


Figura 2.29 – Processo PVD – Sputtering [28]

### 2.7.7 Principais tipos de revestimentos

A seguir são descritas as características dos principais tipos de revestimentos empregados em brocas.

a) **Carboneto de titânio (TiC):** a diminuição do atrito e a menor condutividade térmica da camada aplicada produzem temperaturas menores no gume e, com isto, o desgaste por difusão e atrito no gume são diminuídos. O carboneto de titânio é mais duro que o nitreto de titânio, o que resulta numa boa resistência ao desgaste por abrasão e também um menor coeficiente de dilatação térmica.

b) **Nitreto de titânio (TiN):** o revestimento de nitreto de titânio é quimicamente mais estável que o TiC, isto é, tem menor tendência a fenômenos de difusão em aços.

Experimentos têm mostrado que usando brocas de aço-rápido revestidas com TiN são possíveis velocidades de corte entre 2,5 a 4 vezes maiores e avanços entre 3 e 5 vezes maiores em relação às brocas não revestidas [26]. Este revestimento é recomendado para materiais de difícil usinabilidade como o ferro fundido, latão, alumínio, aços inoxidáveis etc.

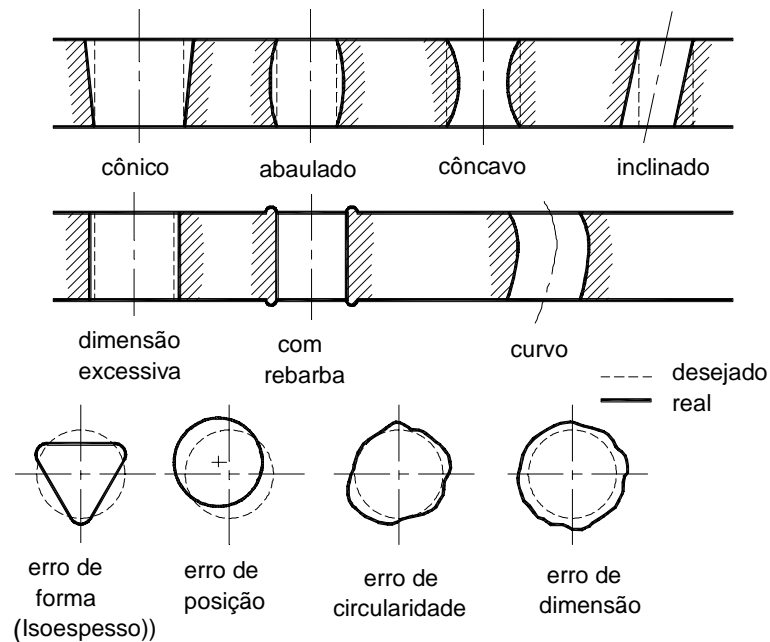
c) **Carbonitreto de titânio (TiCN):** este revestimento possui uma dureza superior ao TiN. As ferramentas revestidas com TiCN possuem uma vida útil superior aos outros revestimentos citados, permitindo um maior comprimento de usinagem com maior velocidade de corte, sendo recomendado para aços inoxidáveis, ferro fundido, latão, bronze, alumínio com teor de silício e materiais termoplásticos [27].

d) **Nitreto de titânio alumínio (TiAlN):** este revestimento é uma alternativa na redução da utilização de fluidos de corte na usinagem que busca a diminuição da poluição ambiental. O bom desempenho da usinagem a seco com ferramentas de corte revestidas com TiAlN é devido ao fato que esse revestimento mantém as propriedades de alta dureza e resistência à oxidação operando a altas temperaturas [36]. A elevada resistência à oxidação pode ser devida à formação de uma camada externa de óxido, bem aderida e estável, formada pela difusão do alumínio e uma camada interna de óxido de titânio formada na interface revestimento/substrato. Essas duas camadas de óxido favorecem a redução da taxa de oxidação pela inibição da difusão do oxigênio no substrato sob o revestimento [15].

## 2.8 Qualidade do processo de furação

A precisão de qualquer furo produzido por furação depende de muitos fatores, incluindo o processo utilizado, a peça e a máquina usadas, parâmetros de usinagem e a rigidez do conjunto utilizado. A precisão é também dependente da geometria da ferramenta utilizada [6, 38].

Existem erros ou imperfeições que podem ocorrer na furação dependendo das condições do processo. A **Figura 2.30** resume alguns erros geométricos no processo de furação.



**Figura 2.30** – Erros comuns no processo de furação [6, 38]

Para a obtenção de furos aceitáveis devem-se seguir tolerâncias, as quais podem ser de forma e dimensionais. As tolerâncias dimensionais estão relacionadas com a medida nominal e a medida real encontrada no furo, e as tolerâncias de forma estão relacionadas com a geometria dos furos.

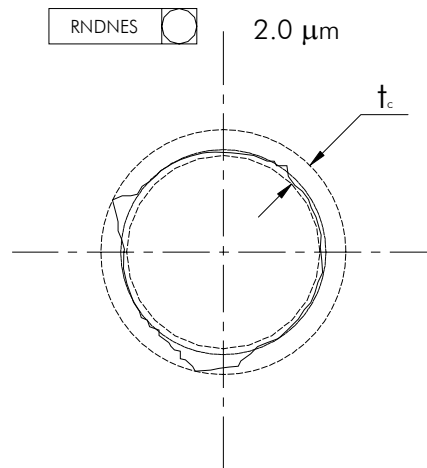
### 2.8.1 Erros de forma

Um erro de forma corresponde à diferença entre a superfície real da peça e a forma geométrica teórica. A forma de um elemento será correta quando cada um dos seus pontos for igual ou inferior ao valor da tolerância dada [39].

As tolerâncias para erros de forma são caracterizadas pelo fato de que não estão determinadas por um marco de referência. Elas não controlam a forma de uma geometria em relação à outra, nem com respeito a sistemas de coordenadas estabelecidas por outras geometrias [39]. Existem vários conceitos de tolerâncias usados no controle dos erros de forma aplicados na furação.

**a) Circularidade:** a tolerância de circularidade controla erros de forma de uma esfera ou de geometrias que possuem seções transversais circulares (existem algumas exceções). É a condição pela qual qualquer círculo deve estar dentro de uma faixa

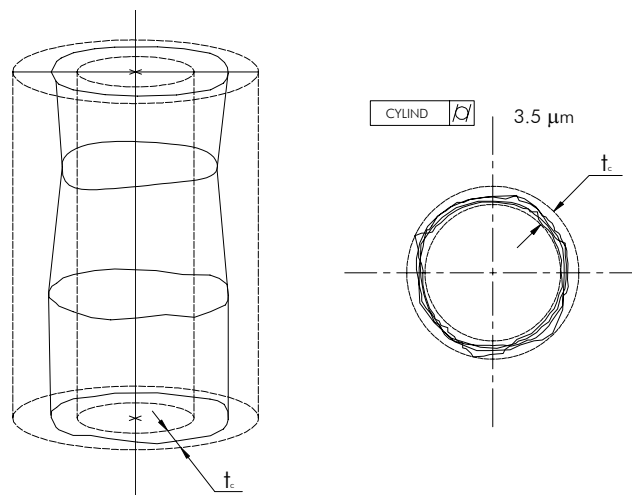
definida por dois círculos concêntricos, distantes no valor da tolerância especificada como mostra a **Figura 2.31** [40]. Formas tais como triangular, irregular ou oval são comumente observadas. A precisão dos mancais do fuso e a afiação da ferramenta são essenciais para a minimização destes erros. O erro de circularidade pode ser também reduzido aumentando a taxa de avanço e usando uma ferramenta mais rígida [38].



**Figura 2.31** – Tolerância de circularidade [40]

b) **Cilindricidade:** a tolerância de cilindridade é determinada pela diferença entre os raios de dois cilindros geometricamente corretos, os quais são coaxiais, como mostra a **Figura 2.32** [39, 40]. Os eixos dos cilindros não têm uma orientação ou colocação pré-definida em relação à tolerância, nem a nenhuma outra referência. A circularidade é um caso particular de cilindridade, quando se considera uma seção do cilindro perpendicular à sua geratriz.

A tolerância de cilindridade engloba as tolerâncias admissíveis na seção longitudinal do cilindro, que compreende conicidade, concavidade e convexidade [39].



**Figura 2.32** – Tolerância de cilindridade [40]



### 2.8.2 Erros de posição

Na usinagem de elementos de revolução, tais como cilindros ou furos, ocorrem variações em suas formas e posições, o que provoca erros de ovalização, conicidade, excentricidade etc. em relação a seus eixos. Tais erros são aceitáveis até certos limites, desde que não comprometam o funcionamento das peças acabadas. Daí a necessidade de se estabelecer um dimensionamento conveniente para os elementos.

Além desses desvios, fica difícil determinar na peça o seu verdadeiro eixo de revolução. Nesse caso, a medição ou inspeção deve ser feita a partir de outras referências que estejam relacionadas ao eixo de simetria. Essa variação de referencial geralmente leva a uma composição de erros, envolvendo a superfície medida, a superfície de referência e a linha de centro teórica.

**a) Batimento radial:** o batimento representa a variação máxima admissível da posição de um elemento, considerado ao girar a peça de uma rotação em torno de um eixo de referência, sem que haja deslocamento axial. O batimento pode delimitar erros de circularidade, coaxialidade, excentricidade, perpendicularidade e planicidade, desde que seu valor, que representa a soma de todos os erros acumulados, esteja contido na tolerância especificada [39].

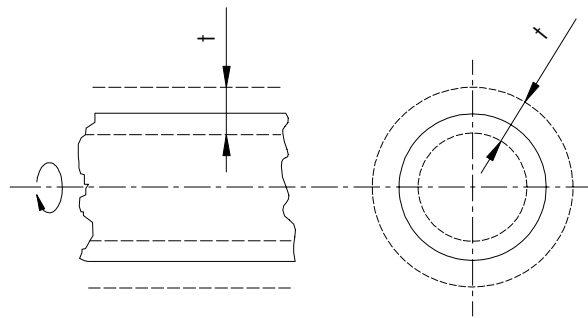


Figura 2.33 – Tolerância de batimento radial [41]

A tolerância de batimento radial é definida como um campo de distância  $t$  entre dois círculos concêntricos, medidos em um plano perpendicular ao eixo considerado (Figura 2.33).

**b) Batimento axial:** a tolerância de batimento axial  $t_a$  é definida como o campo de tolerância determinado por duas superfícies, paralelas entre si e perpendiculares ao eixo de rotação da peça, dentro do qual deverá estar a superfície real quando a peça efetuar uma volta, sempre referida a seu eixo de rotação (Figura 2.34).

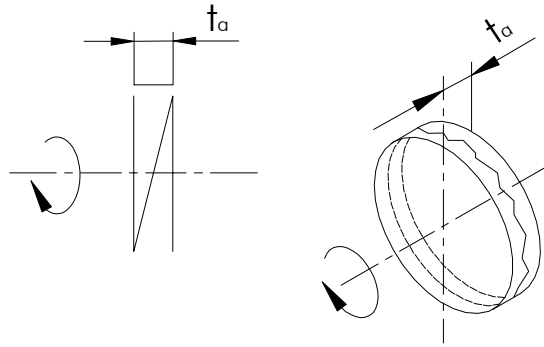


Figura 2.34 – Tolerância de batimento axial [41]

### 2.8.3 Erros de dimensão

Na maioria dos casos o diâmetro do furo produzido é maior do que o diâmetro da broca. De maneira geral a **Tabela 2.2** mostra as tolerâncias dimensionais que podem ser obtidas com brocas helicoidais [38]. Tolerâncias mais estreitas do que as mostradas nessa tabela podem ser alcançadas, mas em geral implicam em aumento dos custos de produção.

**Tabela 2.2** – Precisão de furos produzidos com brocas helicoidais [6]

| Condição                       | Diâmetro [mm] |              |               |              |               |              |
|--------------------------------|---------------|--------------|---------------|--------------|---------------|--------------|
|                                | (3-6)         |              | (6-19)        |              | (19-38)       |              |
|                                | Dimensão [mm] | Posição [mm] | Dimensão [mm] | Posição [mm] | Dimensão [mm] | Posição [mm] |
| Sem furo de centro e sem bucha | 0,13          | ±0,18        | 0,15          | ±0,20        | 0,20          | ±0,23        |
| Com furo de centro e sem bucha | 0,08          | ±0,10        | 0,08          | ±0,10        | 0,10          | ±0,13        |
| Com bucha                      | 0,08          | ±0,05        | 0,08          | ±0,05        | 0,10          | ±0,08        |

### 2.8.4 Erros de acabamento

Os erros de acabamento possuem uma alta parcela de responsabilidade na rejeição de peças em uma linha de produção. Alguns destes defeitos presentes na furação são os mostrados a seguir:

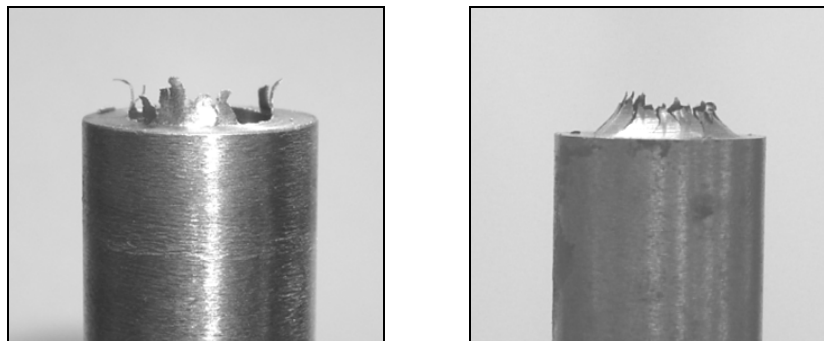
**a) Rebarbas:** no processo de furação é possível que rebarbas se formem na borda do furo, tanto na entrada quanto na saída [42]. A forma e dimensão da rebarba dependem principalmente das condições da ferramenta, da velocidade de corte e avanço utilizados. Outros fatores são o material usinado (que pode influenciar a formação de

rebarbas devido às suas propriedades mecânicas), a rigidez da máquina e a composição do fluido refrigerante.

Na usinagem de materiais dúcteis, evitar a formação de rebarbas é muito difícil. A melhor maneira de controlar as rebarbas, nesses casos, é substituindo o material por outro de menor ductilidade. Porém, isto só é possível em casos pouco freqüentes. [43].

Na furação, o gume transversal da ferramenta tem apenas uma influência indireta sobre a formação de rebarbas. Entretanto, o desgaste de quina tem uma influência marcante, no sentido de favorecer a sua formação. O avanço é um importante fator na formação de rebarbas e de maneira geral pode-se afirmar que grandes avanços produzem grandes rebarbas [43, 44, 45].

Para reduzir a formação de rebarbas na usinagem, recomenda-se diminuir a espessura do cavaco, ou diminuir o ângulo de cisalhamento deste, isto pode ser alcançado usando ângulos de saída positivos, altas velocidades, lubrificando e refrigerando adequadamente a peça [43]. Especificamente na furação, para reduzir a formação de rebarbas, recomenda-se usar quinas arredondadas [38, 44]. Na furação do ferro fundido, podem surgir rebarbas na saída do furo quando os gumes realizam um corte deficiente devido ao desgaste. A **Figura 2.35** representa um caso de rebarba em uma peça de ferro fundido cinzento GG25.



**Figura 2.35** – Rebarbas na furação de ferro fundido

b) **Quebra da borda do furo na saída:** esta imperfeição do furo é observada quando a saída da ferramenta causa a fratura da borda do mesmo. Em materiais de baixa ductilidade este problema ocorre mais freqüentemente. A **Figura 2.36** mostra um furo com quebras na borda (a) e um furo com acabamento correto (b).

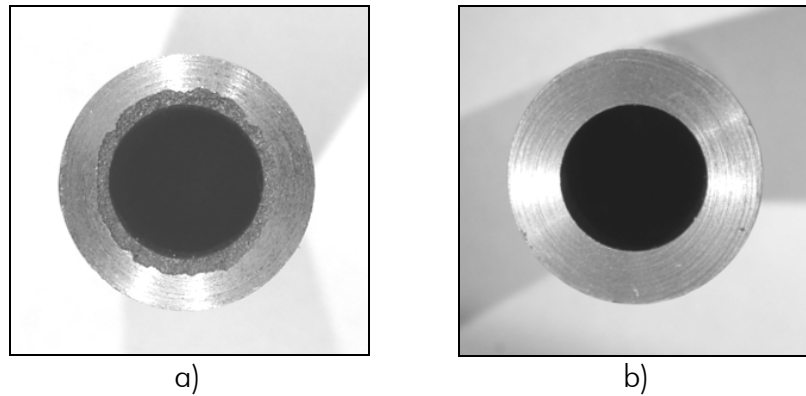


Figura 2.36 – Quebras da borda do furo

c) **Marcas na parede do furo:** as marcas na parede do furo dependem principalmente dos materiais da peça e ferramenta, da geometria da ferramenta e seu estado de desgaste, assim como das condições de usinagem empregadas, máquina-ferramenta, fixação da peça e do meio lubri-refrigerante utilizado (ou da ausência deste). A **Figura 2.37** mostra o exemplo de um furo com marcas decorrentes do alto grau de desgaste da ferramenta (a) e um furo com bom acabamento (b).

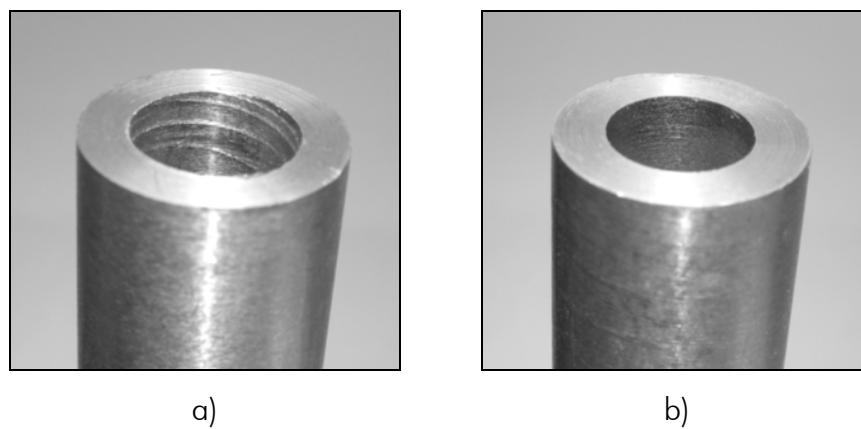


Figura 2.37 – Marcas na parede do furo

### 2.8.5 Qualidade da superfície na furação

a) **Rugosidade:** define-se rugosidade como sendo o conjunto de irregularidades da superfície real em relação à superfície técnica ou de referência, **Figura 2.38** [20]. Existem dezenas de parâmetros utilizados na avaliação de superfícies em diversas aplicações. Conceitos de projeto, desgaste, atrito e lubrificação são profundamente influenciados pela rugosidade [46, 47].

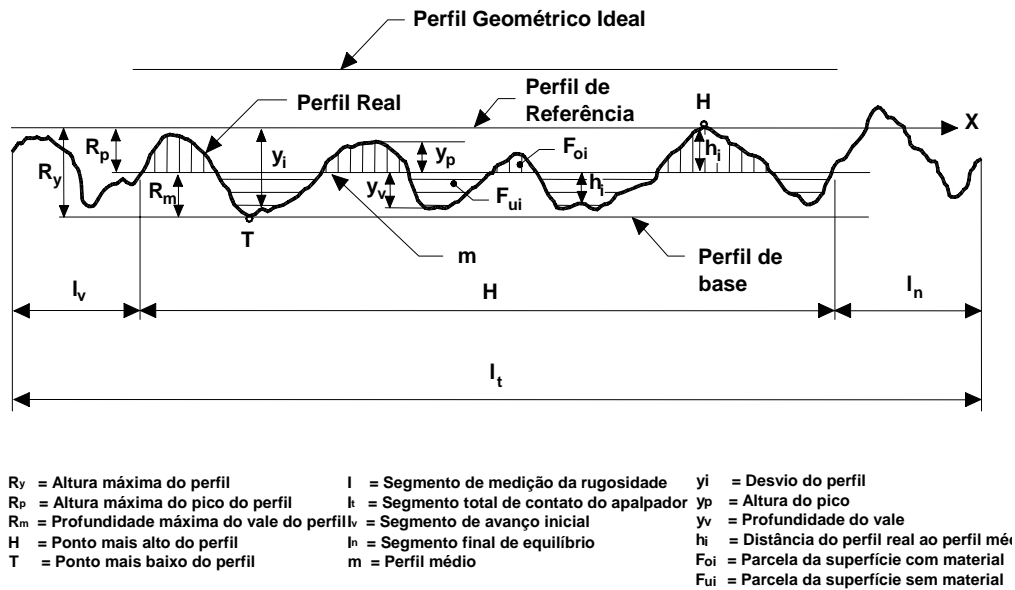


Figura 2.38 – Conceitos básicos na avaliação de superfícies [6]

- **Rugosidade R<sub>a</sub>**: é possivelmente o mais antigo conceito de rugosidade ainda em uso. Sua disseminação pode ser atribuída à facilidade de cálculo, mesmo com aparelhos analógicos simples [46]. Define-se como a média aritmética dos valores absolutos das variações do perfil real em relação à linha média, equação 2.4 [6, 20, 46, 47]. Este parâmetro tem a desvantagem de não esclarecer a ordem de grandezas dos diferentes valores locais da rugosidade sobre o perfil analisado.

$$R_a = \frac{1}{l} \int_{x=0}^{x=l} |h_i| \cdot dx \quad (2.4)$$

- **Rugosidade R<sub>z</sub>**: é a profundidade média de rugosidade, definida como a distância média entre os 5 picos mais altos e os 5 vales mais profundos, dentro de um comprimento médio medido. É dada pela seguinte relação:

$$R_z = \frac{1}{5} \left( \sum_{i=1}^5 p_i + \sum_{i=1}^5 v_i \right) \quad (2.5)$$

- **Rugosidade R<sub>y</sub>**: é definida como a distância entre o pico mais alto e o vale mais baixo, dentro de um comprimento medido de um perfil de rugosidade.
- **Rugosidade R<sub>t</sub>**: a profundidade máxima de rugosidade R<sub>t</sub> é o valor do afastamento do perfil de base ao perfil de referência, sendo a maior distância medida perpendicularmente ao perfil geométrico ideal.

b) **Integridade da superfície:** na usinagem dos metais é inevitável que a saída do cavaco provoque alterações na superfície usinada. Uma ferramenta muito afiada que trabalha em materiais dúcteis provoca uma pressão suficiente para romper as ligações atômicas ou moleculares, causando um grande número de deslocamentos, sem produzir grandes deformações plásticas a distâncias da ordem de alguns micrometros da região de corte. Quando se tem uma ferramenta não afiada, geralmente ocorre um processo de recalque com uma deformação plástica mais profunda [20]. O processo de furação afeta de maneira pouco significativa as propriedades físicas do material da peça. Porém, causa tensões residuais em uma pequena camada de material ao redor do furo, a qual pode ser removida em processos subseqüentes de usinagem [38].

## 2.9 Forças na Furação

As medições e estimativas das forças presentes nos processos de usinagem são de grande importância por fornecerem informações para avaliação e desenvolvimento de máquinas-ferramentas e entendimento dos fenômenos na região de corte. Além disso, permitem também uma melhor compreensão dos fenômenos de formação de cavaco e dos mecanismos de desgaste envolvidos e auxiliam na determinação das condições de corte [5, 6, 16].

Os principais fatores que influenciam as forças de corte são [1, 6, 48]:

- Material da peça;
- Revestimento da ferramenta;
- Geometria da ferramenta de corte;
- Parâmetros de corte;
- Tipo e pressão do fluido de corte;
- Desgaste da ferramenta.

O estudo das forças aplicadas à broca durante a usinagem pode ser abordado considerando separadamente as seguintes ações [20]:

- Forças aplicadas aos gumes principais;
- Forças decorrentes do atrito nas guias;
- Forças que atuam sobre o gume transversal.

A força de usinagem  $F$  que atua sobre os gumes principais durante a usinagem pode ser decomposta em três componentes: força de corte  $F_c$ , força de avanço  $F_f$  e força passiva  $F_p$ , como mostra a **Figura 2.39**. A força de corte  $F_c$  é decorrente da resistência ao

corte do material usinado, que é predominantemente a responsável pelo momento torçor gerado no processo.

As forças passivas  $F_p$  atuantes nos dois gumes principais anulam-se mutuamente devido à simetria dos gumes principais em relação ao eixo central. A falta de simetria pode ocasionar forças passivas de intensidades diferentes, que causam a flexão da broca durante o processo [6].

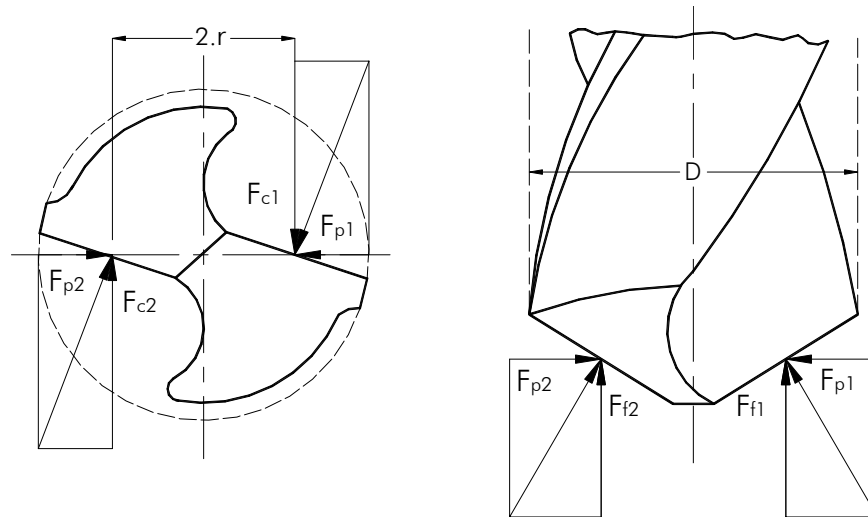
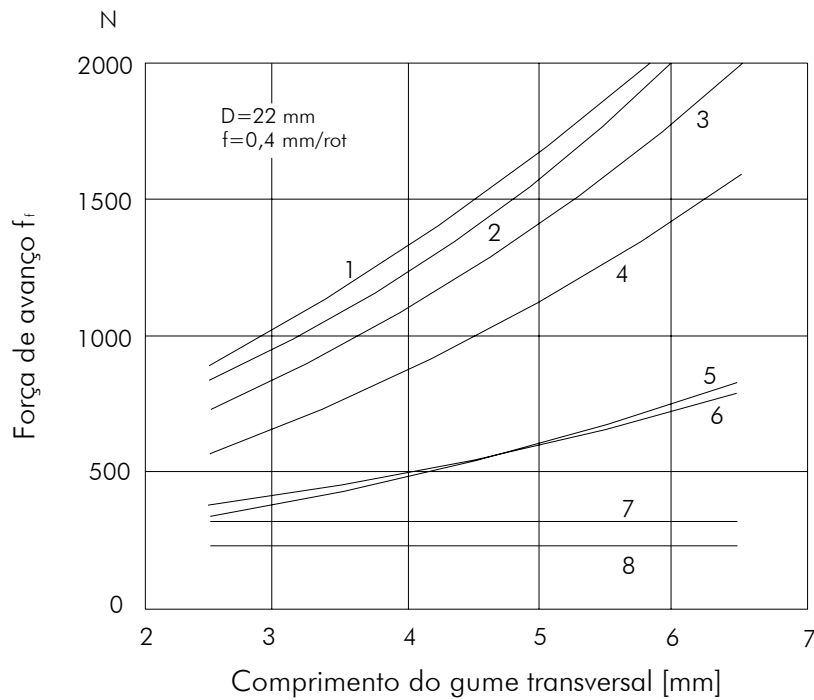


Figura 2.39 – Componentes da força de usinagem segundo Spur [6]

A força de avanço  $F_f$  é ocasionada pela resistência ao corte do material (penetração da ferramenta) no sentido do avanço. Esta força surge principalmente devido à ação do gume transversal, quando este apresenta um corte deficiente. Geralmente com uma contribuição ao momento torçor inferior a 2%, provoca o esmagamento do material, empurrando-o para a região dos gumes principais. Sua influência à resistência ao avanço é muito maior, podendo alcançar valores da ordem de 50% [20].

Tais valores de resistência ao avanço estão influenciados pelo comprimento e pela inclinação do gume transversal. Aumentando o comprimento deste, tem-se um incremento na força de avanço na furação do aço. Esse incremento é mais modesto no ferro fundido e praticamente nulo para ligas de alumínio e latão. Com o aumento do gume transversal, produz-se um incremento na força de avanço, conforme observado na Figura 2.40 [20].



1, aço ferramenta; 2, aço HB 196; 3, aço HB 156; 4, aço para autômatos; 5, ferro fundido maleável;  
6, ferro fundido cinzento; 7, ligas leves; 8, latão.

**Figura 2.40** – Influência do comprimento do gume transversal na força de avanço segundo M. Kronenberg [20]

a) **Força de corte ( $F_c$ ):** corresponde à parcela da força de corte  $F_{ci}$  que atua em cada um dos gumes cortantes e é decorrente da resistência ao corte do material usinado, tendo grande influência sobre o momento torçor que atua na furação [2].

Força de corte por gume:

$$F_c = k_c \cdot \frac{f \cdot d}{4} \quad (2.6)$$

Onde:  $F_c$  = Força de corte [N];  
 $k_c$  = Força específica de corte [N/mm<sup>2</sup>];  
 $f$  = Avanço [mm];  
 $d$  = Diâmetro da broca [mm].

b) **Força de avanço ( $F_f$ ):** é a resultante da soma das parcelas das reações ao avanço do gume de corte e do gume transversal. Como o gume transversal atua no sentido de extrudar material para os gumes principais, a parcela da respectiva força de avanço pode ser igual ou até mesmo maior que a força de avanço dos gumes principais



de corte. É importante conhecê-la para se ter certeza que o eixo da máquina é capaz de suportar a operação [5, 22, 49].

$$F_f = k_f \cdot \frac{f \cdot d \cdot \sin\left(\frac{\sigma}{2}\right)}{2} \quad (2.7)$$

Onde:  $F_c$  = Força de avanço [N];  
 $k_f$  = Força específica de avanço [N/mm<sup>2</sup>];  
 $f$  = Avanço [mm];  
 $d$  = Diâmetro da broca [mm];  
 $\sigma$  = Ângulo de ponta da ferramenta [graus].

c) **Força passiva ( $F_p$ ):** atua em uma parcela do gume principal. As forças passivas atuantes nos gumes tendem a se anular mutuamente. É desprezível quando comparada com as forças de corte e de avanço [22, 50]. Contudo, para afiações assimétricas dos gumes ou mesmo em brocas não-simétricas, tais como brocas canhão, BTA e *Ejektor*, essas forças são importantes.

d) **Momento torçor ( $M_t$ ):** as forças atuantes nos gume principais da ferramenta são responsáveis pelo momento torçor, contribuindo entre 70 e 90% do valor do mesmo [2].

$$M_t = k_c \left( \frac{f \cdot d^2}{8000} \right) \quad (2.8)$$

Onde:  $M_t$  = Momento torçor [N.mm];  
 $F_c$  = Força de corte [N];  
 $k_c$  = Força específica de corte [N/mm<sup>2</sup>];  
 $f$  = Avanço [mm] e;  
 $d$  = Diâmetro da broca [mm].

#### ➤ Potência de corte ( $P_c$ )

É resultante do produto entre o momento torçor e a velocidade angular da ferramenta [2, 5, 6].

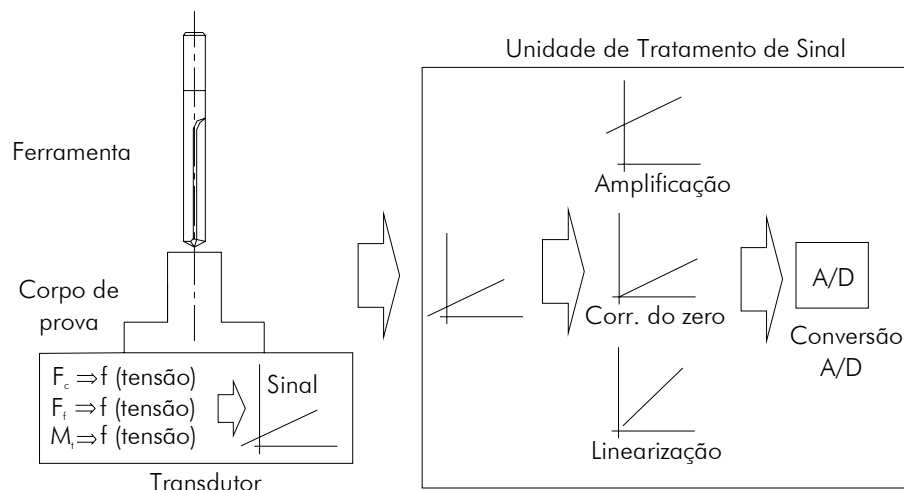
$$P_c = \frac{M_t \cdot n}{9,549} \quad (2.9)$$

Onde:  $P_c$  = Potência de corte [kW];

$M_t$  = Momento Torçor [Nm];  
 $n$  = Rotação da ferramenta [rpm].

### 2.9.1 Determinação das forças na furação

A determinação das componentes da força de furação é normalmente feita com o emprego de dinamômetros especificamente projetados para esta finalidade. Atualmente, os sistemas mais conhecidos são os que utilizam transdutores de força piezelétricos, que constituem as chamadas plataformas piezelétricas. Estes sistemas utilizam as propriedades de certos materiais, como os de quartzo e de turmalina, de emitirem um sinal elétrico proporcional à deformação sofrida devido a um determinado carregamento. A utilização prática deste efeito se dá através da amplificação e digitalização deste sinal elétrico, permitindo assim uma análise quantitativa e qualitativa das forças surgidas durante o processo, bem como o tratamento matemático através de um software apropriado, **Figura 2.41**.



**Figura 2.41** – Medição de forças com plataforma piezelétrica [18]

A maioria dos dinamômetros existentes pode medir diretamente a força de avanço ( $F_i$ ) e o momento gerado no processo ( $M_t$ ) a partir do qual pode ser calculada a força principal de corte ( $F_c$ ) pela seguinte expressão [1]:

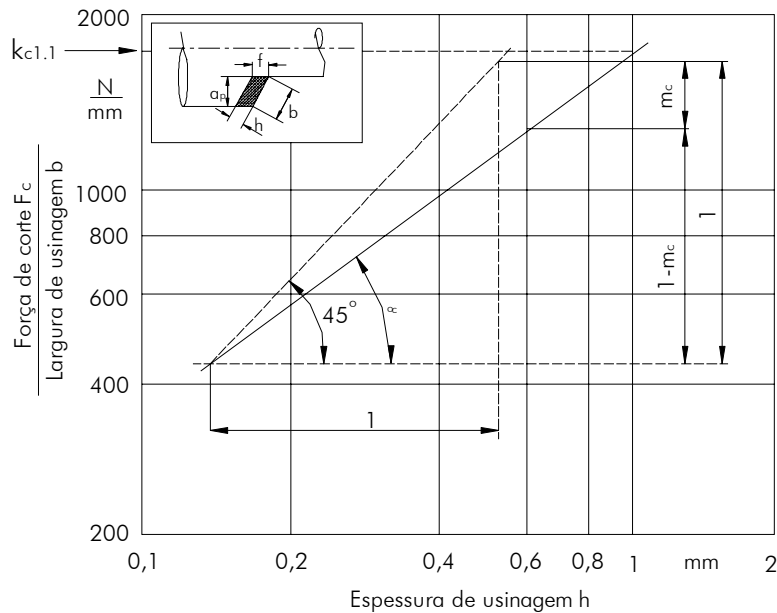
$$F_c = \frac{2000 \cdot M_t}{d} \tag{2.10}$$

Onde:  $F_c$  = Força de corte [N];  
 $M_t$  = Momento Torçor [Nm] e;  
 $d$  = Diâmetro da broca [mm].

### 2.9.2 Equação de Kienzle

Baseados nas diversas estratégias e considerações dos processos de usinagem com ferramentas de geometria definida, vários estudos têm sido desenvolvidos na busca de um modelo que represente de forma adequada o comportamento das forças de corte. A maioria dos modelos até hoje desenvolvidos para simular o comportamento das forças na usinagem baseia-se em dados de força obtidos experimentalmente e na formulação de uma sistemática para previsão destas forças para casos gerais.

O modelo de Kienzle (1951) descreve o comportamento das forças na usinagem e adota uma função potencial, desenvolvida para processos de torneamento em geral [51, 52]. Este modelo estabelece uma relação não-linear entre a força específica de corte e a espessura de usinagem  $h$ , que pode ser representada como uma reta no intervalo de espessuras de usinagem pesquisado ( $100 \mu\text{m} < h < 1 \text{ mm}$ ), em escala bilogarítmica, conforme mostrado na **Figura 2.42**.



**Figura 2.42** – Determinação gráfica da força específica de corte segundo Kienzle [6]

A equação de Kienzle, **Equação 2.11**, fornece embasamento para determinar a força de corte e a potência de usinagem, e para estimar os esforços que agem tanto na máquina-ferramenta quanto na peça e na ferramenta, em diversas condições de trabalho. Para isso, é necessário que sejam experimentalmente determinadas as constantes da equação de Kienzle (1): " $k_{c1.1}$ " e " $1-m_c$ ".

$$F_c = b \cdot h^{1-m_c} \cdot k_{c1.1} \quad (2.11)$$

Onde:  $F_c$  = Força de corte [N];  
 $b$  = Largura do cavaco [mm];  
 $h$  = espessura do cavaco [mm];  
 $1-m_c$  = expoente que quantifica a influência de  $h$  na força de corte;  
 $k_{c1.1}$  = força específica de corte para um cavaco de  $b \cdot h = 1 \text{ mm}^2$  [N/mm<sup>2</sup>].

As constantes são características da usinabilidade de cada material e, portanto, deveriam ser independentes do processo de usinagem. Na prática, a aplicação da equação de Kienzle é possível com a definição das constantes para cada processo de usinagem ou com a utilização de fatores de correção utilizando os valores das constantes de um processo específico de referência. Pesquisadores como Witte, em 1980, e Rocha, em 1985, verificaram a aplicação deste modelo na determinação da força de corte na furação e calcularam fatores de correção para furação em relação ao processo de torneamento.

## 2.10 Meios Lubri-refrigerantes

Os meios lubri-refrigerantes são utilizados na indústria para melhorar o desempenho e a vida das ferramentas de corte. Além disso, constituem um fator chave na produtividade e qualidade dos componentes usinados [53].

A função principal dos meios lubri-refrigerantes é o controle da temperatura, através da lubrificação e refrigeração das zonas de corte. A aplicação destes também melhora a qualidade da peça usinada pela contínua remoção dos cavacos da ferramenta e da zona de corte [6, 53, 54, 55].

Os meios lubri-refrigerantes devem fornecer um bom ambiente de trabalho e serem seguros e efetivos durante as operações de usinagem. Além disso, devem apresentar algumas características importantes [2, 16, 53]:

- Proteção contra corrosão;
- Estabilidade durante o uso;
- Manter um odor tolerável;
- Transparência e viscosidade;
- Não atacar a peça nem a máquina-ferramenta;
- Não afetar a saúde;

- Não gerar névoas ou gases;
- Ter resistência à ação de bactérias e fungos;
- Não ser inflamável.

### 2.10.1 Tipos de meios lubri-refrigerantes

Os meios lubri-refrigerantes podem ser classificados em quatro grupos distintos [2, 16]:

**a) Miscíveis em água:** são geralmente compostos de 60 a 90% de derivados de petróleo ou óleo mineral, emulsificantes e outros aditivos. Uma concentração é misturada com água para formar o fluido de corte. Quando são misturados, os emulsificantes, causam uma dispersão do óleo na água formando uma emulsão estável óleo-água. Os emulsificantes fazem com que o óleo se fixe na peça durante a usinagem. As partículas de emulsificante refratam a luz, dando uma aparência opaca e leitosa ao fluido de corte.

Dentre as vantagens deste grupo, tem-se que fornecem uma camada protetora contra a corrosão de óleo sobre os componentes móveis da máquina e a peça e apresentam boa capacidade de refrigeração e lubrificação. As desvantagens são que podem formar precipitações na máquina, exigem maiores custos de manutenção e apresentam maior suscetibilidade à corrosão, crescimento de bactérias e perdas por evaporação [53].

**b) Não-miscíveis em água:** são chamados de óleos integrais de corte, porque não contém água e são compostos basicamente de petróleo ou óleo mineral. Representam 60% dos produtos lubri-refrigerantes consumidos. A maior vantagem destes fluidos é a excelente lubrificação que oferecem entre a peça e a ferramenta de corte. Oferecem também boa proteção contra a corrosão, são de fácil manutenção e resistentes às bactérias. Como desvantagens dos óleos não miscíveis em água podem-se citar a pobre capacidade de dissipação de calor e risco de incêndio, bem como a possibilidade de produzir fumaças prejudiciais para o operador, criam uma camada de óleo na peça que dificulta a sua limpeza e geralmente exigem o uso de solventes para eliminar os resíduos [2, 16, 53].

**c) Gases e névoas:** o uso de gases como o argônio, hélio, nitrogênio e dióxido de carbono sob a forma de névoas de óleo com ar comprimido tem sido testado com

êxito em alguns processos, com o objetivo de prevenir a oxidação da peça e do cavaco. O custo destes elementos é muito elevado, sendo aplicados apenas em casos especiais [16, 22].

b) **Sólidos:** os sólidos são utilizados apenas para a lubrificação no processo de usinagem. O bissulfeto de molibdênio  $\text{MoS}_2$  é usado como meio lubri-refrigerante pelas suas características de lubrificante em condições de extrema pressão, tal qual o grafite. Estes são aplicados na superfície de saída da ferramenta antes de iniciar o processo de corte, o que reduz o coeficiente de atrito entre as partes, facilitando o corte. Aditivos aplicados na fabricação de aços de baixo carbono, como chumbo ou enxofre, desempenham um papel notável de lubrificante interno, facilitando a usinagem [2].

## 2.11 Ferro Fundido Cinzento

O ferro fundido cinzento é uma liga ferro-carbono-silício, de teores de carbono geralmente acima de 2,0%. A sua composição química varia de 93 a 93,8% de ferro, 2,5 a 4% de carbono e 1 a 3% de silício.

O carbono e o silício promovem a formação de grafita que aumenta conforme o aumento da percentagem desses elementos. O carbono no ferro fundido cinzento pode existir na forma de grafita ou como carboneto de ferro. Se a grafitização é completa, o ferro fundido cinzento terá lamelas de grafita com uma matriz ferrítica, o que resultará em uma excelente estabilidade. As lamelas de grafita concentram esforços, causando baixa resistência e ductibilidade. No entanto, o ferro fundido cinzento possui várias propriedades positivas: resistência à compressão, resistência ao desgaste por atrito e à fadiga térmica, boa condutividade térmica e amortecimento de vibrações. Tais propriedades fazem com que o ferro fundido seja usado em grande variedade de aplicações na indústria metal-mecânica [6, 56, 57, 58, 59].

Na classificação adotada pela ABNT, o ferro fundido cinzento é representado pelas iniciais FC, seguido por dois algarismos que representam o limite mínimo de resistência à tração. A **Tabela 2.3** mostra esta classificação e suas correspondentes em outras normas internacionais incluindo a norma DIN que representa o ferro fundido cinzento com as letra GG.

Tabela 2.3 – Classificação dos ferros fundidos cinzentos [58, 59]

| EQUIVALÊNCIAS INTERNACIONAIS DOS FERROS FUNDIDOS CINZENTOS |                          |                     |                 |                    |                      |                    |                        |                                |  |
|--|--------------------------|---------------------|-----------------|--------------------|----------------------|--------------------|------------------------|--------------------------------|--|
| ABNT EB-126  | EURO STD BS EM 1561 1997 | UK STD BS 1452 1990 | USA ASTM A48-83 | ITÁLIA UNI 5007-69 | SUÉCIA MNC 70SE 1984 | JAPÃO J159 5501-76 | ALEMANHA DIN 1691 1995 | RESISTÊNCIA À TRAÇÃO Mpa (Min) |  |
|  |                          |                     | 20A             |                    |                      |                    |                        | 138                            |  |
| FC15   | EN-GJL-150               | 150                 |                 | G15                | 01.15.00             | FC15               | GG15                   | 150                            |  |
|  |                          |                     | 25A             |                    |                      |                    |                        | 172                            |  |
|  |                          | 180                 |                 |                    |                      |                    |                        | 180                            |  |
| FC20   | EN-GJL-200               | 200                 |                 | G20                | 01.20.00             | FC20               | GG20                   | 200                            |  |
|  |                          |                     | 30A             |                    |                      |                    |                        | 207                            |  |
|  |                          | 220                 |                 |                    |                      |                    |                        | 220                            |  |
|  |                          |                     | 35A             |                    |                      |                    |                        | 241                            |  |
| FC25   | EN-GJL-250               | 250                 |                 | G25                | 01.25.00             | FC25               | <b>GG25</b>            | 250                            |  |
|  |                          |                     | 40A             |                    |                      |                    |                        | 260                            |  |
|  |                          |                     | 45A             |                    |                      |                    |                        | 276                            |  |
| FC30   | EN-GJL-300               | 300                 |                 | G30                | 01.30.00             | FC30               | GG30                   | 300                            |  |
|  |                          |                     | 50A             |                    |                      |                    |                        | 310                            |  |
|  |                          |                     |                 |                    |                      |                    |                        | 345                            |  |

### 2.11.1 Usinabilidade do ferro fundido cinzento

O ferro fundido cinzento geralmente apresenta uma boa usinabilidade devido à presença de carbono livre ou grafita em forma de lamelas na sua microestrutura [60]. A presença de grafita livre em forma de lamelas facilita a formação do cavaco, devido ao efeito lubrificante desta. Apesar disso, existem situações onde essa relativa boa usinabilidade varia consideravelmente de um lote de fundição para outro. Esta variação é usualmente medida pelas diferenças na vida da ferramenta, potência requerida, volume de material removido e acabamento superficial [61]. Muitas vezes, essas diferenças na usinabilidade ocorrem sem mudanças óbvias na microestrutura do material. Isso faz com que seja indispensável tomar cuidados especiais no processo de fundição, para evitar a formação de carbonetos.

A dureza não é um indicador de usinabilidade tão eficiente para o ferro fundido (como ocorre com os aços). Nesse caso, a microestrutura exerce papel mais preponderante. A seguir, é apresentada a influência de vários constituintes da matriz do ferro fundido sobre a vida da ferramenta [61].

a) **Ferrita:** é um constituinte essencialmente livre de carbono. Com exceção da grafita, apresenta dureza mais baixa, se comparada com os demais constituintes.

b) **Perlita:** é o mais comum constituinte nos ferros fundidos. Apresenta resistência e dureza média. É composta de uma estrutura fina, alternada de ferrita mole e carbonetos duros. Essa estrutura pode variar entre fina e grossa. A estrutura fina é mais dura e é usinada a menores velocidades de corte. A perlita no ferro fornece a melhor combinação entre usinabilidade e resistência ao desgaste.

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

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

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

f) **Carbonetos:** são constituintes extremamente duros, variando desde simples carbonetos de ferro até complexos carbonetos contendo elementos de liga. A presença de carbonetos em forma de finas camadas na estrutura perlítica, devido à facilidade de cisalhamento, não representa prejuízo na vida da ferramenta. Maiores quantidades de carbonetos no ferro fundido, como constituintes livres, causam diminuição da usinabilidade. Uma concentração de 5% de carbonetos livres pode significar uma



diminuição significativa na vida da ferramenta. Os carbonetos podem estar presentes nas extremidades das peças fundidas devido ao rápido resfriamento dessas regiões.

**g) Esteadita:** é um constituinte duro, formado pela presença de fósforo no ferro fundido. Com um conteúdo de fósforo inferior a 0,2%, não exerce um efeito significativo na vida da ferramenta. Para concentrações da ordem de 0,4%, a usinabilidade é comprometida em operações críticas tais como rosqueamento. Maiores quantidades de fósforo reduzem significativamente a vida da ferramenta.

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

## 2.12 Custos da Usinagem

A determinação de condições econômicas de usinagem é parte essencial na otimização de processos de manufatura e constitui um objeto de primeira necessidade para afrontar as condições dos mercados cada vez mais competitivos.

A velocidade de corte é um parâmetro muito importante nos aspectos econômicos da usinagem, já que a escolha da mesma determina em grande parte os custos de fabricação. O tempo de usinagem, a vida da ferramenta e o acabamento da superfície da peça são fatores que estão diretamente relacionados com a velocidade de corte [20].

Os custos envolvidos na produção de uma peça podem ser divididos em duas categorias, primeiro os custos devidos ao processo propriamente dito, como custo de ocupação das máquinas e dos operadores. Segundo, aqueles custos não diretamente envolvidos com o processo, como custo de controle de qualidade, custo da matéria-prima, custo da mão-de-obra indireta etc. Para a análise de custos com o fim de se obter a velocidade econômica de corte, só é necessário considerar a primeira categoria de custos, os custos diretamente envolvidos com o produção de uma peça por usinagem [4].

Segundo König apud Bertol [62], os custos devidos ao processo de fabricação por peça estão compostos por três parcelas, **Equação 2.12:**

- custos para preparação e tempos secundários - custos fixos (1);

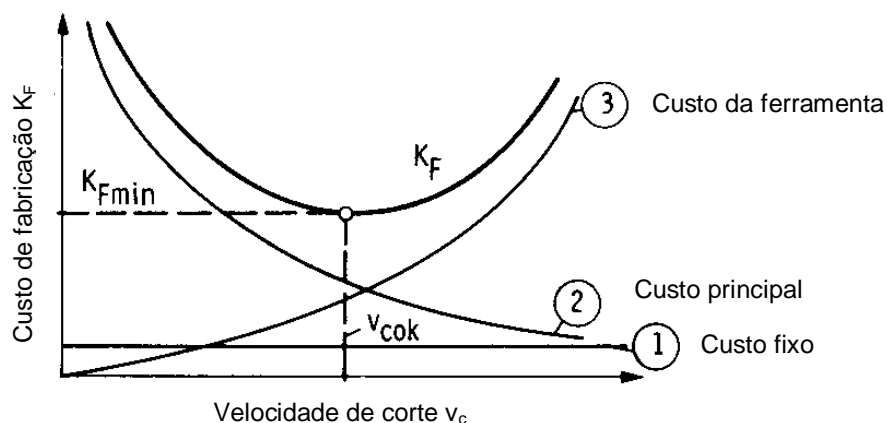
- custos de máquina-ferramenta e do operador - custo principal (2);
- custo de ferramentas (3).

$$K_F = K_{ML} \left( \frac{t_r}{m} + t_n \right) + K_{ML} + t_h \cdot \frac{t_w}{T} (K_{ML} \cdot t_w + K_{WT}) \quad (2.12)$$

(1)            (2)            (3)

Onde:  $K_F$  = custo de fabricação por peça [\$/peça]  
 $K_{ML}$  = custo de máquina e operador por hora [\$/h]  
 $K_{WT}$  = custo de ferramenta por vida [\$]  
 $t_r$  = tempo de preparação [min]  
 $t_n$  = tempos secundários [min]  
 $t_h$  = tempo principal [min]  
 $t_w$  = tempo de troca da ferramenta [min]  
 $T$  = vida da ferramenta [min]  
 $m$  = tamanho do lote

O comportamento do custo de fabricação e o comportamento dos custos isolados em dependência da velocidade de corte são mostrados na **Figura 2.43**. Com o aumento da velocidade de corte os custos de fabricação não podem ser reduzidos continuamente. Em decorrência da diminuição da vida da ferramenta com o aumento da velocidade de corte, o número de trocas de ferramentas torna-se mais freqüente, tendo-se assim um crescimento do custo de ferramenta. Além do aumento do tempo de fabricação decorrente das paradas da máquina para a substituição da ferramenta [6].



**Figura 2.43** – Custo de fabricação e parcelas de custos envolvidas no processo [6]

Na furação o tempo principal pode ser calculado pela equação:

$$t_h = \frac{l}{f * n} \quad (2.13)$$

O tempo de fabricação resulta de:

$$t_e = \left(\frac{t_r}{m} + t_n\right) + t_h + t_w \cdot \frac{t_h}{T} \quad (2.14)$$

Introduzindo a equação de Taylor (2.15) na equação de custos de fabricação (2.12) e pela diferenciação segundo a variável  $v_c$ , é possível a dedução de algumas das funções de otimização da usinagem [6].

$$T = v_c^k \cdot C_v \quad (2.15)$$

Onde:  $T$  = vida da ferramenta;

$C_v$  = constante que representa a vida  $T$  para uma  $v_c = 1$  m/min;

$k$  = coeficiente angular da reta  $T - v_c$ .

Velocidade de ótimos custos  $v_{cok}$  :

$$v_{cok} = \sqrt[k]{-(k+1) \cdot \frac{\left(t_w + \frac{K_{WT}}{K_{ML}}\right)}{C_v}} \quad (2.16)$$

Pela introdução da equação (2.16) na equação (2.15) obtém-se a vida de ótimos custos  $T_{ok}$  :

$$T_{ok} = -(t_w + 1) \cdot \left[t_w + \frac{K_{WT}}{K_{ML}}\right] \quad (2.17)$$

A determinação da velocidade de corte para ótimo tempo de produção  $v_{coz}$  é feita de forma análoga:

$$v_{coz} = \sqrt{-(k+1) \cdot \frac{t_w}{C_v}} \quad (2.18)$$

Substituindo na equação de Taylor (2.15) a equação (2.18) determina-se a vida de ótimo tempo de produção  $T_{oz}$  :

$$T_{oz} = -(k+1)t_w \quad (2.19)$$

### 3 MATERIAIS E MÉTODOS

Este capítulo traz uma descrição dos materiais, ferramentas, equipamentos e métodos utilizados na realização dos experimentos, assim como a sistemática utilizada para sua realização. Uma parte dos experimentos foi desenvolvida no Laboratório de Mecânica de Precisão (LMP) e outra parte em uma empresa do ramo metal-mecânico.

#### 3.1 Corpos de Prova

Os corpos de prova utilizados nos ensaios foram peças cilíndricas de ferro fundido cinzento GG25, com 72 mm de comprimento e 16 mm de diâmetro (**Figura 3.1**).



**Figura 3.1** – Corpos de prova ensaiados

A escolha dos corpos de prova foi motivada por vários aspectos importantes:

- Matéria-prima bruta utilizada na indústria para a fabricação de peças automotivas (evitando assim, a fabricação de corpos de prova específicos para testes);
- Microestrutura e propriedades mecânicas idênticas ao material utilizado em linha de produção de autopeças;
- Facilidade para a realização dos ensaios de desgaste em linha de produção;
- Facilidade de fixação das peças na placa de três castanhas para os experimentos de aquisição de forças;
- Aproveitamento posterior da maioria das peças usinadas.

### 3.1.1 Material dos corpos de prova

O material utilizado para os corpos de prova foi ferro fundido cinzento GG25, de forma cilíndrica, torneado e faceado. A análise química fornecida pelo fabricante é mostrada na **Tabela 3.1**:

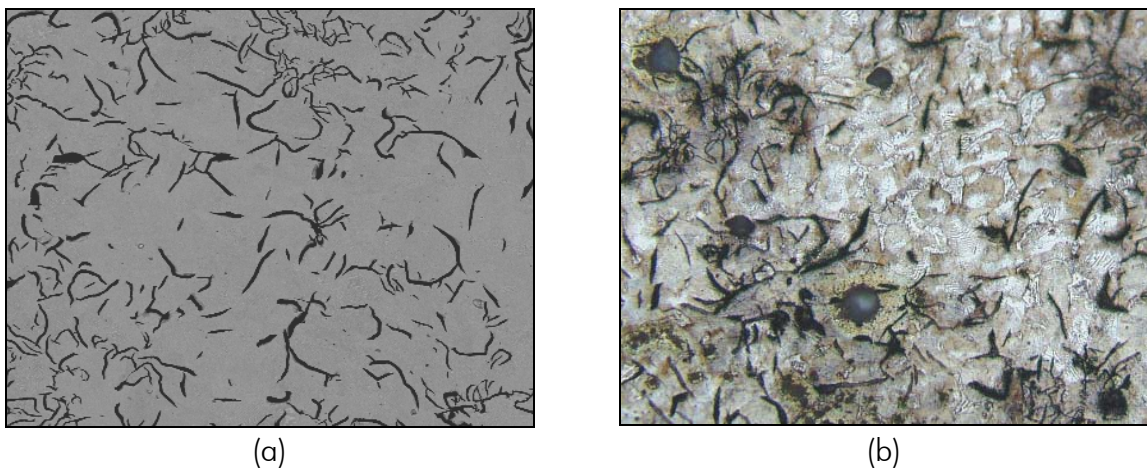
**Tabela 3.1** – Composição química do ferro fundido cinzento GG25

| C [%] | Sn [%] | Cr [%] | Mo [%] | Cu [%] | Si [%] | Mn [%] | P [%] | S [%] |
|-------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|-------|-------|
| 3,06  | 0,11   | 0,07   | 0,003  | 0,61   | 2,00   | 0,90   | 0,60  | 0,125 |

### 3.1.2 Análise microestrutural

Foi realizada a análise da microestrutura em seções transversais dos corpos de prova. As amostras foram submetidas a polimento e análise para caracterizar o tipo de grafita. Posteriormente, foi feito um ataque químico com nital a 2% de concentração, para avaliar as porcentagens de grafita e perlita.

As imagens foram registradas com uma câmera Sony CCD Iris/RGB acoplada a um microscópio Olympus BX 60 com aumento mínimo de 50 e máximo de 1.500 vezes. A **Figura 3.2** mostra as imagens obtidas para a análise microestrutural do ferro fundido cinzento GG25.



**Figura 3.2** – Micrografia do ferro fundido cinzento GG25; a) sem ataque 150x; b) com ataque de nital 2% 200x.

Outro ensaio realizado para a caracterização do material usinado foi a medição da dureza Brinell por meio de um durômetro da marca Wolpert com capacidade máxima de 250 kgf. Esta foi feita com esfera de 2,5 mm e com carga de 187,5 kgf. Os valores de dureza estão contidos na **Tabela 3.2**.

**Tabela 3.2** – Dureza Brinell dos corpos de prova

| Ferro fundido cinzento GG25 |     |
|-----------------------------|-----|
| Dureza média [HB]           | 260 |
| Desvio padrão [HB]          | 10  |

### 3.2 Máquina-ferramenta

Os ensaios de aquisição de forças foram realizados em uma fresadora CNC de três eixos da marca Romi Polaris F400, mostrada na **Figura 3.3**, instalada no Laboratório de Mecânica de Precisão (LMP) – UFSC. A máquina dispõe de uma árvore vertical com rotação máxima de 6.000 rpm. Nesta máquina, foi necessária a instalação de um sistema de fluido de corte de alta pressão. Esse sistema é composto por um reservatório com capacidade de 300 litros, uma bomba de engrenagens de alta pressão, mangueira, válvulas e manômetro. O sistema pode atingir uma pressão máxima de 200 bar, porém o mandril rotativo com fluido interno trabalha com a pressão máxima de 90 bar.

**Figura 3.3** – Fresadora utilizada na realização dos ensaios de aquisição de forças

Para a realização dos ensaios de desgaste, foi utilizada uma furadeira de carro horizontal comandada por CLP, com rotação máxima de 5.000 rpm, instalada nas dependências da empresa parceira na pesquisa. A configuração da máquina é similar à mostrada na **Figura 2.13**, na qual a ferramenta é rotativa e a peça é submetida a um sistema de fixação pneumático. Esta é uma máquina dedicada e possui um alimentador de peças automático para diferentes tamanhos de peças (tamanhos entre 82XØ25 e 42XØ18 mm de comprimento e diâmetro respectivamente).

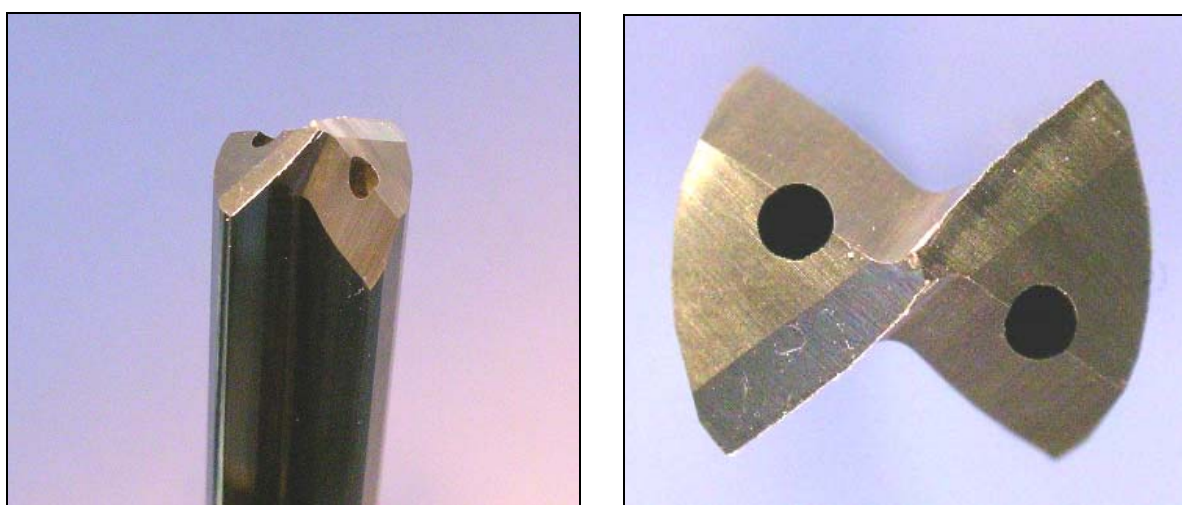
### 3.3 Ferramentas de Corte

Neste trabalho, foram utilizadas 20 brocas de metal-duro de canais retos com quatro geometrias de afiação diferentes, classificadas como geometrias A, B, C e D. As ferramentas foram ensaiadas em dois grupos, o primeiro grupo de oito brocas, com diâmetros 8,4 e 8,66 mm, para a realização dos ensaios preliminares e o segundo grupo de 12 brocas, de 9,55mm de diâmetro, para a execução dos ensaios de comparação de geometrias de afiação. A **Tabela 3.3** descreve as principais características das quatro geometrias das brocas testadas.

**Tabela 3.3** – Especificações das ferramentas utilizadas no trabalho

| Geometria                             | A    | B    | C    | D    |
|---------------------------------------|------|------|------|------|
| Ângulo de ponta $\sigma$ [°]          | 120  | 140  | 140  | 120  |
| Ângulo de incidência $\alpha$ [°]     | 12   | 14   | 14   | 20   |
| Ângulo de gume transversal $\psi$ [°] | 68   | 48   | 48   | 55   |
| Comprimento do gume transversal [mm]  | 0,64 | 0,63 | 0,63 | 0,30 |
| Largura da guia [mm]                  | 0,70 | 0,76 | 0,72 | 0,75 |

As ferramentas são fabricadas em metal-duro classe K20, possuem canais retos e furos internos de refrigeração. A **Figura 3.5** mostra as diferentes geometrias utilizadas ao longo do trabalho.



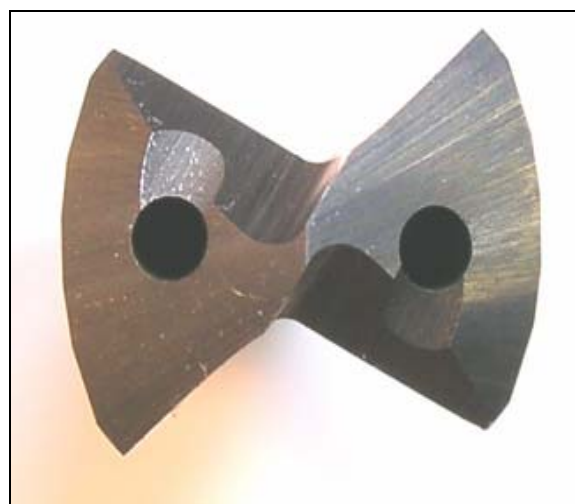
Geometria A

**Figura 3.4** – Geometrias de brocas testadas (continua)

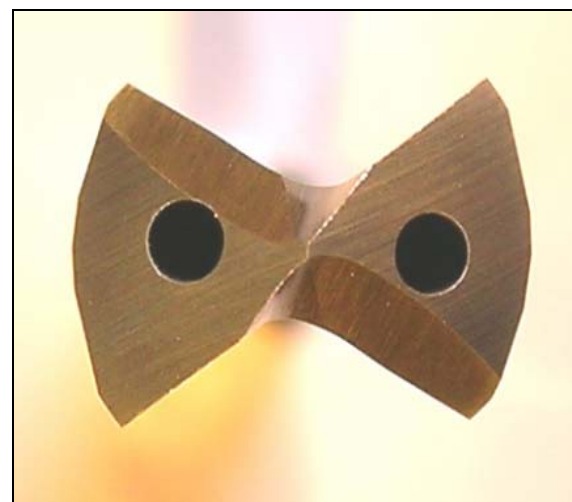




Geometria B



Geometria C



Geometria D

Figura 3.5 – Geometrias de brocas testadas



### 3.4 Parâmetros de Corte Utilizados

Para a realização dos ensaios de verificação da influência dos parâmetros de corte sobre as grandezas de saída do processo, foi tomada como base a série R10 para a seleção de medidas arbitrárias da norma DIN 323, que é comumente utilizada em experimentos na área de usinagem. Assim, as velocidades de corte escolhidas foram de 63, 80, 100 e 125 m/min enquanto que os avanços empregados foram de 0,063, 0,08, 0,1, 0,125, 0,16 e 0,2 mm [63].

A escolha dos parâmetros, utilizados nos ensaios de validação da metodologia para a avaliação dos esforços de usinagem e a qualidade da superfície, foi realizada com base em parâmetros de avanço e velocidades fornecidos pelo fabricante das ferramentas e dados de chão-de-fábrica. A velocidade de corte utilizada neste ensaio foi de 80 m/min e um avanço de 0,09 mm.

Para os ensaios da análise comparativa entre diferentes geometrias de afiação de ferramentas foram utilizadas três condições de usinagem. A **Tabela 3.4** mostra as condições de parâmetros utilizados nesse ensaio os quais foram escolhidos a partir da série de números normalizados R20, da norma DIN 323 [63].

**Tabela 3.4** – Parâmetros de corte utilizados em ensaios comparativos

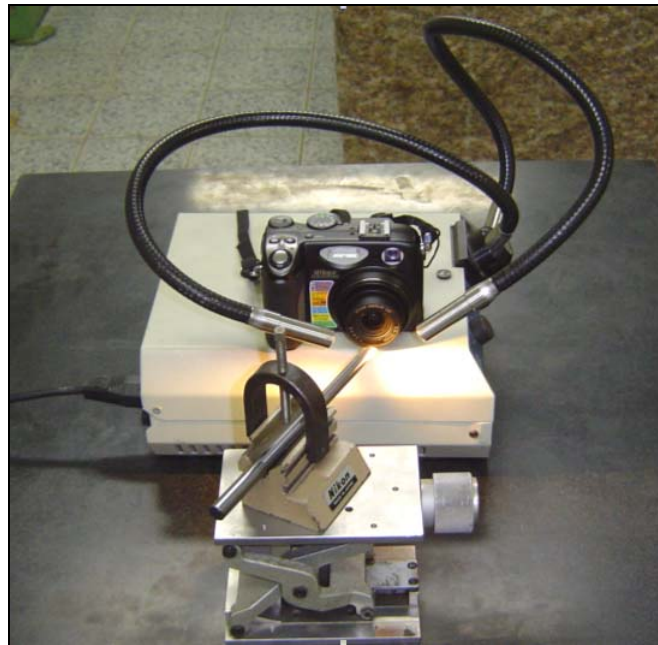
| Condição | $v_c$ [m/min] | f [mm] |
|----------|---------------|--------|
| 1        | 112           | 0,08   |
| 2        | 125           | 0,08   |
| 3        | 140           | 0,08   |

### 3.5 Meio Lubri-refrigerante

O fluido de corte utilizado foi emulsão de óleo semi-sintético, numa concentração de 8%, da marca Houghton Hocut 730. A alimentação do fluido foi realizada internamente através de furos de refrigeração nas ferramentas e utilizando um mandril rotativo com selo tipo *O'ring*. A pressão de injeção do fluido foi mantida constante a 25 bar para todos os ensaios. Essa pressão foi selecionada com base em informações de catálogos de fabricantes de ferramentas.

### 3.6 Medição de Desgastes

Para a avaliação dos desgastes foi utilizada uma metodologia que consiste em realizar a medição dos desgastes em chão-de-fábrica em intervalos definidos previamente. Foi utilizada uma câmara digital da marca Nikon com resolução de 5.1 megapixels com um sistema de iluminação e de posicionamento da ferramenta para garantir a repetitividade na aquisição das fotos (**Figura 3.6**). Posteriormente, através do software AutoCad® 2002, foram medidos os desgastes máximos de flanco  $VB_{max}$  utilizando as fotos de alta resolução registradas. Como ponto de referência para a medição dos desgastes máximos de flanco  $VB_{max}$ , foi utilizado o gume principal da ferramenta, conforme indicado anteriormente na **Figura 2.24**.



**Figura 3.6** – Sistema utilizado na aquisição de imagens de desgaste

Para o registro dos desgastes  $VB_{max}$ , foi realizada uma marcação em todas as ferramentas, a qual consiste da identificação dos gumes e de um código que identifica o tipo de geometria, número da broca e o número de furos usinados. Assim, foi medido o  $VB_{max}$  em ambos os gumes de cada ferramenta e foi tomado o maior desgaste entre as duas medições como representativo para os resultados. Tal procedimento foi adotado devido à diferença pouco significativa entre estas duas medições. A **Figura 3.7** mostra a foto de uma ferramenta usada na medição dos desgastes.

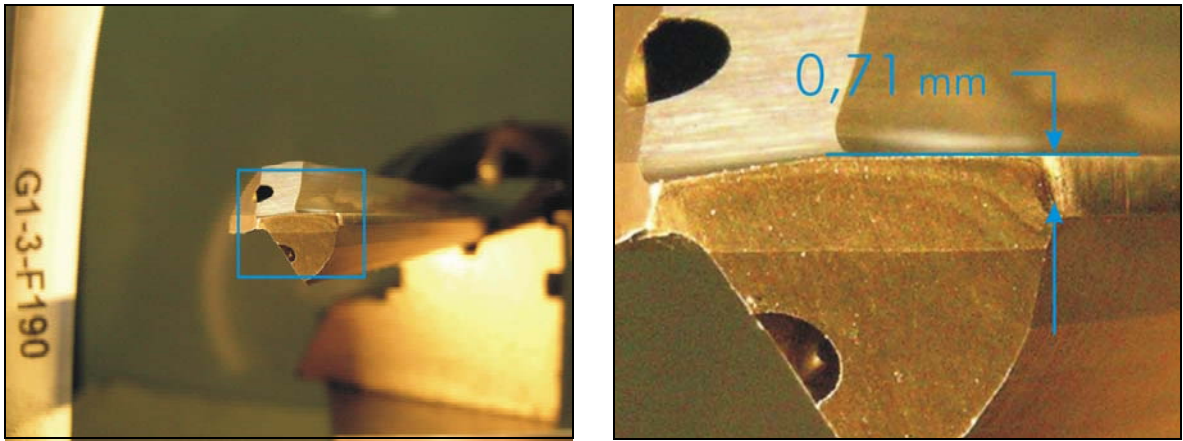


Figura 3.7 – Metodologia de medição do desgaste de flanco  $VB_{Max}$

### 3.7 Ensaios de Medição de Forças de Usinagem

Os ensaios de força têm como objetivo levantar parâmetros relacionados aos esforços gerados pelo processo em diversas condições de operação. Grandezas tais como: velocidade, avanço, geometria da ferramenta, vazão e pressão de fluido de corte, estado de desgaste da broca, entre outras, influenciam diretamente tais esforços. Os resultados obtidos permitirão o estabelecimento de relações entre os parâmetros dos ensaios com as forças geradas, com os resultados do processo de furação, principalmente com a qualidade dos furos e com os mecanismos de falha da ferramenta.

Podem ser citados como parâmetros de entrada do processo:

- Velocidade;
- Avanço;
- Geometria da ferramenta;
- Pressão e vazão do fluido de corte;
- Material usinado.

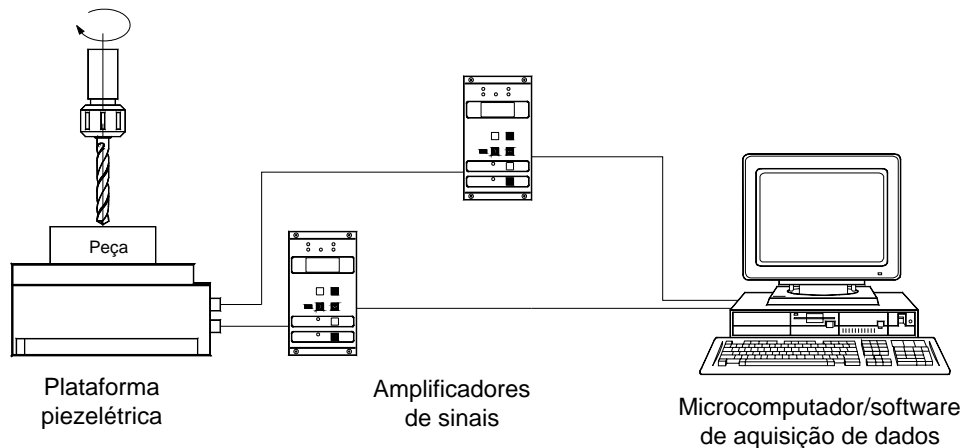
As grandezas de saída são:

- Força de avanço;
- Momento torçor
- Erros de circularidade;
- Erros de cilindridade;
- Diâmetro do furo;
- Qualidade da superfície usinada (Rugosidade).

### 3.7.1 Infra-estrutura dos ensaios

Em função do equipamento necessário para a implementação deste tipo de ensaio e aos problemas decorrentes da necessidade de se adaptar alguns deles numa linha de produção, como por exemplo a plataforma piezelétrica, os ensaios de força foram desenvolvidos no Laboratório de Mecânica de Precisão (LMP).

A **Figura 3.8** apresenta esquematicamente a infra-estrutura utilizada para a realização dos ensaios de aquisição de esforços. Os equipamentos que compõem este sistema são: uma plataforma piezelétrica para furação da marca Kistler Instrumente AG modelo 9273, dois amplificadores da marca Kistler Intrumente, modelo, 5011, uma placa de aquisição de dados da National Instruments, modelo SCB-68 e um microcomputador com software de aquisição de sinais. O sistema foi calibrado antes de os ensaios de aquisição serem iniciados.



**Figura 3.8**– Infra-estrutura do ensaio de força [13]

A plataforma piezelétrica foi montada na mesa da máquina, e sobre esta, uma placa de três castanhas, na qual foram fixados os corpos de prova. O sistema foi calibrado para medir forças de avanço entre 0 e 5.000 N e momentos torçores entre 0 e 1.000 N.cm, com erros menores do que 1% na faixa de medição utilizada. Foi definida uma freqüência de aquisição de 0,5 kHz e um tempo de aquisição de 25 segundos.

A **Figura 3.9** mostra a bancada de aquisição de sinais (microcomputador com placa de aquisição e amplificadores).



Figura 3.9 – Bancada de aquisição de sinais

### 3.7.2 Metodologia dos ensaios

A sistemática empregada na realização dos ensaios de aquisição de forças foi sempre a mesma ao longo do trabalho. De maneira geral, foram realizados três furos para cada ensaio e a aquisição ocorreu durante todo o processo de usinagem, ou seja, desde o início da furação até a saída da broca do corpo de prova. A frequência de aquisição utilizada foi de 0,5 kHz. Primeiramente, foram medidas a força de avanço e o momento torçor com as brocas novas. Para os ensaios preliminares, foram realizadas aquisições a cada 200 furos, até atingir o final de vida da ferramenta (independentemente do critério).

Para os ensaios de comparação de geometrias de ferramentas, foi medida a força de avanço e o momento torçor somente duas vezes: uma no início, com as ferramentas novas, e outra no final de vida de cada ferramenta. Para este ensaio, foi escolhido como critério de fim de vida a qualidade no acabamento do furo (*e.g.* marcas na parede do furo, rebarbas, quebra da borda).

### 3.7.3 Metodologia de avaliação

Para a avaliação dos resultados da aquisição de esforços da usinagem, adotou-se a média dos valores da força e momento dentro do intervalo de medição estabilizado, como mostra a **Figura 3.10**. Nesse intervalo, foram tomados 4.000 pontos e foi

calculada a média. Das três repetições do ensaio, foi calculada a média e a dispersão, para garantir a confiabilidade da medição.

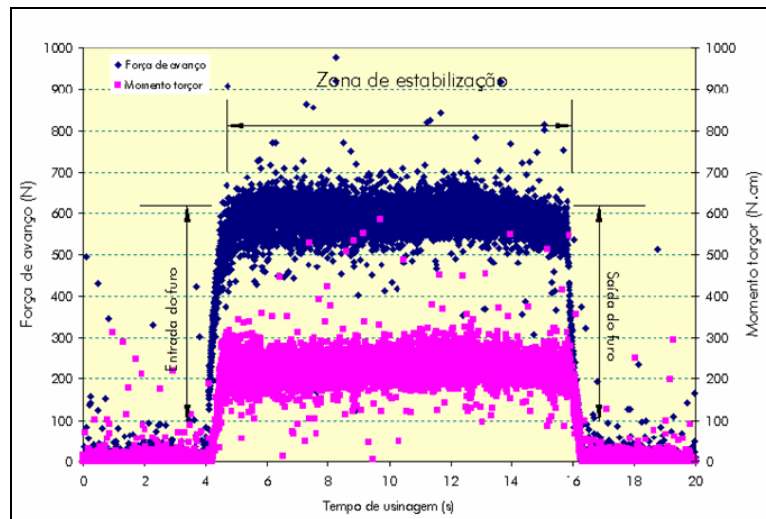


Figura 3.10 – Intervalo de medição de esforços

### 3.8 Avaliação da Qualidade dos Furos

Durante os ensaios de vida, foram coletadas peças para análise da qualidade dos furos em intervalos definidos, iguais ao intervalo de medição dos desgastes de flanco.

A qualidade dos furos foi avaliada através da análise de diferentes parâmetros, como o desvio de circularidade, o desvio de cilindricidade, o diâmetro médio e a rugosidade da parede do furo. Tal avaliação visa registrar a influência que a deterioração da ferramenta exerce sobre a qualidade dos furos.

#### 3.8.1 Metodologia de avaliação da qualidade dos furos

A metodologia utilizada na avaliação da qualidade dos furos foi baseada na coleta de corpos de prova em intervalos iguais aos definidos para a medição dos desgastes de flanco  $VB_{max}$ . A coleta foi iniciada com oito peças usinadas e realizada até o final de vida da ferramenta. Os corpos de prova selecionados foram devidamente limpos e codificados, com o objetivo de identificar a seqüência da peça e o número da ferramenta.

Como parâmetro de avaliação nas medições de rugosidade, foi escolhido o parâmetro  $R_a$ , pois este parâmetro é comumente utilizado no controle da qualidade de superfícies usinadas destinadas à indústria automotiva. Para garantir uma medição correta da rugosidade, foram feitas três leituras em três locais diferentes da parede do furo, tanto na entrada como na saída e foram calculadas a média das seis leituras e a

dispersão. Com o objetivo de evitar erros nas avaliações, todas as medições foram realizadas a uma distância aproximada de 3 mm da borda do furo.

Na avaliação do diâmetro dos corpos de prova, foi usado o mesmo critério: três medições na entrada e três na saída do furo. Foi calculada a média e a dispersão das medições. Do mesmo modo que na avaliação da rugosidade, todas as medições de diâmetro foram realizadas a uma distância aproximada de 3 mm da borda do furo.

A circularidade e a cilindridade foram medidas utilizando um circularímetro. Os corpos de prova são fixados e alinhados na mesa do aparelho, para posteriormente, por meio de um apalpador, serem realizadas três medições em diferentes seções ao longo do furo (entrada, meio e saída). Então, podem ser obtidos três valores de circularidade e um valor de cilindridade.

### 3.8.2 Equipamentos

Para a avaliação da qualidade dos furos foram utilizados os seguintes equipamentos:

*Rugosímetro*: na medição da rugosidade foi utilizado um rugosímetro da marca Mitutoyo, modelo SJ301, **Figura 3.11**.



**Figura 3.11** – Rugosímetro

*Circularímetro*: na avaliação dos desvios de cilindridade e circularidade dos corpos de prova coletados, foi utilizado um circularímetro da marca Mitutoyo, modelo RA-400 (**Figura 3.12**) do laboratório de metrologia da empresa parceira na pesquisa. A medição dos parâmetros cilindridade e circularidade foi realizada ao longo de todo o furo do corpo de prova.



Figura 3.12 – Circularímetro Mitutoyo RA-400

*Micrômetro interno de três pontos:* para quantificar os diâmetros dos furos, foi utilizado um micrômetro interno de três pontos, da marca Mitutoyo, na faixa de medição correspondente ao diâmetro dos furos dos corpos de prova (ver **Figura 3.13**).



Figura 3.13 – Micrômetro de três pontos



## 4 ANÁLISE DOS RESULTADOS

Neste capítulo são apresentados os resultados obtidos nos experimentos, na forma de gráficos, para posteriormente serem analisados. Inicialmente são mostradas as influências da variação da velocidade e do avanço sobre as grandezas de saída do processo de furação profunda.

Na seqüência, são mostrados ensaios preliminares realizados com o objetivo de determinar a vida média das ferramentas testadas. Além disso, os ensaios visam comprovar a validade da metodologia utilizada para a medição dos desgastes. Logo após é apresentada a comparação do desempenho das quatro geometrias de ferramentas testadas em função do desgaste, força de avanço, momento torçor, acabamento da superfície e tolerância dimensional.

### 4.1 Influências da Velocidade de Corte e do Avanço sobre as Grandezas de Saída no Processo de Furação Profunda de Ferro Fundido Cinzento GG25

Com o objetivo de verificar as influências da variação dos parâmetros de corte sobre o processo de furação profunda, foi planejado um ensaio no qual foram monitoradas as variáveis de saída do mesmo. Neste experimento foram avaliadas quatro ferramentas do mesmo lote de fabricação, com diâmetro de 8,66 mm, geometria de afiação A (**Tabela 3.3**). Para minimizar as influências do desgaste das ferramentas sobre os resultados do experimento, foram realizadas somente duas repetições para cada condição de parâmetros de forma totalmente aleatória. A realização de ensaios de forma totalmente aleatória permite proteger os resultados de fatores perturbadores que possam ter um efeito sobre os resultados [64].

#### 4.1.1 Análise da rugosidade dos furos

Conforme os resultados obtidos, é observado na **Figura 4.1** que a rugosidade do furo aumenta à medida que se aumenta o avanço. Em relação às velocidades de corte testadas, estas não têm influência significativa sobre o parâmetro de rugosidade. Apenas na velocidade de 63 m/min pode-se ver um melhor resultado da superfície usinada. Esse resultado pode ser decorrente da maior estabilidade do processo em baixas velocidades, onde as menores solicitações da máquina, em relação aos fenômenos dinâmicos como

por exemplo vibrações e desbalanceamentos, favorecem melhores resultados de rugosidade da superfície usinada [3, 5, 7, 16, 20, 31, 65].

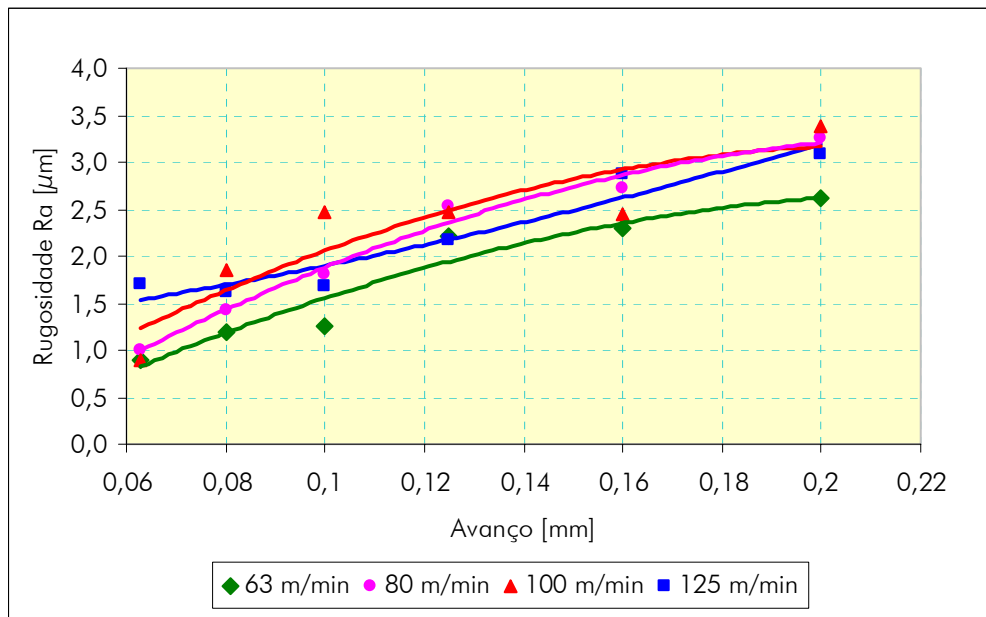


Figura 4.1 – Variação da rugosidade em função dos parâmetros de corte

#### 4.1.2 Análise do diâmetro dos furos

A análise da Figura 4.2 permite observar a ocorrência de dois fenômenos: o aumento do avanço da ferramenta causa um aumento do diâmetro do furo e o diâmetro dos furos torna-se maior à medida que se aumenta a velocidade de corte.

Uma explicação para tal comportamento poderia ser que à medida que a velocidade de corte ou avanço da ferramenta aumenta, ocorre um crescimento do grau de deformação do material que está em volta do furo, fazendo com que o diâmetro do furo sofra alterações. Outra hipótese para esse fenômeno seria que com o aumento dos parâmetros de corte, a estabilidade do processo esteja sendo perturbada pelas maiores vibrações e esforços gerados. Ferramentas ou porta-ferramentas desbalanceados, em altas velocidades, fazem com que o eixo de rotação do conjunto varie, provocando defeitos nos furos [5, 7, 16, 20, 31, 65].

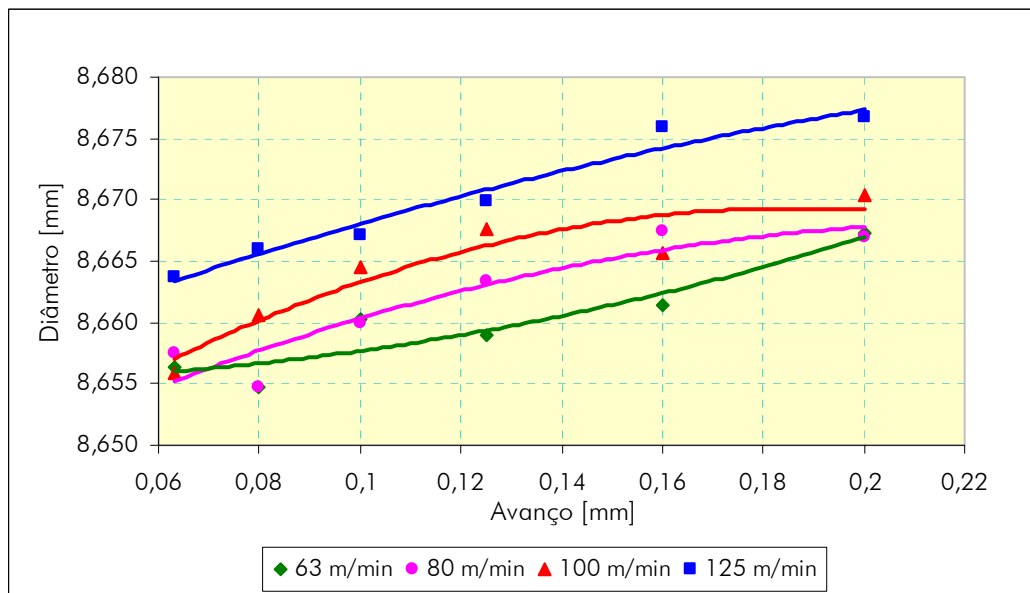


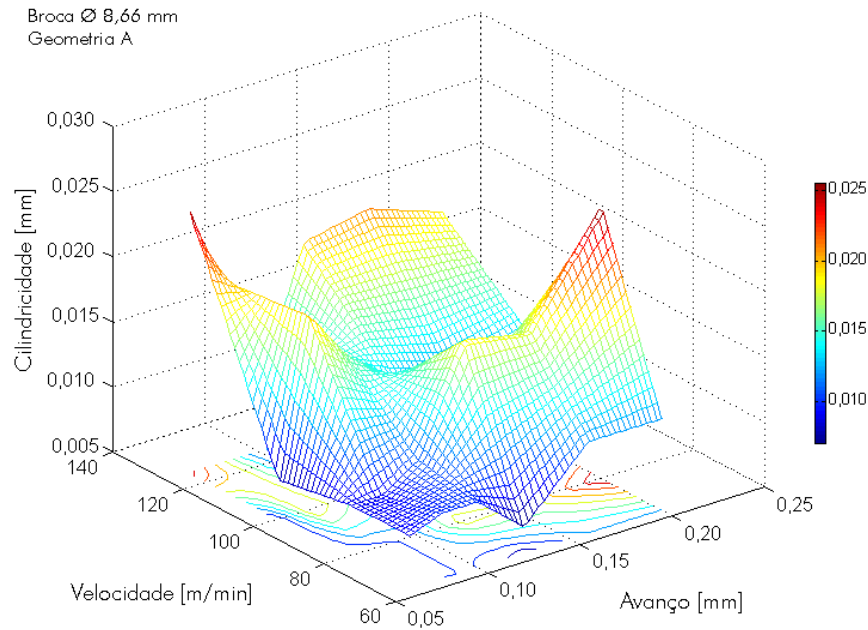
Figura 4.2 – Variação do diâmetro do furo em função dos parâmetros de corte

Nas condições testadas, a maior variação de diâmetro foi observada na condição de máxima velocidade, 125 m/min, confirmando assim a perturbação do processo nessa faixa de velocidade.

#### 4.1.3 Análise da cilindricidade

Conforme os resultados obtidos, os melhores valores de cilindricidade foram verificados para 63 m/min com avanços entre 0,063 e 0,12 mm (Figura 4.3). Já na faixa de velocidades e avanços máximos testados, os resultados não foram satisfatórios. A velocidade de corte pode exercer influência sobre as tolerâncias de cilindricidade [66]. Uma possível explicação para este fato pode estar relacionada com os maiores esforços gerados durante a usinagem, contribuindo a vibrações, deformações ou desbalanceamentos da máquina-ferramenta. Tais esforços repercutem negativamente nas tolerâncias de cilindricidade do furo [5, 16, 20, 31, 65, 66, 67].

## Gráfico de superfície



## Gráfico de contorno

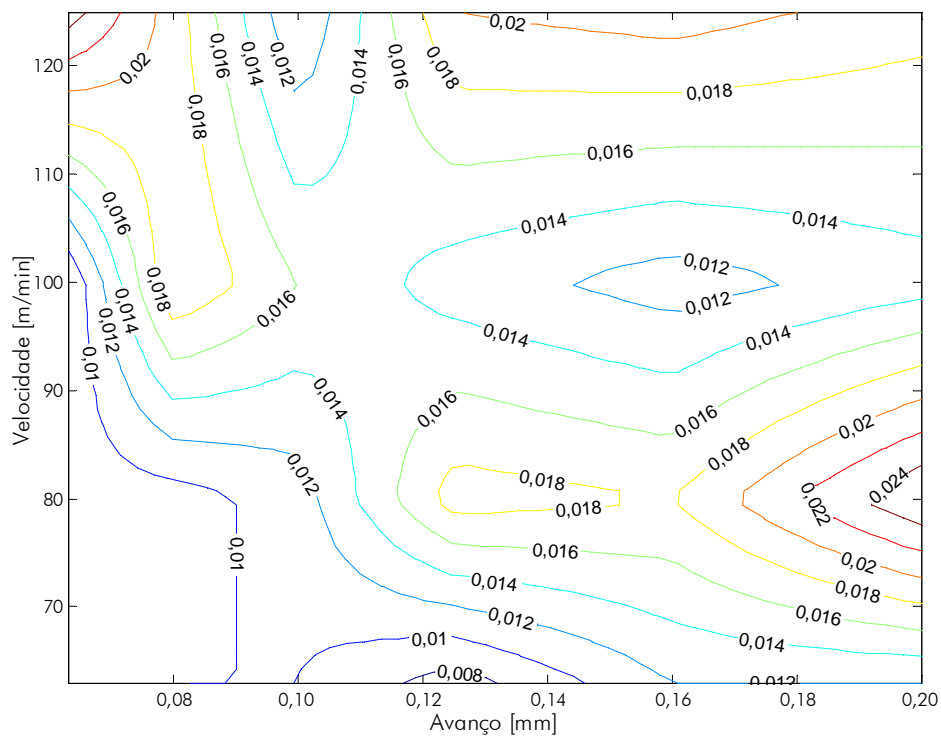


Figura 4.3 – Variação da cilindridade em função do avanço e da velocidade de corte

#### 4.1.4 Análise da circularidade

A circularidade não apresentou uma tendência definida em função da variação da velocidade e do avanço. Porém, da mesma forma como ocorreu com a tolerância de cilindridade, em maiores valores de avanço e velocidade a tolerância de circularidade aumenta. A **Figura 4.4** mostra que a variação da circularidade é pequena com a

variação da velocidade e do avanço. Pode-se observar que a circularidade oscila entre 3 a 9  $\mu\text{m}$  para todas as condições do ensaio. Esse comportamento pode ser devido às boas condições dos gumes das ferramentas testadas, lembrando que foram utilizadas ferramentas novas para minimizar a influência do desgaste durante o ensaio. O desgaste da ferramenta é o maior responsável pela dispersão nos valores de circularidade do furo. Gumes afiados numa broca garantem uma estabilidade na tolerância de circularidade do furo [5, 7, 20].

Gráfico de superfície

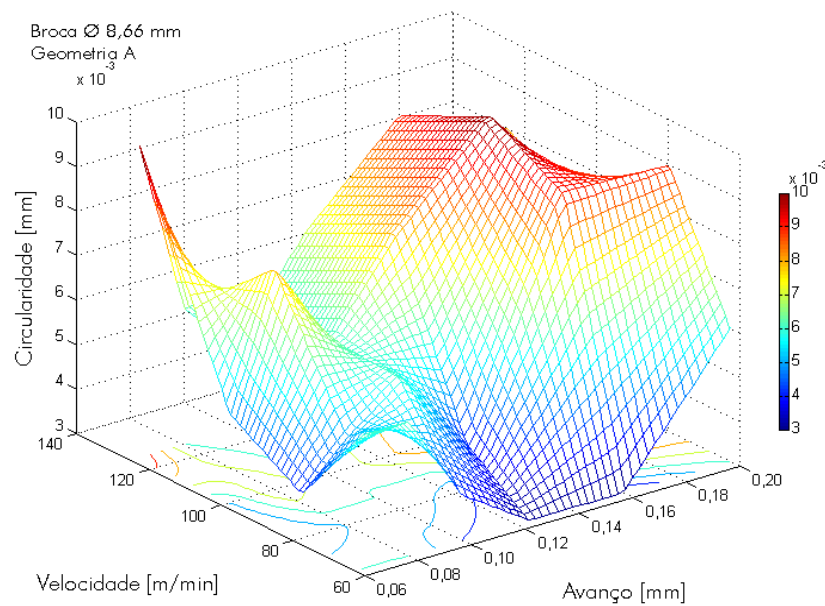


Gráfico de contorno

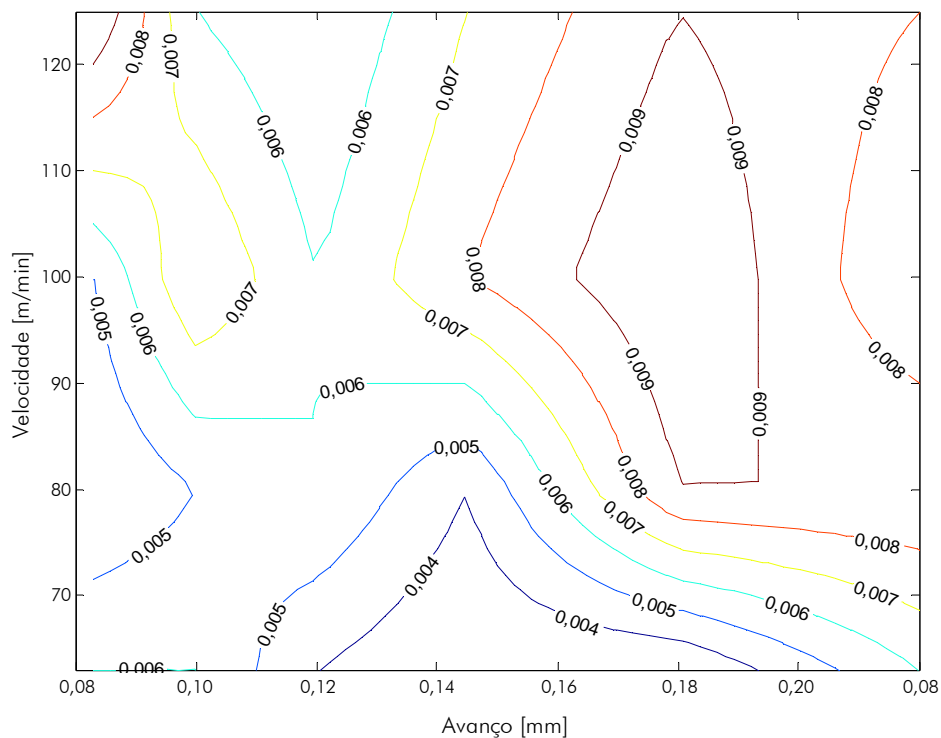
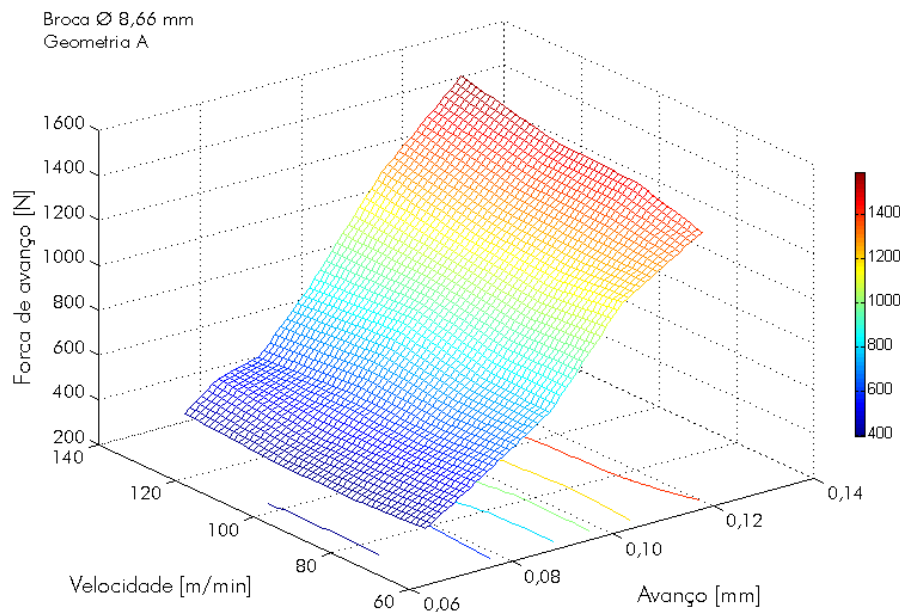


Figura 4.4 – Variação da circularidade em função do avanço e da velocidade de corte

#### 4.1.5 Análise dos esforços de usinagem

A **Figura 4.5** mostra a baixa influência da velocidade de corte sobre a força de avanço na faixa de velocidades testadas. Nas três condições de velocidade, a força de avanço teve pouca variação. Por outro lado, a relação direta que existe entre a espessura do cavaco e a força de avanço faz com que à medida que aumenta o avanço, a força aumenta significativamente [4, 5, 6, 8, 9, 16, 51, 68, 69]. Com uma maior espessura de usinagem, a resistência ao corte do material, no sentido da penetração da ferramenta, aumenta, resultando num incremento na força de avanço.

Da mesma forma, na faixa de parâmetros testados, o momento torçor aumenta proporcionalmente com o aumento do avanço. Em comparação com esforços no torneamento, os esforços na furação (mantendo-se as demais condições de contorno constantes) mostram que existem forças de corte e de avanço mais elevadas neste processo. Este aumento é decorrente do atrito dos cavacos na parede do furo e do comprimento do gume transversal que influencia o valor das forças totais [20].



**Figura 4.5** – Variação da força em função do avanço e a velocidade de corte

Quanto mais exíguo for o espaço para a saída dos cavacos em relação ao volume de cavacos produzidos, maior será o momento torçor e a força de avanço necessária. Assim, pode-se explicar o aumento da força de avanço e do momento torçor, devido às parcelas de atrito das guias na parede do furo e aos fenômenos de extrusão na região do gume transversal gerados com o aumento do avanço, **Figura 4.5** e **Figura 4.6** [2, 4, 6, 7, 20, 68, 70].

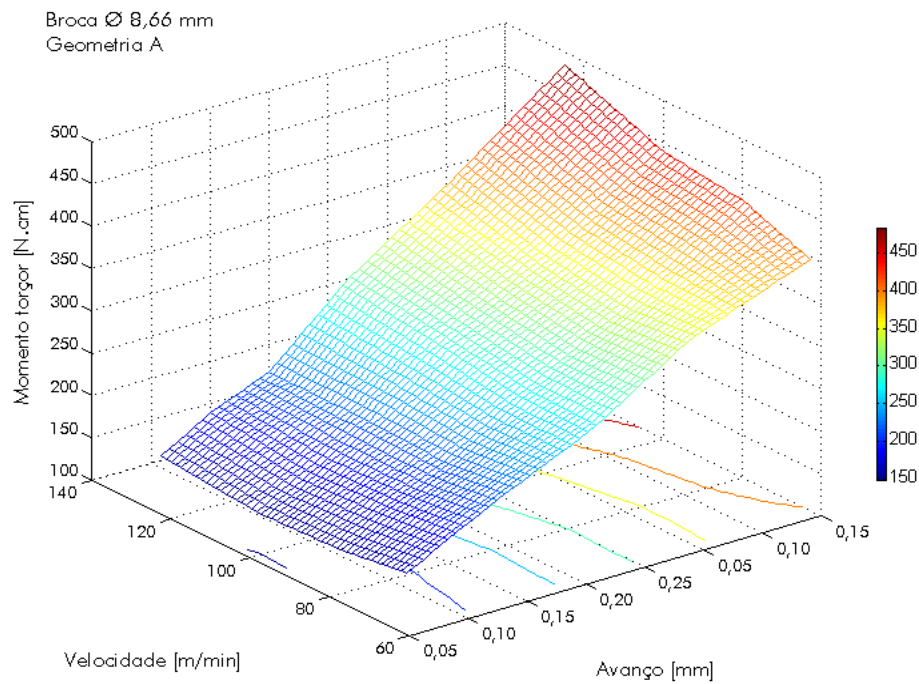


Figura 4.6 – Variação do momento torçor em função do avanço e a velocidade de corte

## 4.2 Validação da Metodologia Utilizada na Avaliação das Forças de Usinagem e desgastes

Com o objetivo de validar a metodologia planejada, foi realizado um teste utilizando quatro brocas com geometria de afiação A. Foram usadas ferramentas de 8,4 mm de diâmetro, sendo todas do mesmo lote de fabricação.

### 4.2.1 Resultados da vida das ferramentas

Ao ser analisado o comportamento evolutivo do desgaste das quatro ferramentas testadas (ferramentas do mesmo lote de fabricação e com geometria de afiação A), mostrado na **Figura 4.7**, observa-se a boa repetitividade dos resultados de desgaste ao longo da vida das ferramentas. Dessa forma, comprova-se que a metodologia utilizada proporciona resultados válidos para o monitoramento dos desgastes  $VB_{max}$ . Conforme os resultados obtidos neste ensaio, torna-se possível reduzir o número de ferramentas testadas, com o objetivo de simplificar os ensaios.

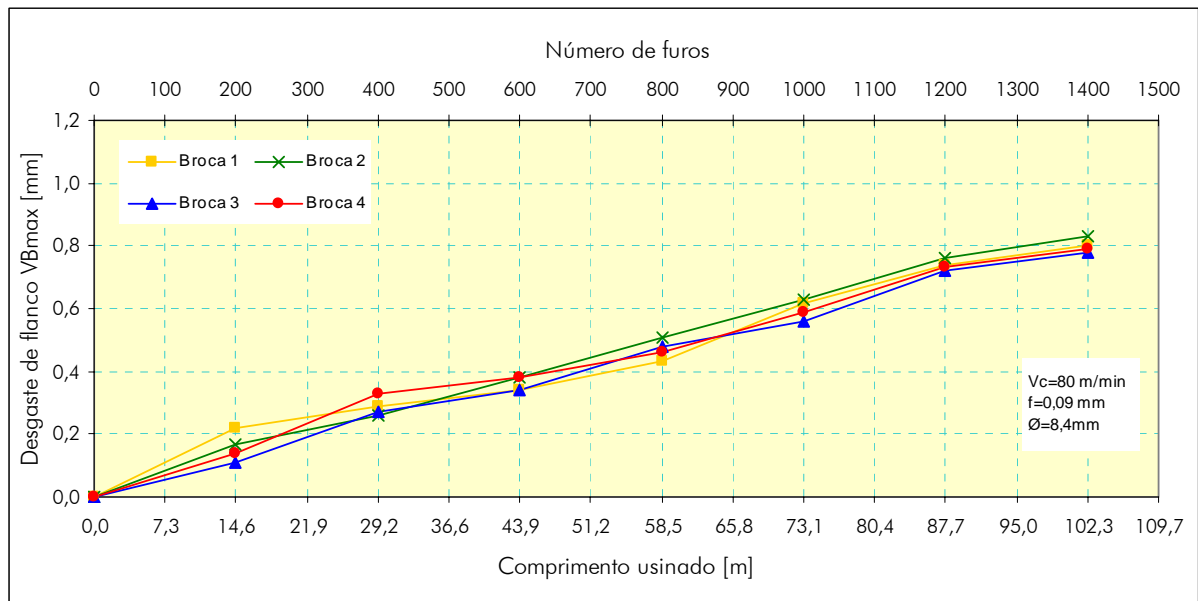


Figura 4.7 – Repetitividade dos resultados de desgaste vs. comprimento usinado

#### 4.2.2 Resultados dos esforços de usinagem

A análise da força de avanço mostra que as quatro ferramentas testadas apresentaram uma boa repetitividade nos resultados. A **Figura 4.8** reproduz a variação da força de avanço em função do comprimento usinado, mostrando o crescimento da força com o desgaste da ferramenta. Vários autores já comprovaram esse fenômeno de que tanto a força de avanço quanto o momento torçor aumentam com a evolução do desgaste de flanco [1, 6, 16, 22, 65, 71]. Observa-se neste ensaio que a força de avanço, para todas as ferramentas testadas, mostra uma diminuição e uma maior dispersão nos resultados em 600 furos usinados. O valor menor neste ponto pode ser atribuído provavelmente a um erro involuntário no momento da realização da medição da força, onde o material dos corpos de prova testados foi trocado por uma outra liga de ferro fundido cinzento com características diferentes de dureza e microestrutura. Após este incidente, os cuidados em relação aos corpos de prova foram redobrados para garantir a validade dos resultados dos experimentos.



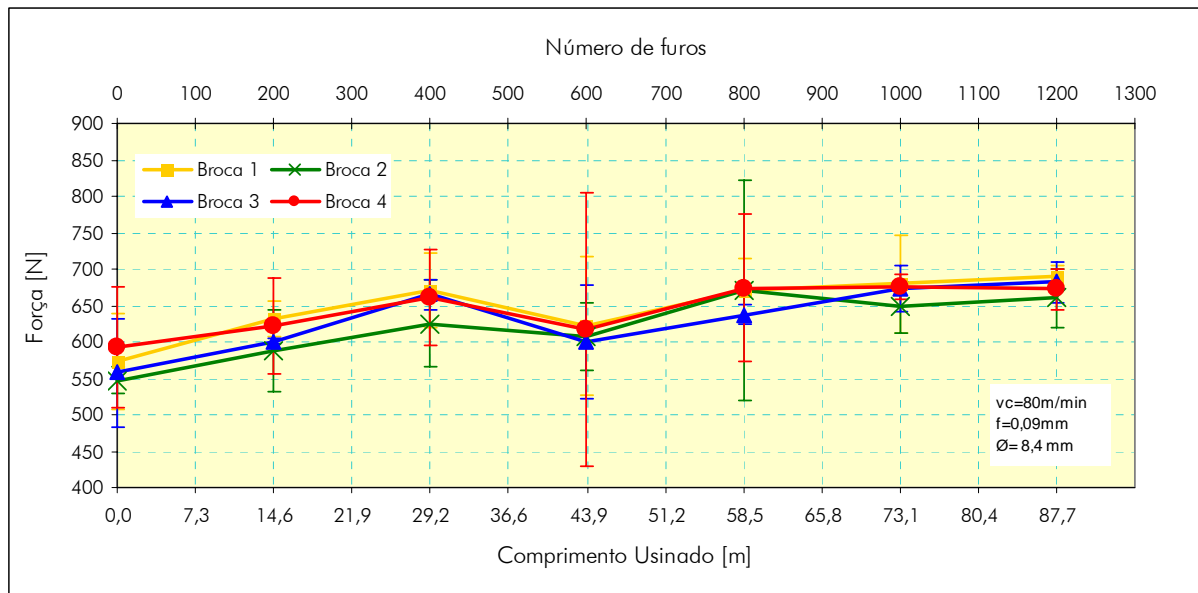


Figura 4.8 – Repetitividade dos resultados de força de avanço vs. comprimento usinado

Também, pode-se afirmar com base no resultado do ensaio, que a metodologia utilizada fornece uma boa repetitividade nas medições de força, o que permite diminuir o número de ferramentas testadas sem comprometer a validade dos resultados.

#### 4.3 Análise Comparativa para Diferentes Geometrias de Ferramentas

A seguir, são apresentados os resultados do desempenho das quatro geometrias de ferramentas testadas A, B, C e D, em relação ao desgaste, esforços de usinagem, rugosidade do interior do furo e tolerâncias geométricas e de forma.

##### 4.3.1 Desgaste de flanco máximo

A Figura 4.9 descreve a comportamento do desgaste das quatro ferramentas com geometrias A, B, C e D, utilizando velocidade de corte igual a 112 m/min e avanço de 0,08 mm, o que corresponde à condição 1 do planejamento experimental (Tabela 3.4).

Analisando as curvas de desgaste, observa-se que as ferramentas com geometrias A, C e D, apresentam um comportamento semelhante até o momento em que atingem 60 furos. A partir deste ponto (4,3 m), a broca com geometria C sofre um desgaste rápido em comparação com as demais geometrias. A broca com geometria A apresentou um comportamento evolutivo do  $VB_{max}$  similar à ferramenta com geometria D durante todo o comprimento de usinagem. Já a ferramenta com geometria B, apresentou um desgaste diferenciado em relação às outras geometrias até os 200 furos. Após este ponto houve um rápido crescimento do desgaste, até chegar ao final de vida da ferramenta.

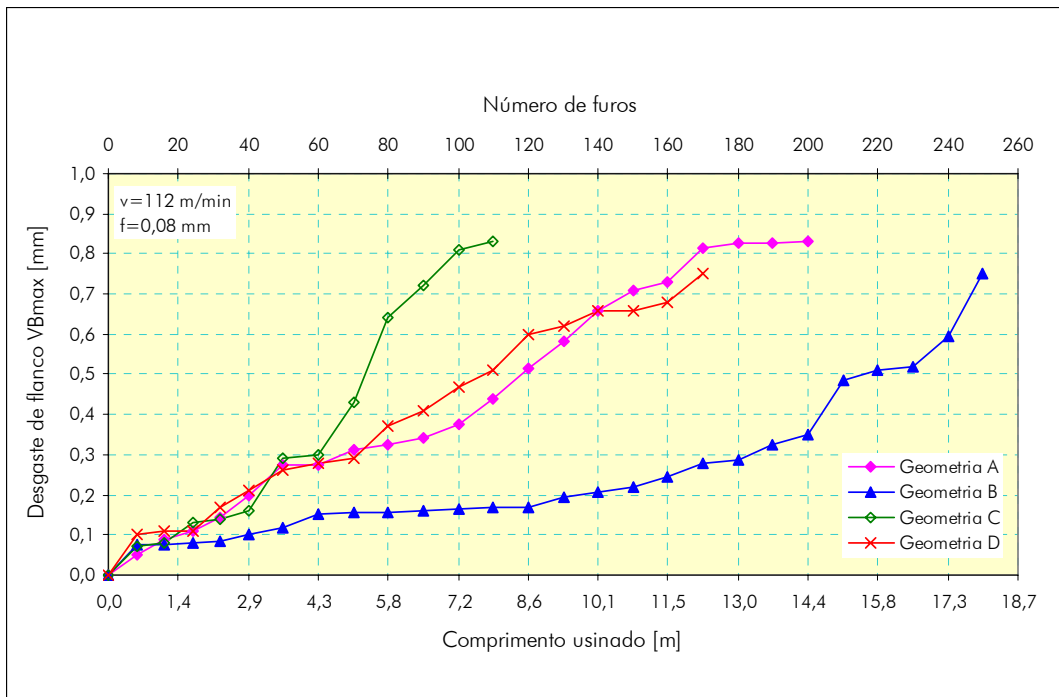


Figura 4.9 – Resultados de vida na condição 1

Para realizar a caracterização do desgaste das ferramentas, foi realizada uma análise no MEV (microscópio eletrônico de varredura). A análise foi de tipo destrutivo, já que foi necessário cortar as pontas de todas as brocas para que fosse possível seu posicionamento na câmara de vácuo do MEV. Foram tiradas fotos das brocas testadas que detalham o flanco, com o objetivo de analisar o desgaste nesse ponto das ferramentas. A **Figura 3.7**, do capítulo anterior, mostra o mesmo posicionamento da ferramenta usado para a caracterização do desgaste de flanco máximo  $VB_{max}$  no MEV.

Na análise do desgaste das ferramentas, foi possível identificar como causas do desgaste das ferramentas testadas a adesão e abrasão. O desgaste por adesão ocorre devido à ruptura de microcaldeamentos gerados na face da ferramenta. Esses caldeamentos formam-se pela ação de forças elevadas ou devido à interação das superfícies do cavaco e face da ferramenta [6, 16]. Já o desgaste abrasivo ocorre quando uma superfície dura, ou uma superfície macia contendo partículas duras, desliza sobre uma superfície de menor dureza, produzindo nela diversas ranhuras. O material das ranhuras é deslocado na forma de partículas de desgaste geralmente soltas [72].

A **Figura 4.10** mostra pequenos lascamentos na quina e sobre a guia da ferramenta com geometria D.

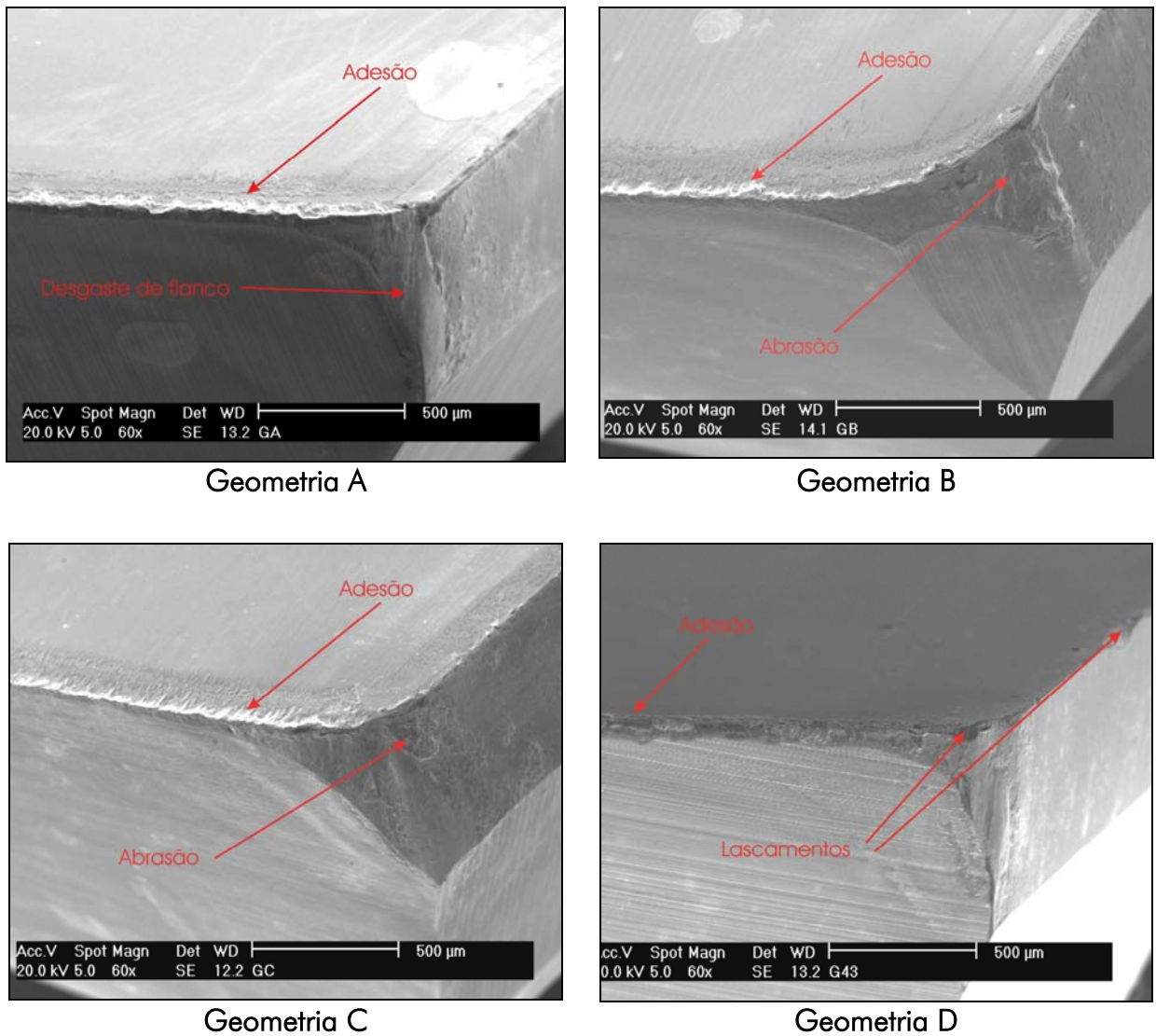


Figura 4.10 – Caracterização do desgaste – condição 1

As interrupções do processo proporcionam condições severas de usinagem, principalmente na entrada e na saída do furo, podendo produzir lascamentos em ferramentas de metal-duro.

Na segunda condição de usinagem (**Figura 4.11**), observa-se um desempenho similar entre as geometrias A, C e D, no início do ensaio. No entanto, após 30 furos usinados, a broca com geometria D mostrou melhores resultados em comparação com as geometrias A e C. Novamente nesta condição, a ferramenta com geometria B apresentou o melhor desempenho entre as quatro geometrias, mostrando um pequeno desgaste até atingir 90 furos usinados (6,5 m). Após os 90 furos, a broca sofreu um rápido desgaste até seu final de vida.

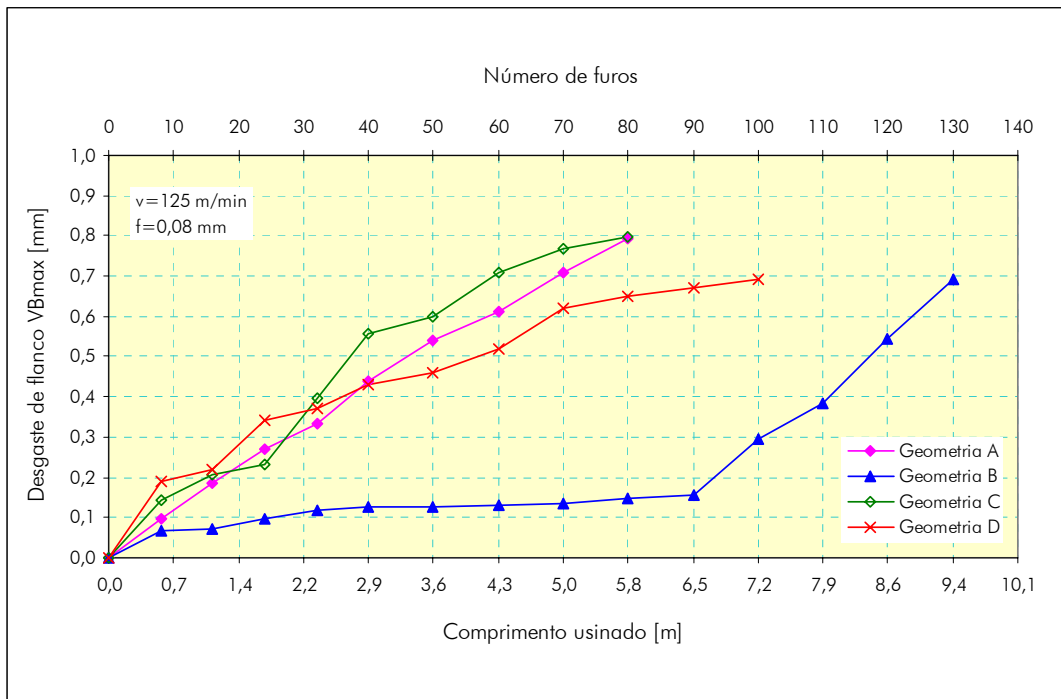
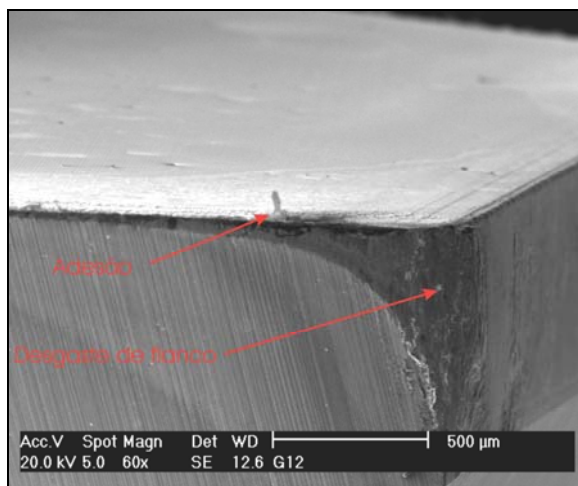
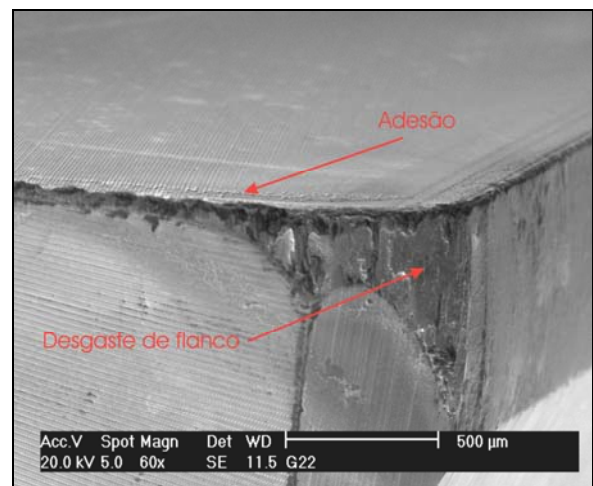


Figura 4.11 – Resultados de vida na condição 2

Na análise realizada no MEV, foi possível observar nas ferramentas submetidas aos ensaios na condição 2, o mesmo mecanismo de desgaste observado na condição 1, porém com uma intensidade de desgaste e uma área afetada maior. A Figura 4.13 também mostra sinais de desgaste de cratera na superfície de saída da ferramenta com geometria C. O desgaste de cratera é caracterizado pela formação de um canal ou uma cratera na face da ferramenta onde o cavaco está escoando, este tem como origem a dissolução do material da ferramenta por mecanismo de difusão, já que ocorre na região de maior temperatura sobre a ferramenta.



Geometria A



Geometria B

Figura 4.12 – Caracterização do desgaste – condição 2 (continua)

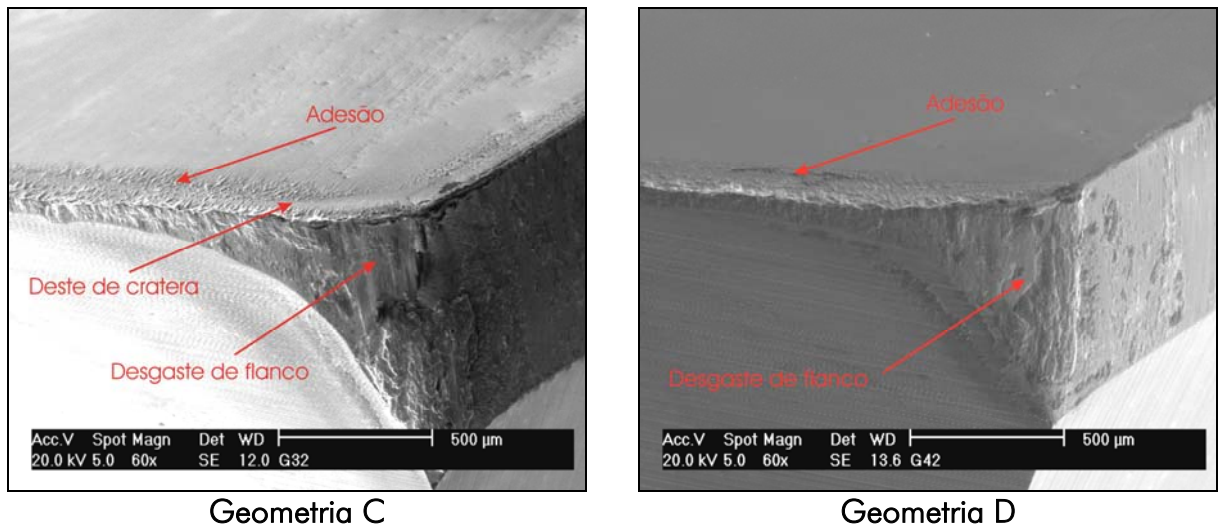


Figura 4.13 – Caracterização do desgaste – condição 2

Uma análise química realizada no microscópio eletrônico de varredura mostrou a presença de oxigênio ( $O_2$ ) e ferro (Fe) na face da ferramenta. Isto evidencia o mecanismo de desgaste de adesão e possivelmente sinais de oxidação. O espectro da análise química realizada na face da ferramenta é mostrado na **Figura 4.14**.

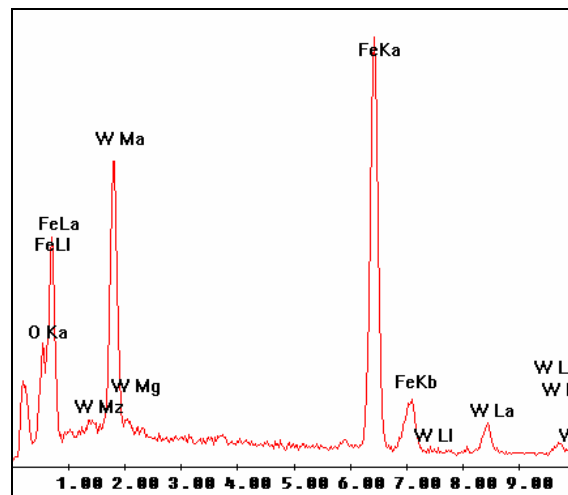


Figura 4.14 – Espectro da análise química – geometria C, condição 2

Obviamente na terceira condição dos ensaios, os desgastes das quatro geometrias aumentaram consideravelmente devido ao aumento da velocidade de corte. Conforme observado na **Figura 4.15**, as brocas com geometrias A e C apresentaram um comportamento similar nos primeiros intervalos da medição dos desgastes. No entanto, ao término do ensaio a ferramenta com geometria C mostrou um desgaste maior em relação a todas as demais. Entre as geometrias A e D, houve um melhor desempenho da geometria D. Já a broca com geometria B mostrou um comportamento evolutivo do  $VB_{max}$  com uma tendência definida, até atingir o final de vida em 100 furos usinados.

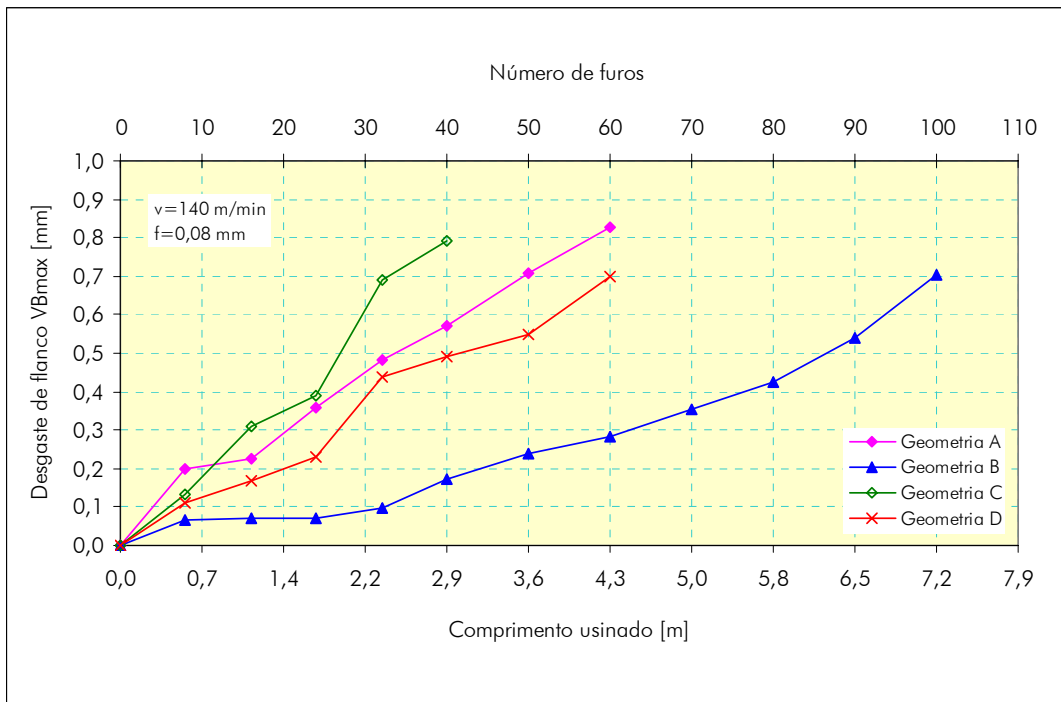


Figura 4.15 – Resultados de vida na condição 3

A Figura 4.17 mostra os mecanismos de desgaste das quatro geometrias testadas na condição 3. Em relação às duas condições anteriores, é possível observar uma maior intensidade dos desgastes. No caso da geometria A, o desgaste de cratera e por abrasão é mais evidente que nos demais casos.

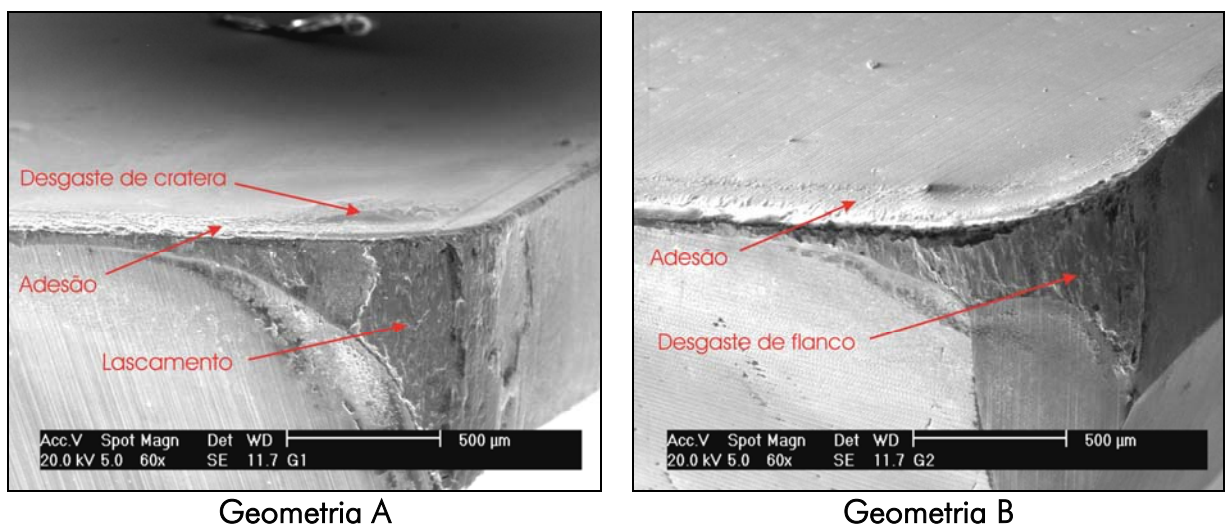
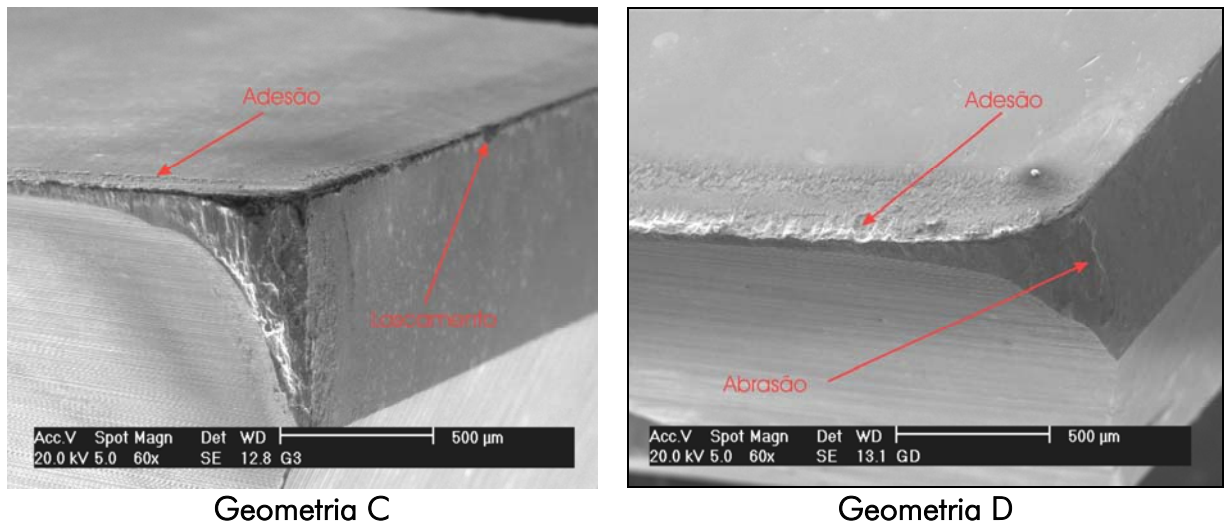


Figura 4.16 – Caracterização do desgaste – condição 3 (continua)





Geometria C Geometria D  
 Figura 4.17 – Caracterização do desgaste – condição 3

Como parte final da análise dos desgastes, a **Figura 4.18** mostra a comparação do desempenho das quatro geometrias testadas.

A comparação deixa claro o desempenho superior da ferramenta com geometria B, em todas as condições de velocidade testadas. Depois dessa geometria, o melhor resultado foi obtido com a ferramenta de geometria D. A broca com geometria C mostrou a menor vida entre o grupo das quatro geometrias.

Os melhores resultados para todas as geometrias foram constatados com a utilização da velocidade de corte mais baixa, onde os efeitos da temperatura são menos significativos, proporcionando um maior tempo de vida para as ferramentas.

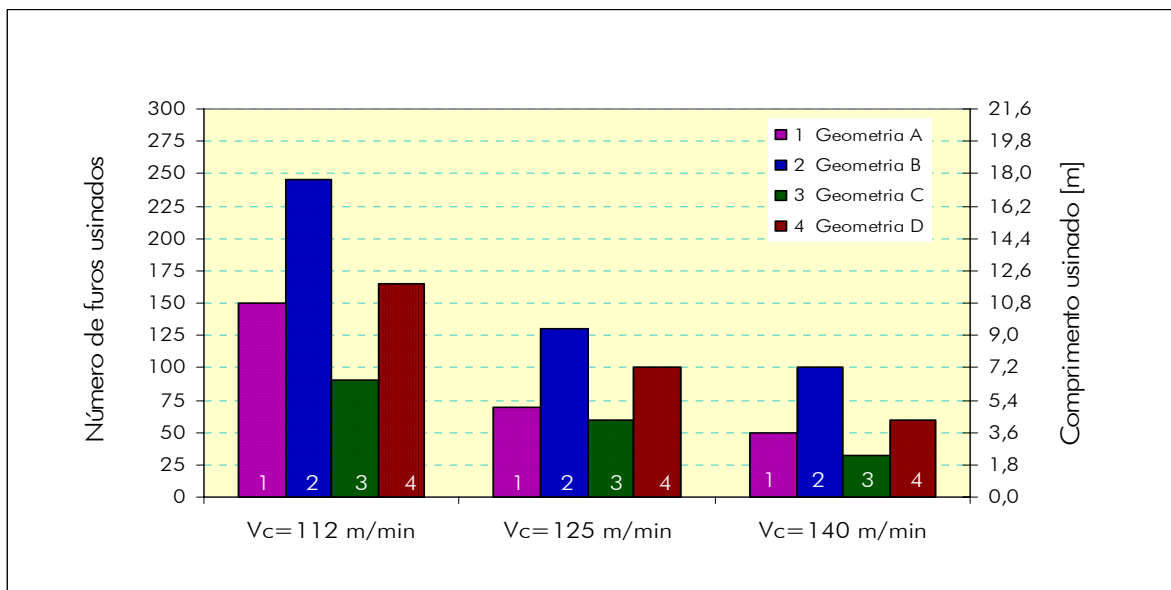


Figura 4.18 – Comparação da vida das ferramentas com diferentes geometrias

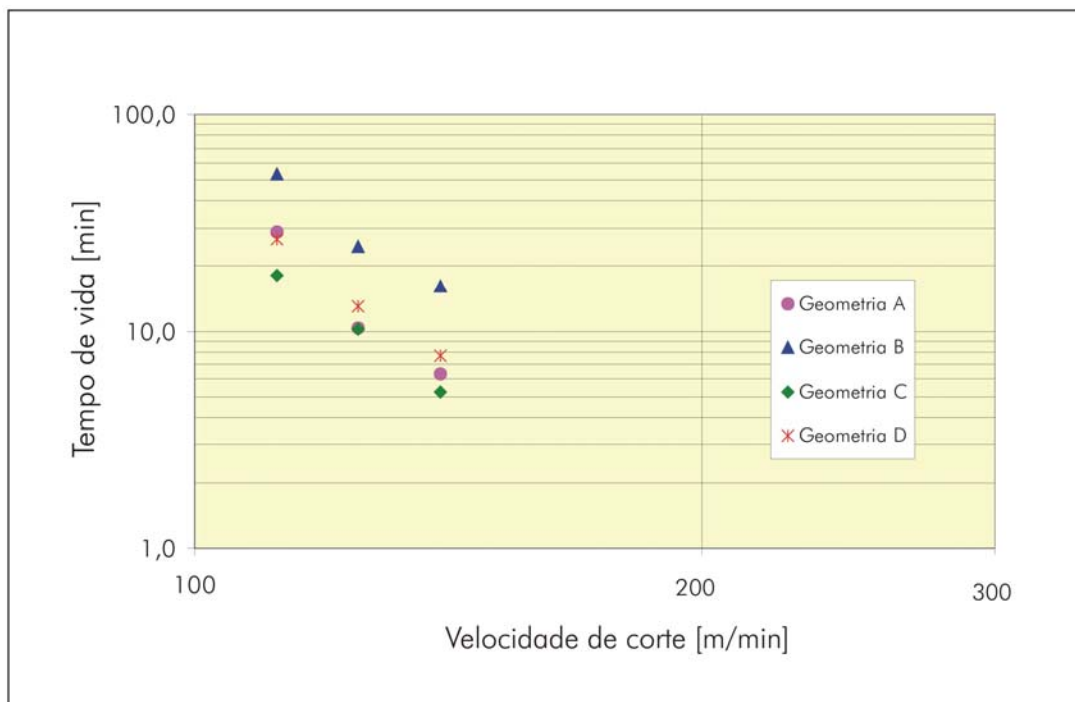
Quanto à diferença da vida apresentada entre as geometrias de melhor e pior desempenho (geometria B e C respectivamente), a geometria C foi aproximadamente 60% inferior em relação à geometria B, na condição de menor velocidade de corte, 112 m/min.

Na segunda condição, com velocidade de corte de 125 m/min, o resultado foi igualmente significativo, sendo que a ferramenta com geometria C teve uma vida em torno de 50% menor que a ferramenta com geometria B. Já na condição de maior velocidade de corte (140 m/min), a diferença entre as geometrias B e C foi maior, visto que a vida da geometria C mostrou uma redução da vida de aproximadamente 70%, em relação à geometria B.

### 4.3.2 Curva de vida das ferramentas

A partir dos dados de desgaste obtidos neste trabalho, foi possível construir as curvas de vida para as ferramentas com geometrias A, B, C e D, nas condições específicas do ensaio (condições de velocidade e avanço, fluido de corte, geometria da ferramenta, critério de fim de vida etc.).

A **Figura 4.19** foi construída tomando como critério de fim de vida o desgaste de flanco máximo  $VB_{\max}$ . Foi fixado um valor de  $VB_{\max}$  igual a 0,5 mm, que definiu o fim de vida das ferramentas.



**Figura 4.19** – Curvas de vida para as geometrias A, B, C e D



De posse da curva de desgaste das ferramentas, é possível extrair as constantes da equação de Taylor.

Os dados utilizados para calcular as constantes, bem como os respectivos resultados, estão contidos na **Tabela 4.1**.

**Tabela 4.1** – Cálculo das constantes da equação de Taylor

| Geometria | $V_{c1}$<br>(m/min) | $T_1$<br>(min) | $V_{c2}$<br>(m/min) | $T_2$<br>(min) | $V_{c3}$<br>(m/min) | $T_3$<br>(min) | k     | $C_v$<br>(min) |
|-----------|---------------------|----------------|---------------------|----------------|---------------------|----------------|-------|----------------|
| A         | 112                 | 28,7           | 125                 | 10,4           | 140                 | 6,4            | -6,73 | 1,65E15        |
| B         | 112                 | 53,0           | 125                 | 24,8           | 140                 | 16,2           | -5,31 | 3,74E12        |
| C         | 112                 | 18,1           | 125                 | 10,2           | 140                 | 5,2            | -5,58 | 4,98E12        |
| D         | 112                 | 26,5           | 125                 | 13,0           | 140                 | 7,7            | -5,53 | 5,45E12        |

### 4.3.3 Análise econômica

Com o objetivo de avaliar os aspectos econômicos e mostrar as tendências de vida das quatro geometrias testadas, foi realizada uma análise de custos de usinagem. Para esta análise foram utilizados valores de tempos e custos aproximados segundo informações obtidas no chão-de-fábrica (custo hora máquina = R\$ 30,00 reais; custo da ferramenta = R\$ 200,00 reais; custo para oito reafiações = R\$ 80,00 reais; tempo de preparação da máquina = 10 minutos; tempo de troca da ferramenta = 1 minuto; tempos secundários = 0,1 min; tamanho do lote = 10.000 peças).

Foi calculada a vida da ferramenta para o ótimo tempo e custo de fabricação ( $T_{oz}, T_{ok}$ ), bem como as velocidades de corte de ótimo tempo e ótimos custos de fabricação ( $v_{coz}, v_{cok}$ ), e o tempo mínimo de fabricação por peça ( $t_e$ ). Foi calculado também o custo mínimo e máximo de produção ( $K_{foz}, K_{fok}$ ) [6].

A **Tabela 4.2** descreve os resultados da análise econômica realizada para as quatro geometrias, utilizando os resultados das constantes da equação de Taylor anteriormente calculadas.

Os resultados mostram que a geometria B supera as suas concorrentes em relação à velocidade de mínimo tempo de fabricação, o que se reflete diretamente no tempo de fabricação por peça menor. Além disso, em relação ao custo máximo de produção, a

geometria B também se mostrou mais favorável, com o menor valor das quatro geometrias.

**Tabela 4.2** – Resultados da análise econômica

| Geometria | $T_{oz}$<br>[min] | $v_{oz}$<br>[m/min] | $t_e$<br>[min] | $K_{foz}$<br>[R\$/p] | $K_{fok}$<br>[R\$/p] | $v_{cok}$<br>[m/min] | $T_{ok}$<br>[min] |
|-----------|-------------------|---------------------|----------------|----------------------|----------------------|----------------------|-------------------|
| A         | 5,73              | 141                 | 0,34           | 1,25                 | 0,25                 | 76                   | 361               |
| B         | 4,31              | 177                 | 0,28           | 1,22                 | 0,25                 | 81                   | 271               |
| C         | 4,58              | 143                 | 0,32           | 1,37                 | 0,28                 | 68                   | 288               |
| D         | 4,53              | 153                 | 0,30           | 1,31                 | 0,26                 | 77                   | 285               |

Analisando a velocidade de ótimo custo de produção, os valores calculados foram bastante próximos nas geometrias A, B e D. Por outro lado, em relação à vida para ótimo custo de produção, a geometria A mostrou-se consideravelmente superior às demais geometrias. Esse resultado teórico obtido parte do pressuposto que o comportamento da vida das ferramentas é exponencial na faixa de velocidades testadas. Conseqüentemente, a maior inclinação da curva de vida da geometria A apresenta um valor maior de vida para a velocidade de ótimo custo de produção, o qual está fora da faixa de velocidades testadas. Neste caso seria necessário fazer um ensaio prático para verificar o comportamento da vida das geometrias na condição de velocidades ótimas de produção.

Conforme os resultados obtidos pode-se observar que geometria B apresentou os melhores resultados do ponto de vista econômico. Essa geometria admite velocidades de corte de máxima e ótima produção maiores a um baixo custo, em relação às outras geometrias testadas.

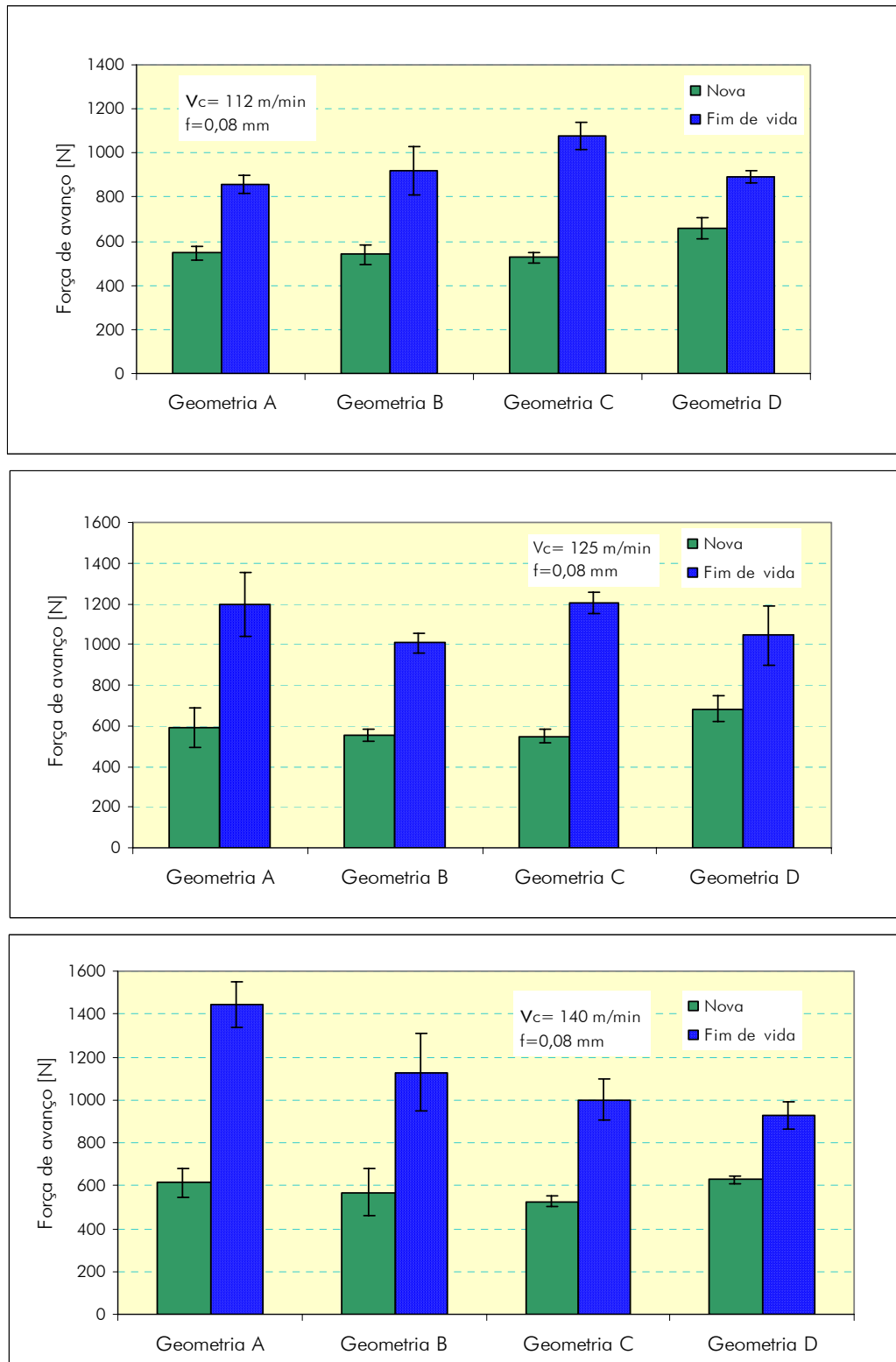
O desempenho econômico menos favorável foi verificado na geometria C, visto que as velocidades de máxima e ótima produção nesta geometria foram as mais baixas. De igual forma os custos de mínima e máxima produção foram dos mais elevados.

De maneira geral os resultados das geometrias A e D foram relativamente próximos, em relação aos tempos e custos ótimos de produção. Já em relação aos tempos e custos de mínimo tempo de fabricação, apresentam uma pequena diferença entre si.

#### 4.3.4 Resultados das medições dos esforços de usinagem

##### a) Comparação de forças de avanço de todas as geometrias

Em cada uma das condições testadas, foi realizada uma análise comparativa das forças de avanço entre as geometrias ensaiadas, tanto em condições de ferramenta nova como em condições de ferramenta no final de vida, **Figura 4.20**.



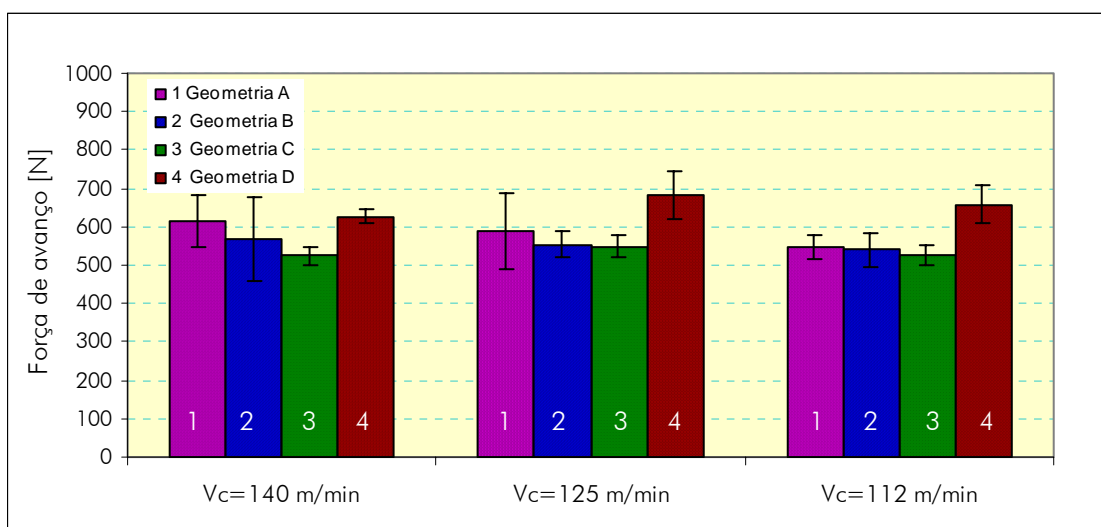
**Figura 4.20** – Forças de avanço nas três condições ensaiadas

A **Figura 4.20** mostra os resultados de força de avanço nas três condições testadas. Esse gráfico mostra o aumento das forças em relação ao estado da ferramenta. Observa-se que as quatro geometrias mostram uma tendência similar nas três velocidades de corte para a condição de ferramenta nova. Isto condiz com a citação de vários autores que comprovam a pouca influência da velocidade de corte sobre as forças de usinagem nessa faixa de velocidades [2, 6, 16].

Em relação à condição de ferramenta no fim de vida, as tendências dos resultados diferem visivelmente entre geometrias em todas as condições. Esse comportamento pode ser explicado pela dificuldade encontrada para a finalização de cada ensaio, exatamente no mesmo nível de desgaste nas três condições de velocidade testadas. Previsto no planejamento utilizado, o critério para a finalização de cada ensaio foi a qualidade do furo usinado. Desta forma, é possível que as forças variem em função das condições de desgaste particulares de cada ferramenta.

Para cada uma das três condições de usinagem, foram executados três furos para a avaliação da força de avanço. Os resultados mostrados na **Figura 4.21** representam a média de três repetições da medição efetiva da força de avanço e sua dispersão em cada condição testada.

Os resultados das medições foram submetidos a uma análise de variância, com um nível de significância de 95%, a fim de verificar se as diferenças observadas são estatisticamente significativas. A análise estatística realizada para as três velocidades de corte, na condição de ferramentas novas, confirmou que as diferenças entre os resultados são significativas.



**Figura 4.21** – Forças de avanço para ferramentas novas

Conforme os resultados obtidos, foi observado que as ferramentas com geometria B e C mostraram um melhor desempenho em função dos menores resultados de força de avanço, na condição de ferramentas novas. No entanto uma análise estatística realizada entre as geometrias A, B e C revelou que não existe diferença significativa entre os valores de força de avanço, nas condições 1 e 2 (velocidade de 112 e 125 m/min, respectivamente). Por outro lado na condição três (velocidade de 140 m/min), a análise mostrou que existe uma diferença significativa para um nível de significância de 95%. Acredita-se que esse resultado diferente seja consequência das dispersões provocadas por vibrações nessa maior velocidade, no momento da medição das forças.

A ferramenta com geometria D mostrou claramente os maiores valores de força de avanço em todas as condições (**Figura 4.21**).

#### b) Comparação de momento torçor entre as geometrias

Do mesmo modo que nas forças de avanço, foi realizada uma comparação dos resultados do momento torçor entre as geometrias testadas, no início e no final da vida das ferramentas.

As tendências dos resultados de momento torçor mantiveram o mesmo padrão mostrado para as forças de avanço. Foi observado um aumento significativo nos resultados de momento torçor, da condição de ferramenta nova para a condição de ferramenta no final de vida. Esse comportamento é justificado pela tendência ao aumento dos esforços de usinagem decorrentes do alto grau de desgaste dos gumes, após da finalização dos ensaios [1, 2, 6, 7, 15, 16, 22, 69].

A **Figura 4.22** mostra também que na condição de ferramentas no final de vida, as tendências dos resultados diferem visivelmente entre si, em todas as condições. Esse resultado é explicado da mesma forma que no caso das forças de avanço, ou seja, pela dificuldade encontrada para a finalização de cada ensaio, justamente no mesmo nível de desgaste nas três condições de velocidade testadas.

Conforme observado na **Figura 4.23**, para ferramentas novas, nas condições de 112 e 125 m/min, as tendências dos resultados foram similares. Foi observado um melhor desempenho, com menor valor de momento torçor, da geometria B; o maior resultado de momento torçor foi observado para a geometria D. Já na condição de velocidade de 140 m/min, a qual mostrou uma tendência que difere das outras duas condições, a geometria C apresentou o valor mais baixo de momento torçor, sendo que a

geometria D se manteve como a geometria com maior valor de momento torçor em todos os casos.

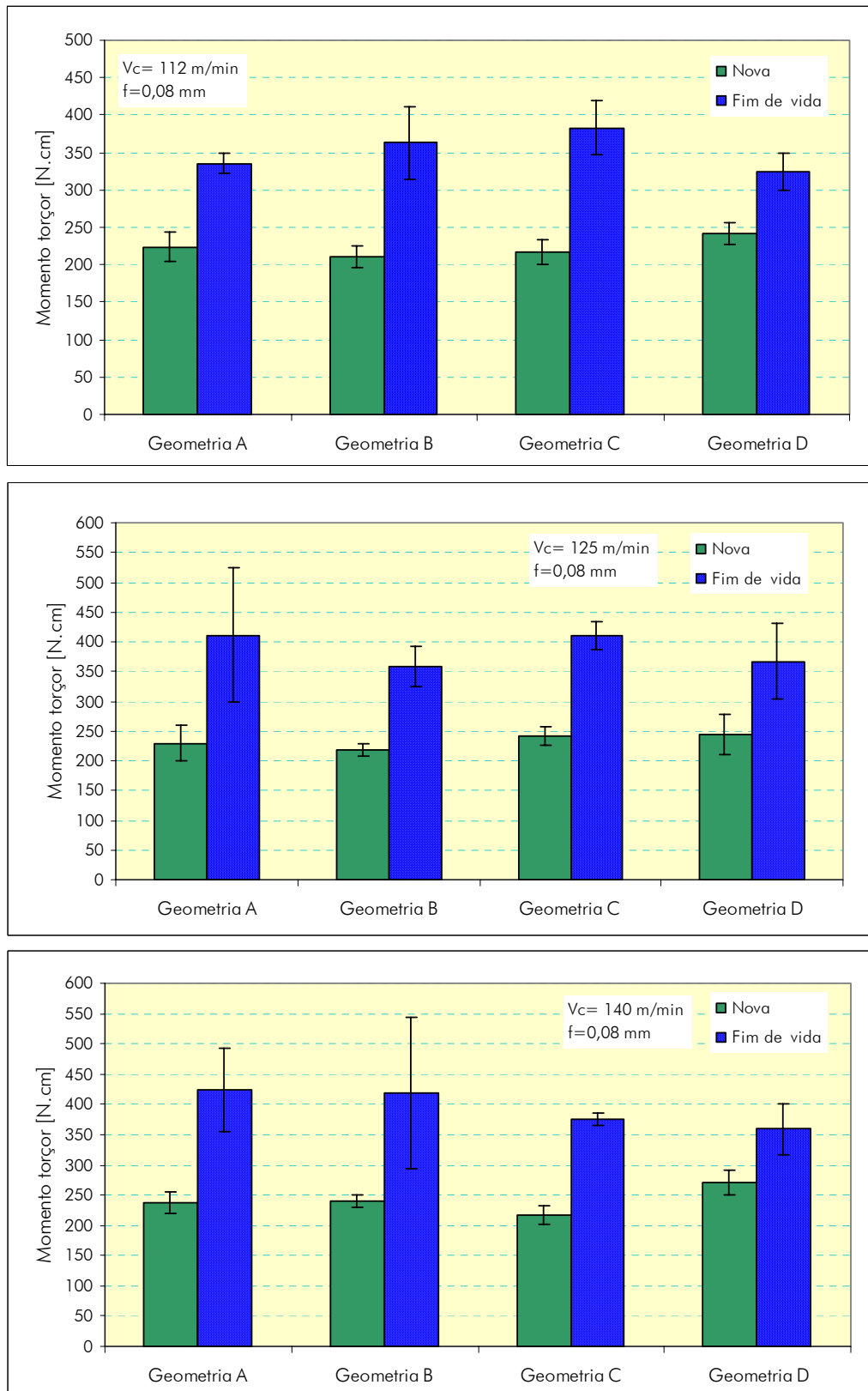


Figura 4.22 – Momento torçor nas três condições ensaiadas

Os resultados de momento torçor obtidos foram submetidos à análise de variância, de maneira semelhante ao procedimento aplicado às forças de avanço descrito

anteriormente. Os resultados da análise estatística revelaram a existência de uma diferença significativa para um nível de significância de 95%.

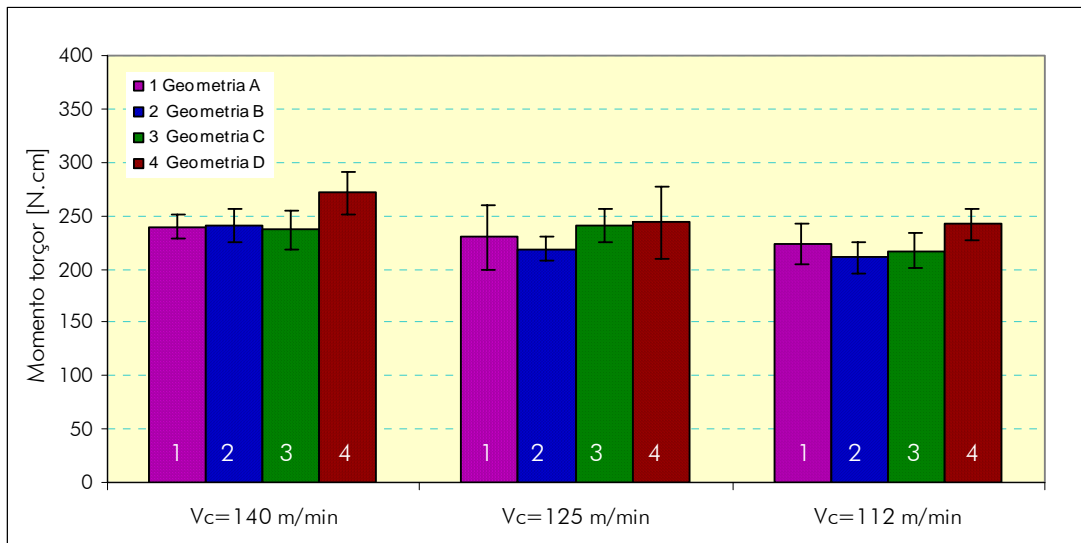


Figura 4.23 – Momento torçor na condição de ferramentas novas

#### 4.3.5 Considerações sobre os resultados dos esforços de usinagem

Segundo Ferraresi (1970), o estado de afiação numa ferramenta exerce notável influência sobre os esforços de usinagem, podendo chegar a valores 25% maiores para um desgaste da ferramenta dentro da faixa admissível de desgaste. Conforme os resultados obtidos, em todas as condições de usinagem testadas, as geometrias mostraram um acréscimo nos esforços de usinagem superior a 30% da condição de ferramenta nova para a condição de ferramenta no fim de vida. No caso das geometrias A, B e C, o aumento dos esforços ultrapassou 50%.

Para a condição de ferramentas novas, torna-se difícil concluir qual das geometrias apresentou melhores resultados em relação às forças de usinagem. Mesmo assim, pode-se perceber que na geometria D os esforços foram sempre maiores em relação às demais geometrias, apesar de esta geometria ser similar à geometria A em relação ao ângulo de ponta de  $120^\circ$ . Uma hipótese para a explicação desse fenômeno é em relação à influência do acabamento da face e do flanco da ferramenta sobre os valores das forças de usinagem [2, 16, 20]. O coeficiente de atrito na geometria de uma ferramenta está diretamente relacionado com os mecanismos de desgaste de adesão e abrasão, os quais influenciam de maneira negativa a ferramenta em relação à vida e às forças de usinagem [7, 73, 74]. Por ser a geometria D a única das geometrias testadas afiada de forma convencional (motivo pelo qual a qualidade das superfícies retificadas

nessa broca foi pior em relação às demais geometrias afiadas numa máquina CNC de 5 eixos), é possível que essa diferença tenha sido determinante no pior desempenho da geometria D em relação aos esforços de usinagem, apesar desta ter o maior ângulo de saída de todas as geometrias testadas.

#### 4.3.6 Qualidade da superfície

As medições de rugosidade do interior do furo foram realizadas em todas as condições de parâmetros e geometrias testadas. Estas foram realizadas nos mesmos intervalos de medição dos desgastes das ferramentas, obtendo-se assim uma curva para cada condição por ferramenta testada.

As Figuras 4.22, 4.23 e 4.24 mostram os resultados de rugosidade  $R_a$  das quatro geometrias nas três condições testadas. Na primeira condição, com velocidade de corte de 112 m/min, foi observado um comportamento similar entre as geometrias testadas, sendo que as rugosidades  $R_a$  de todas as geometrias oscilaram entre 1,3 a 2,3  $\mu\text{m}$ , nesta condição. Porém, foram observadas pequenas diferenças na geometria B, a qual mostrou nos primeiros 40 furos valores menores de  $R_a$ . Percebe-se também uma leve diminuição da rugosidade para a geometria D, no final do ensaio.

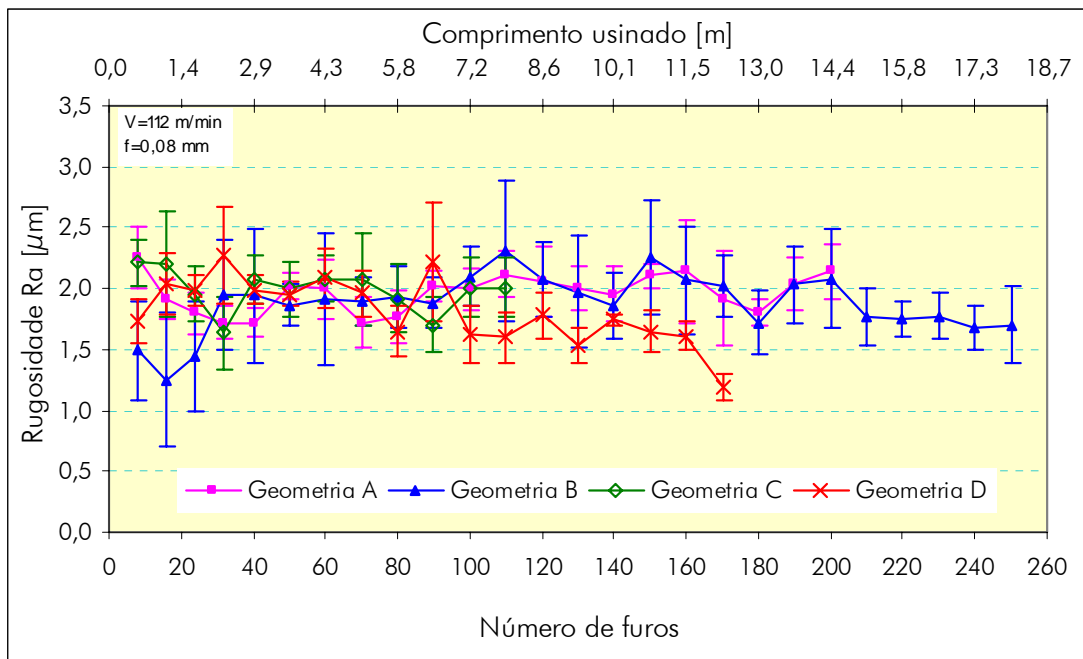


Figura 4.24 – Curvas de rugosidade  $R_a$  – condição 1

Em relação à condição 2, as quatro geometrias mostraram uma tendência e valores semelhantes de rugosidade. Os valores de  $R_a$  para todas as geometrias se mantiveram na faixa de 1,5 a 2,5  $\mu\text{m}$ , com exceção do último ponto da curva da



geometria B. Dessa forma, não é possível afirmar categoricamente qual das quatro geometrias teve o melhor desempenho. Mesmo assim, pode-se observar que a geometria B apresentou valores de rugosidade maiores do que as demais nos primeiros 70 furos usinados.

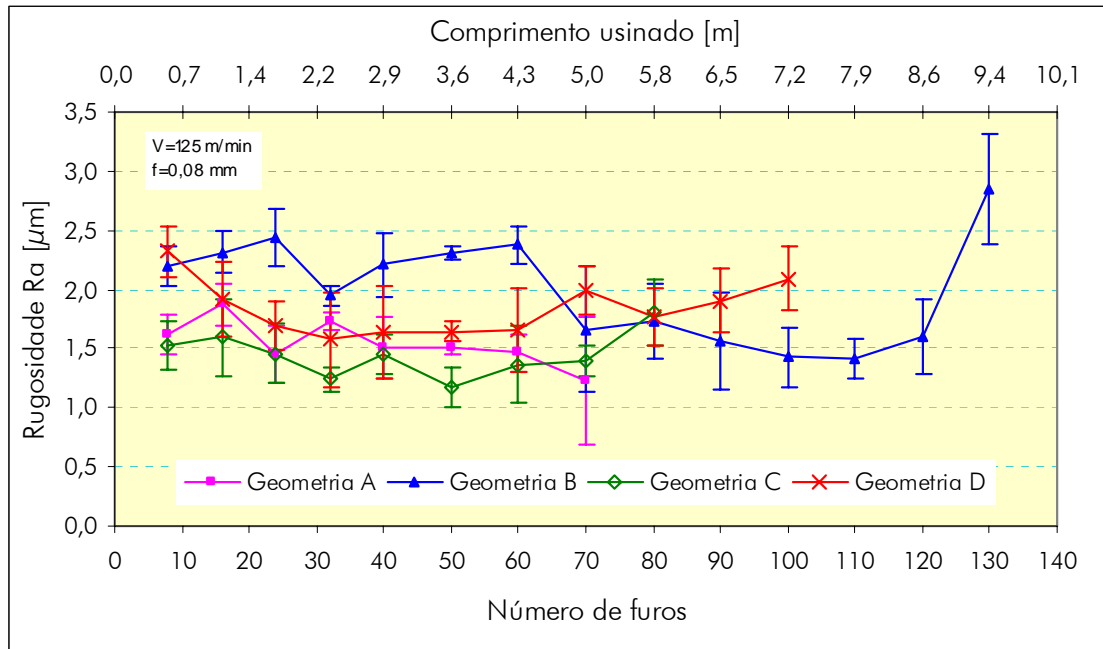


Figura 4.25 – Curvas de rugosidade  $R_a$  – condição 2

Na condição de maior velocidade de corte, foi observado que a geometria A apresentou valores mais altos de rugosidade, conforme a evolução do desgaste da ferramenta. As demais geometrias mostraram um bom desempenho e estabilidade de resultados ao longo do ensaio.

De maneira geral, as dispersões dos resultados de rugosidade nas três condições de velocidade se mantiveram em níveis baixos, o que significa que não houve grandes diferenças entre as seis medições realizadas para cada corpo de prova (entrada e saída do furo).

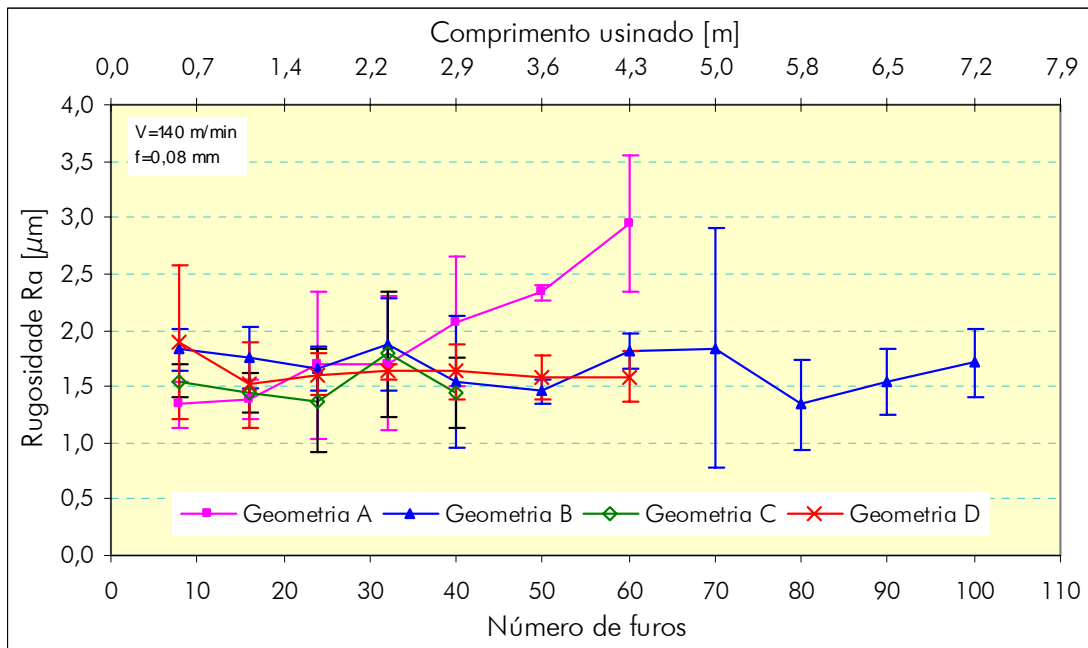


Figura 4.26 – Curvas de rugosidade  $R_a$  – condição 3

#### 4.3.7 Considerações sobre os resultados de rugosidade

Analisando os resultados de rugosidade obtidos, é possível observar que as quatro geometrias testadas geraram valores de  $R_a$  que variam na faixa de 1,0 a 3,0  $\mu\text{m}$ , os quais estão dentro das qualidades de superfícies possíveis de atingir no processo de furação profunda (0,2 a 3,2  $\mu\text{m}$ , de acordo com König, 1997). Desta forma, não foi possível uma conclusão definitiva sobre qual das geometrias gerou melhores resultados de  $R_a$ .

#### 4.3.8 Erro de circularidade

Existe dificuldade na avaliação do erro de circularidade através da **Figura 4.27**. O comportamento evolutivo do erro de circularidade mostra curvas muito semelhantes, principalmente após os primeiros 30 furos usinados. Com exceção das flutuações apresentadas pelas geometrias A e D nos primeiros estágios do ensaio, as quatro geometrias testadas mostraram uma boa estabilidade de resultados de cilindridade. Dessa mesma forma, na condição 2, é difícil sobre qual geometria gera os melhores resultados de tolerâncias de circularidade. Mesmo assim, verifica-se que a geometria B apresenta certa instabilidade no estágio final do ensaio (**Figura 4.28**).

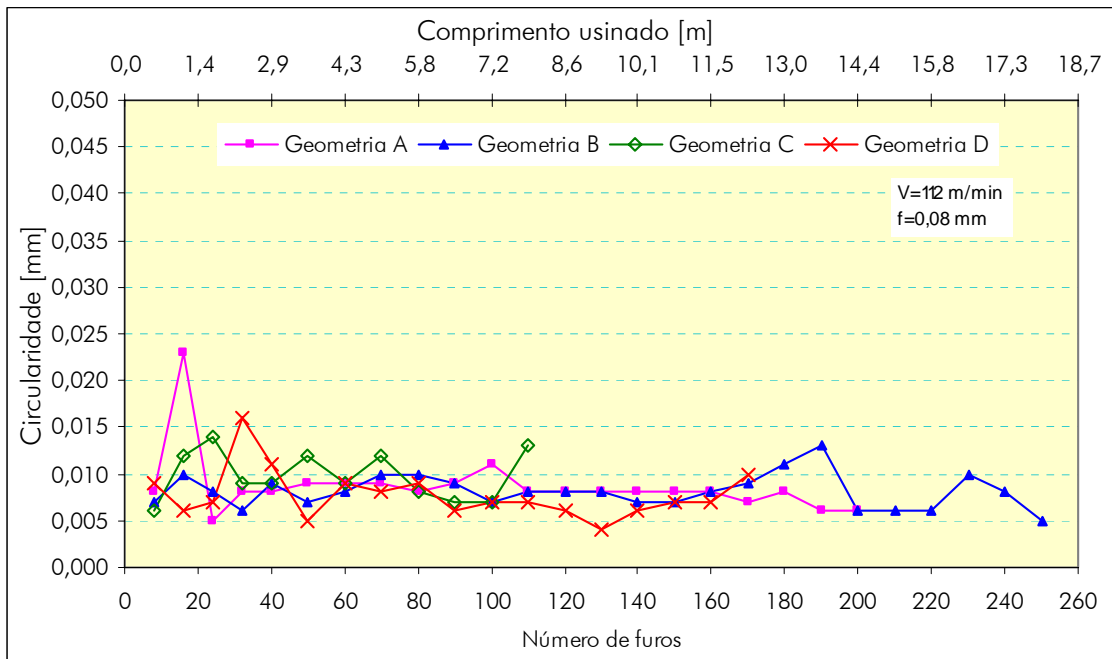


Figura 4.27 – Curvas de circularidade– condição 1

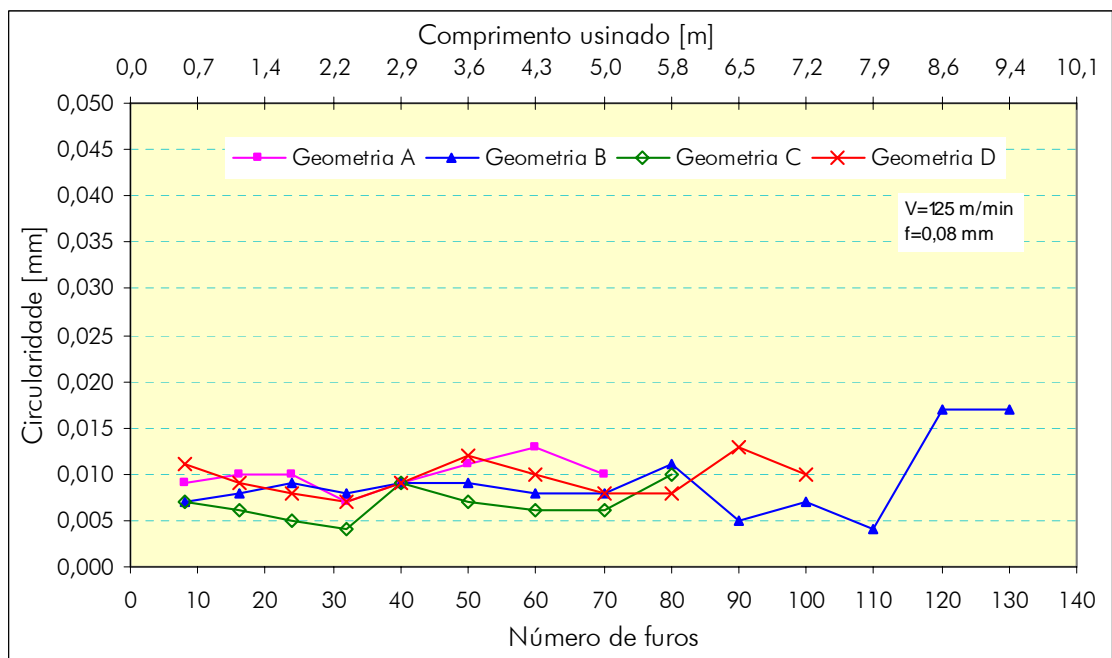


Figura 4.28 – Curvas de circularidade– condição 2

Ao ser analisado o erro de circularidade mostrado na **Figura 4.29**, observa-se uma semelhança dos resultados nos primeiros 25 furos usinados para as geometrias B, C e D. A partir daí, as geometrias C e D mostram grande oscilação dos resultados. Já a geometria A gerou uma curva de resultados com grande dispersão, ao longo de todo o teste, contrariamente à geometria B, que apresentou desempenho estável, com exceção dos últimos 20 furos de vida, onde apresentou variação considerável. Uma explicação para a instabilidade dos resultados mostrados nesta condição de velocidade pode estar

relacionada à perturbação do processo, decorrente do aumento dos parâmetros de corte. A estabilidade do processo pode estar sendo afetada pelas maiores vibrações e esforços gerados no mesmo, quando aumentada a velocidade de corte.

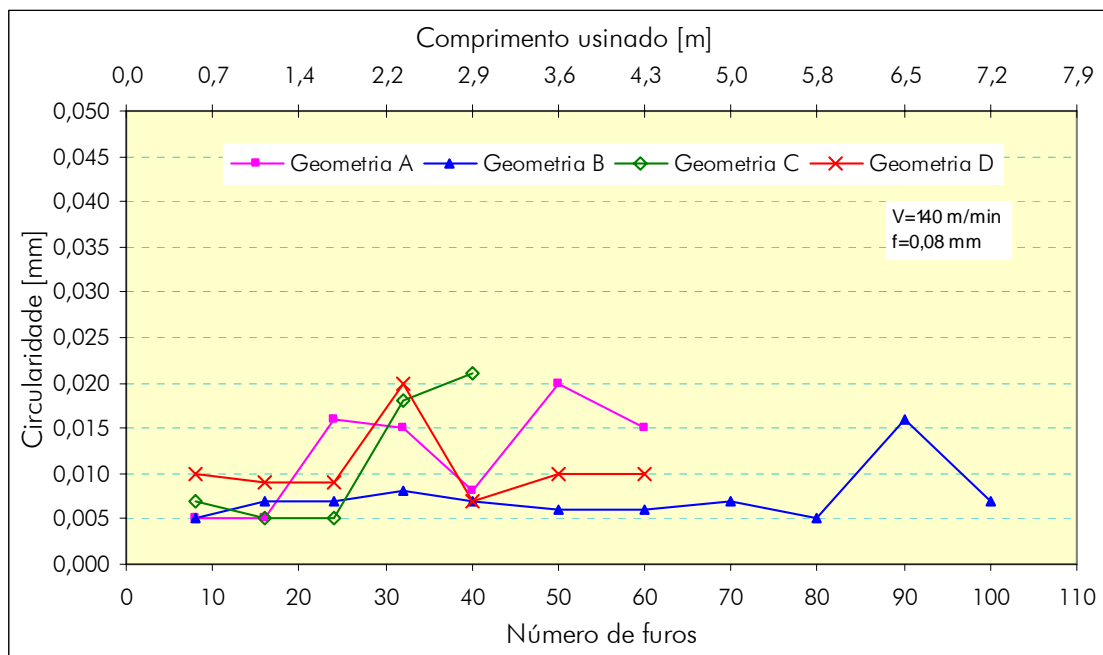


Figura 4.29 – Curvas de circularidade– condição 3

#### 4.3.9 Considerações sobre os resultados do erro de circularidade

Foi observado nas condições de usinagem 1 e 2 uma grande semelhança nos resultados de circularidade gerados pelas quatro geometrias testadas. Na condição 3 onde a velocidade de corte sobe para 140 m/min, observou-se uma instabilidade no desempenho das ferramentas, exceto na geometria B. Uma hipótese para tal fato são as quinças que chanfradas da geometria B podem ter influenciado de forma positiva os resultados de circularidade, já que quinças com raios ou chanfradas contribuem à eliminação de problemas na saída do furo

#### 4.3.10 Erro de cilindricidade

Ao ser analisado o erro de cilindricidade mostrado na **Figura 4.30**, observa-se que os valores e o comportamento evolutivo das geometrias A e D mostram uma flutuação maior em relação às demais geometrias. Já as geometrias B e C mostram um comportamento mais estável. De certa forma, a geometria B apresentou menores erros de cilindricidade ao longo da vida da ferramenta.

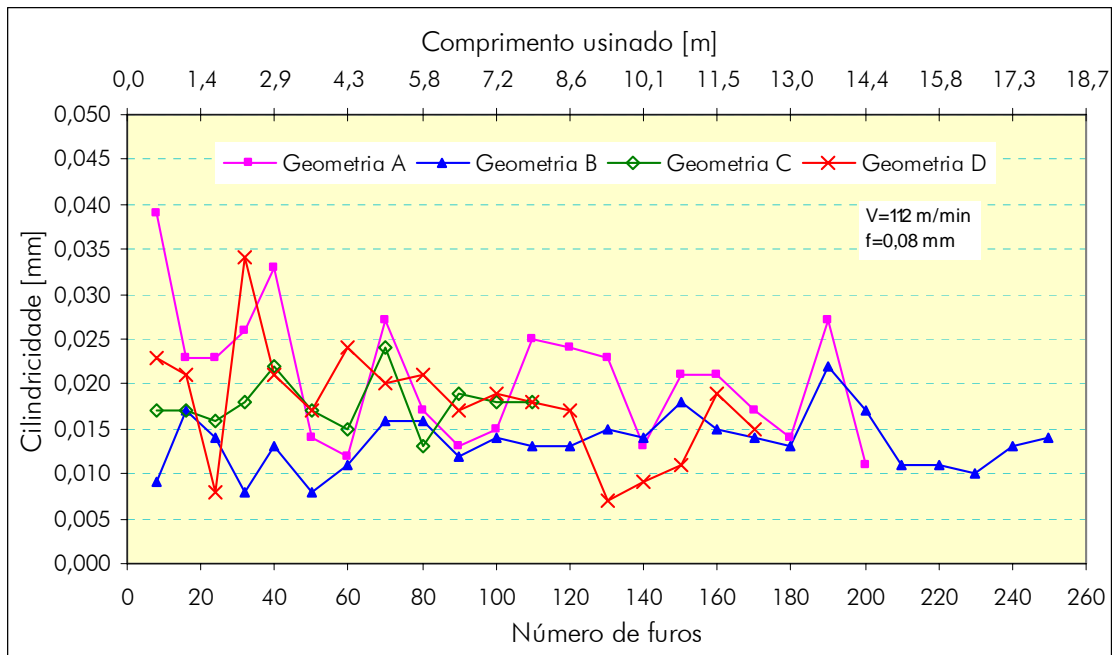


Figura 4.30 – Curvas de cilindridade– condição 1

Na segunda condição de usinagem (**Figura 4.31**), observa-se um comportamento similar à primeira condição, onde as geometrias A e D apresentam os valores de erro de cilindridade maiores. Neste caso, a geometria C trouxe o melhor desempenho pelos seus menores valores de erro de cilindridade e estabilidade de resultados. A geometria B mostrou um desempenho estável a partir dos primeiros 50 furos usinados. Posteriormente, os resultados tiveram maior flutuação principalmente no final da vida da ferramenta.

Analisando a **Figura 4.32**, que mostra os resultados do erro de cilindridade dos ensaios com a máxima velocidade de corte, é possível perceber uma grande flutuação nos resultados por parte da geometria D. Esse comportamento pode estar relacionado com as influências que as modificações do gume transversal exercem sobre o erro de cilindridade. Qualquer assimetria ou excentricidade do gume transversal pode acarretar perturbações na cilindridade do furo [49].

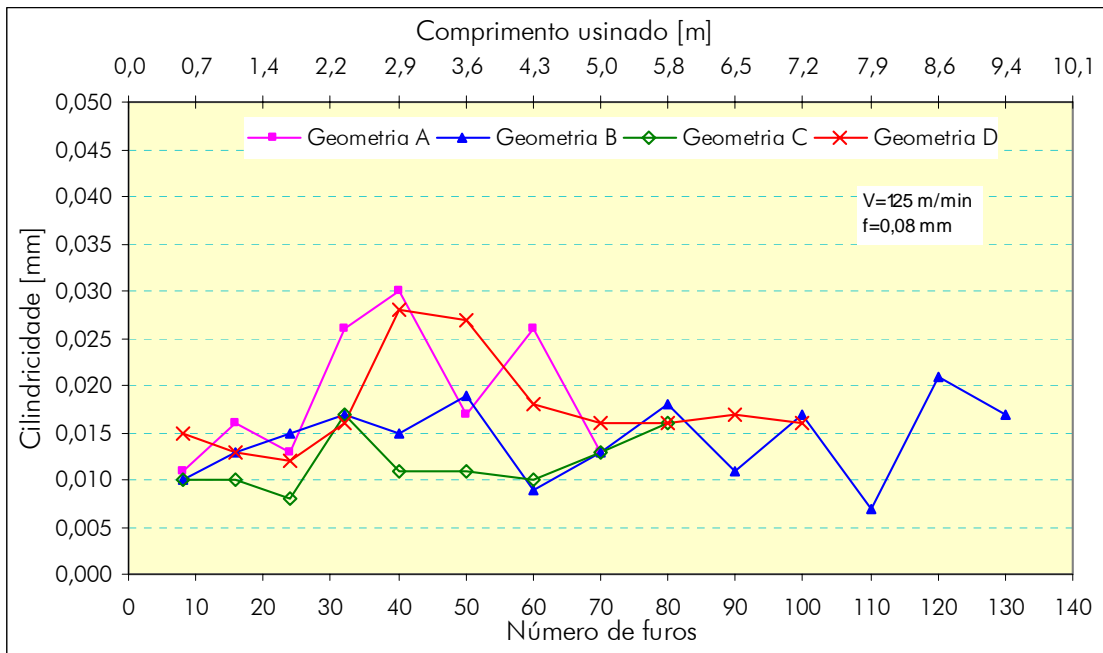


Figura 4.31 – Curvas de cilindridade– condição 2

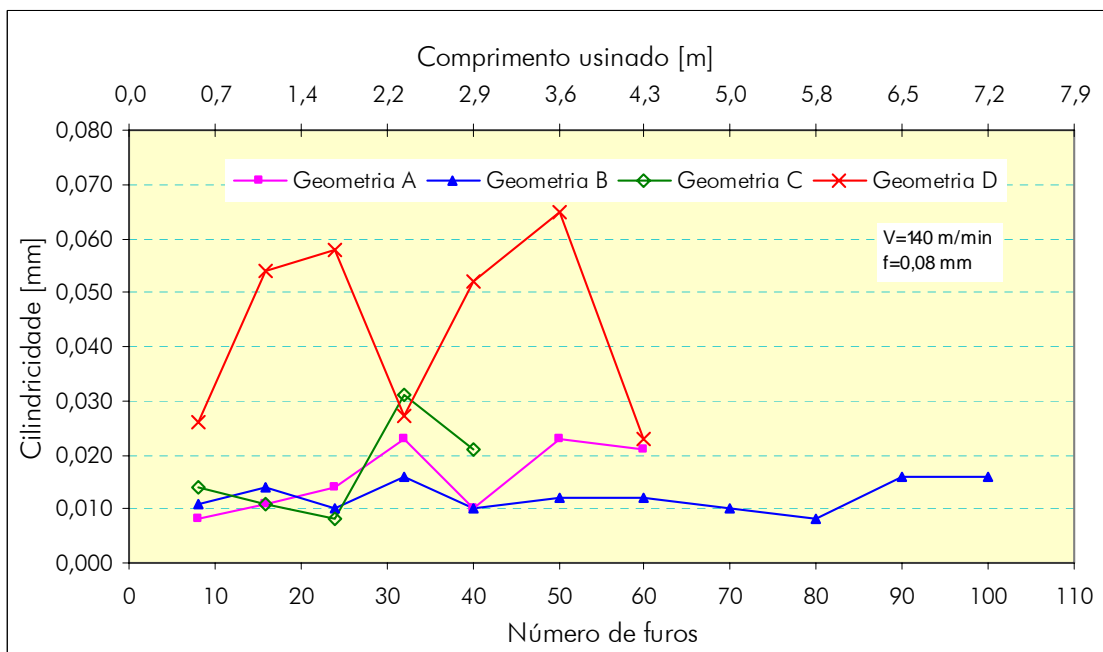


Figura 4.32 – Curvas de cilindridade– condição 3

As geometrias A, B e C mostraram uma tendência similar principalmente nos primeiros 25 furos. A partir daí, houve flutuações nas geometrias A e C, ao contrário do desempenho da geometria B, que mostrou um comportamento evolutivo bastante estável ao longo de toda a vida da ferramenta.

#### 4.3.11 Considerações sobre os resultados do erro de cilindridade

Da mesma forma que na avaliação da circularidade, foi observado nas condições de usinagem 1 e 2 um comportamento diferenciado da condição 3. Nos dois primeiros casos, houve maiores flutuações nos resultados de todas as geometrias. Mesmo assim, pode-se observar que a geometria B mostrou mais estabilidade de resultados.

Segundo Coldwell (2004), em furação os altos esforços de usinagem estão relacionados com altos valores de cilindridade, indicando problemas na evacuação dos cavacos. Isto coincide com o caso da geometria D, que gerou os maiores valores de esforços de usinagem e maiores valores de cilindridade na condição 3 onde a velocidade de corte sobe para 140 m/min e conseqüentemente é gerada uma maior quantidade de cavacos aumentando, a dificuldade de evacuação dos mesmos. Tal fato presume que os maiores valores de cilindridade da geometria D estejam relacionados a esse fenômeno.

#### 4.3.12 Diâmetro médio do furo

A **Figura 4.33** mostra, de um modo geral, que em todas as geometrias testadas há uma tendência praticamente constante do comportamento do diâmetro durante a usinagem. A geometria B mostrou menores dispersões nos resultados em relação às demais, devido às diferenças entre o diâmetro da entrada e da saída serem menores, em comparação com as demais geometrias que tiveram uma tendência de aumento do diâmetro na saída do furo. Levando em conta tal dispersão, os furos usinados com a geometria B mantiveram-se dentro da classe IT9. As demais geometrias conseguiram usinar furos com diâmetro médio dentro da classe IT10.

Analisando a segunda condição de ensaios (**Figura 4.34**), observa-se que a geometria C apresentou valores do diâmetro médio dos furos mais próximos do diâmetro nominal, com baixa variação e dispersão de resultados, estando dentro da classe IT9 de tolerância dimensional. As geometrias B e D, que mostraram um desempenho similar nos primeiros furos usinados, foi possível obter furos dentro da classe IT10. Na usinagem com a ferramenta com geometria A, a qualidade dos furos encontra-se também dentro da classe IT10, porém com valores mais afastados do diâmetro nominal.

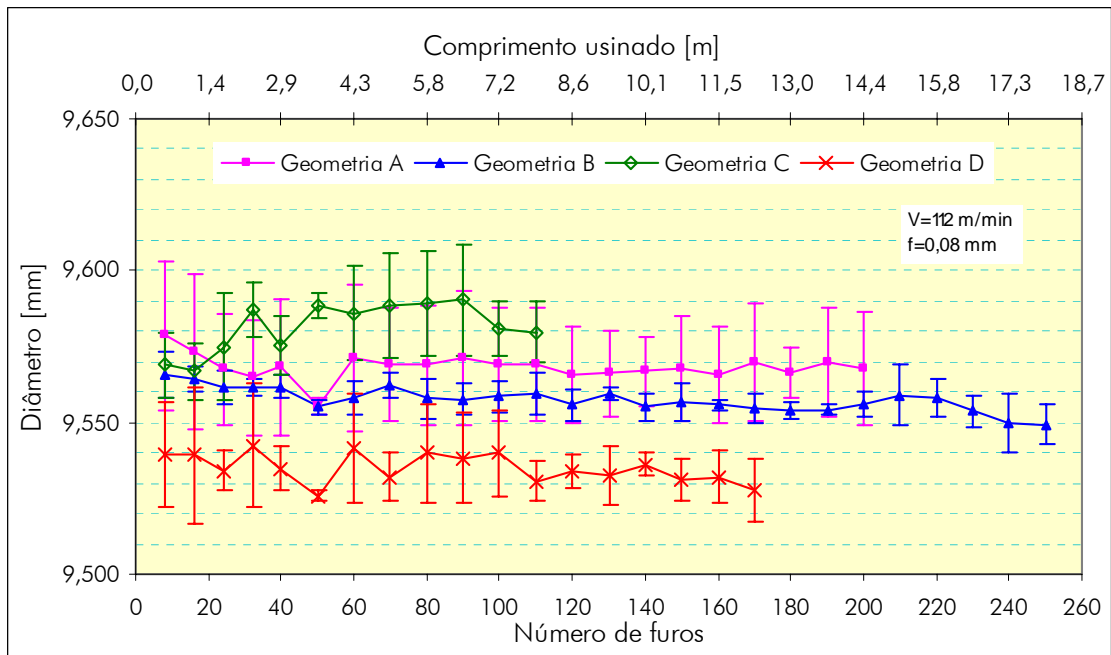


Figura 4.33 – Curvas da evolução do diâmetro – condição 1

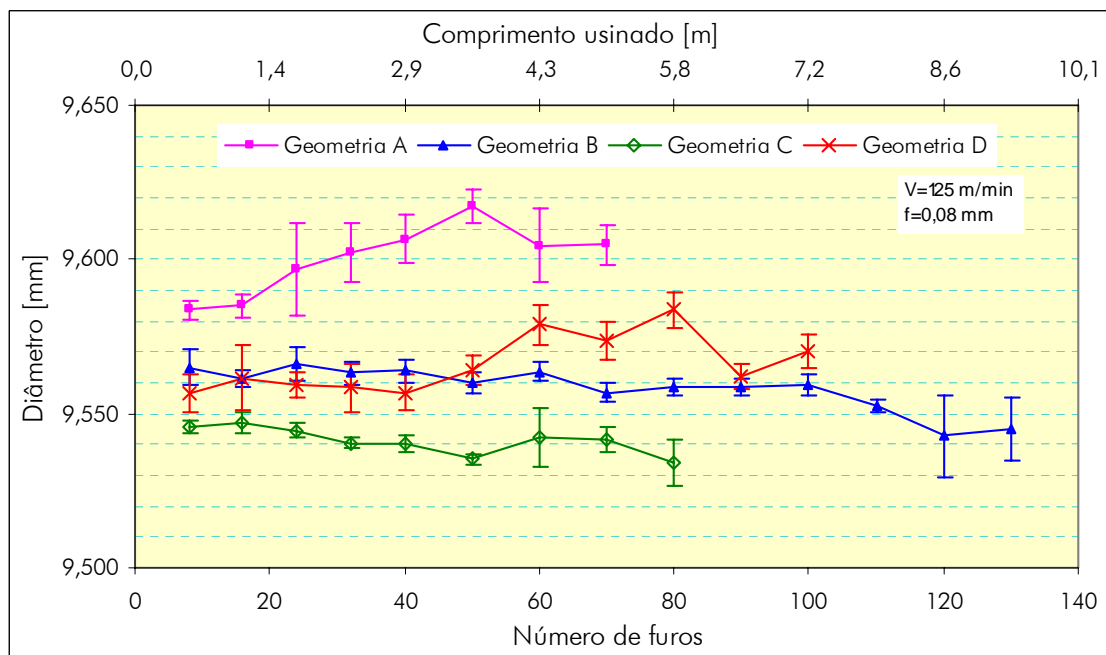


Figura 4.34 – Curvas da evolução do diâmetro – condição 2

A Figura 4.35 mostra, nas condições testadas, que a usinagem empregando a ferramenta com geometria D gerou as maiores dispersões de valores de diâmetro médio, situando-se dentro da classe IT11. Os melhores resultados de tolerância do diâmetro foram obtidos com a geometria B, que gerou valores de diâmetro médio dentro da classe IT9. A usinagem com as ferramentas de geometrias A e C geraram furos da classe IT10.



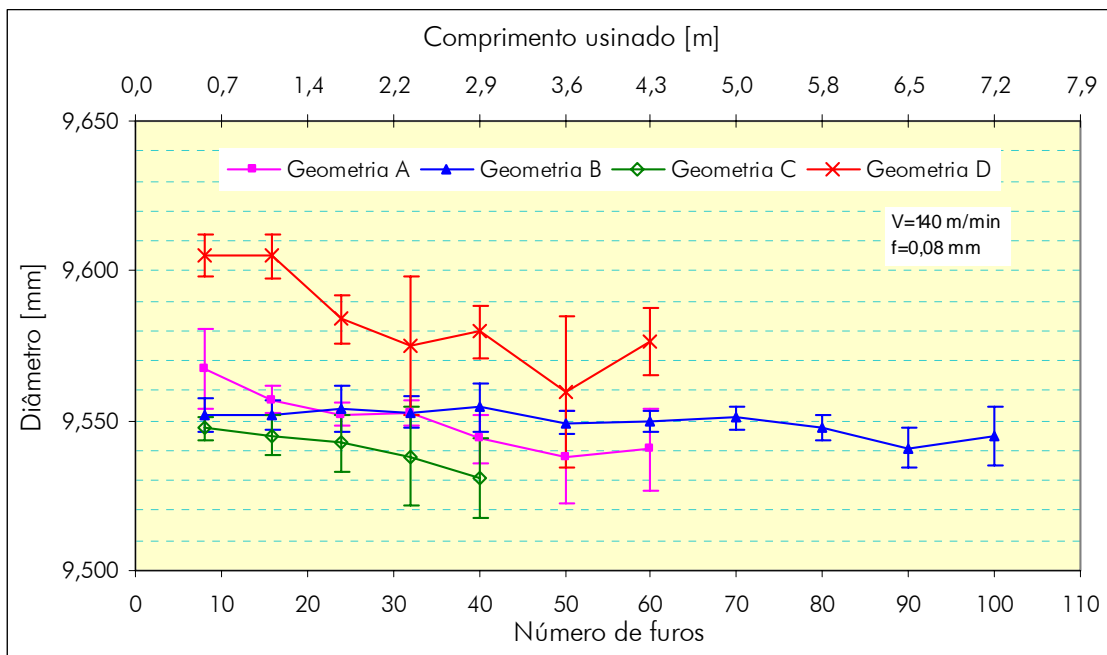


Figura 4.35 – Curvas da evolução do diâmetro – condição 3

#### 4.3.13 Considerações sobre os resultados do diâmetro médio dos furos

As melhores qualidades de furo obtidas com as ferramentas testadas nas três condições de usinagem correspondem à classe IT9, as quais foram obtidas com a geometria B, nas condições 1 e 3, e a geometria C, na condição 2. Segundo König (1997), no processo de furação profunda de ferro fundido, é possível obter qualidade de furo IT9, resultado que também foi verificado por Santos (1999) em brocas de metal-duro integral com canais retos.

De modo geral, foi observada uma tendência de leve redução na dimensão do diâmetro dos furos ao longo da vida da ferramenta, que é atribuída ao progressivo desgaste da ferramenta [65, 75]. Essa tendência foi observada em todas as geometrias com exceção das geometrias A e D na condição 2, que mostraram uma tendência de aumento do furo ao longo da vida da ferramenta.

#### 4.3.14 Análise qualitativa dos furos usinados

Para a avaliação qualitativa do desempenho das diferentes geometrias testadas, no final de vida de cada ferramenta, foi coletada e fotografada a última peça usinada em cada ensaio. Logo após, foi realizada uma comparação entre cada uma das condições ensaiadas com cada geometria. A análise foi feita em relação à saída do furo, por ser

esse ponto onde se concentra a maioria de problemas de qualidade no processo de furação de ferro fundido cinzento.

Na usinagem com a geometria A para a condição 1 e 2 (**Figura 4.36**), os resultados obtidos mostraram-se satisfatórios, com pequenas quebras na borda do furo e poucas marcas na superfície usinada. Os valores de rugosidade  $R_a$  atingidos situaram-se em torno de  $2 \mu\text{m}$ . Já na terceira condição, foi observado um acabamento deficiente com quebra acentuada da borda do furo e marcas espirais visíveis. A rugosidade  $R_a$  nessa condição apresentou um crescimento progressivo ao longo do desgaste da ferramenta até atingir  $3 \mu\text{m}$  no fim da vida da ferramenta.

Conforme observado na **Figura 4.36**, os resultados obtidos utilizando a geometria B apresentaram um bom acabamento para as três condições de usinagem. Os furos se mostraram sem marcas na superfície, com pequenas quebras na borda e uma boa rugosidade (valores de  $R_a$  em torno de  $2 \mu\text{m}$ ). Deste ponto de vista, a geometria com quinas chanfradas pode trazer benefícios, por minimizar a quebra do furo na saída, mantendo uma rugosidade satisfatória [3, 44].

Nos ensaios realizados com a geometria C, a qualidade da superfície nas condições de usinagem 1 e 2 foi satisfatória. Em relação à borda do furo, o resultado obtido nas condições 2 e 3 foi deficiente, principalmente na condição 3, onde a quebra da borda do furo foi bastante considerável. Com esta geometria obteve-se uma superfície livre de marcas, com exceção da condição 3, que apresentou marcas em espiral. A rugosidade nas três condições foi satisfatória, com um valor máximo  $R_a$  de  $2 \mu\text{m}$ .

A geometria D apresentou resultados de rugosidade satisfatórios nas três condições de usinagem, com valores de  $R_a$  entre  $1,5$  e  $2 \mu\text{m}$ . Porém, em relação à qualidade da borda do furo, nas três condições foram observados resultados deficientes.

Foi possível estabelecer que a velocidade de avanço é um fator determinante na qualidade do furo na usinagem de ferro fundido cinzento. Uma velocidade de avanço alta, somada a uma ferramenta deteriorada, pode gerar defeitos de quebras na borda do furo na saída [2, 44].

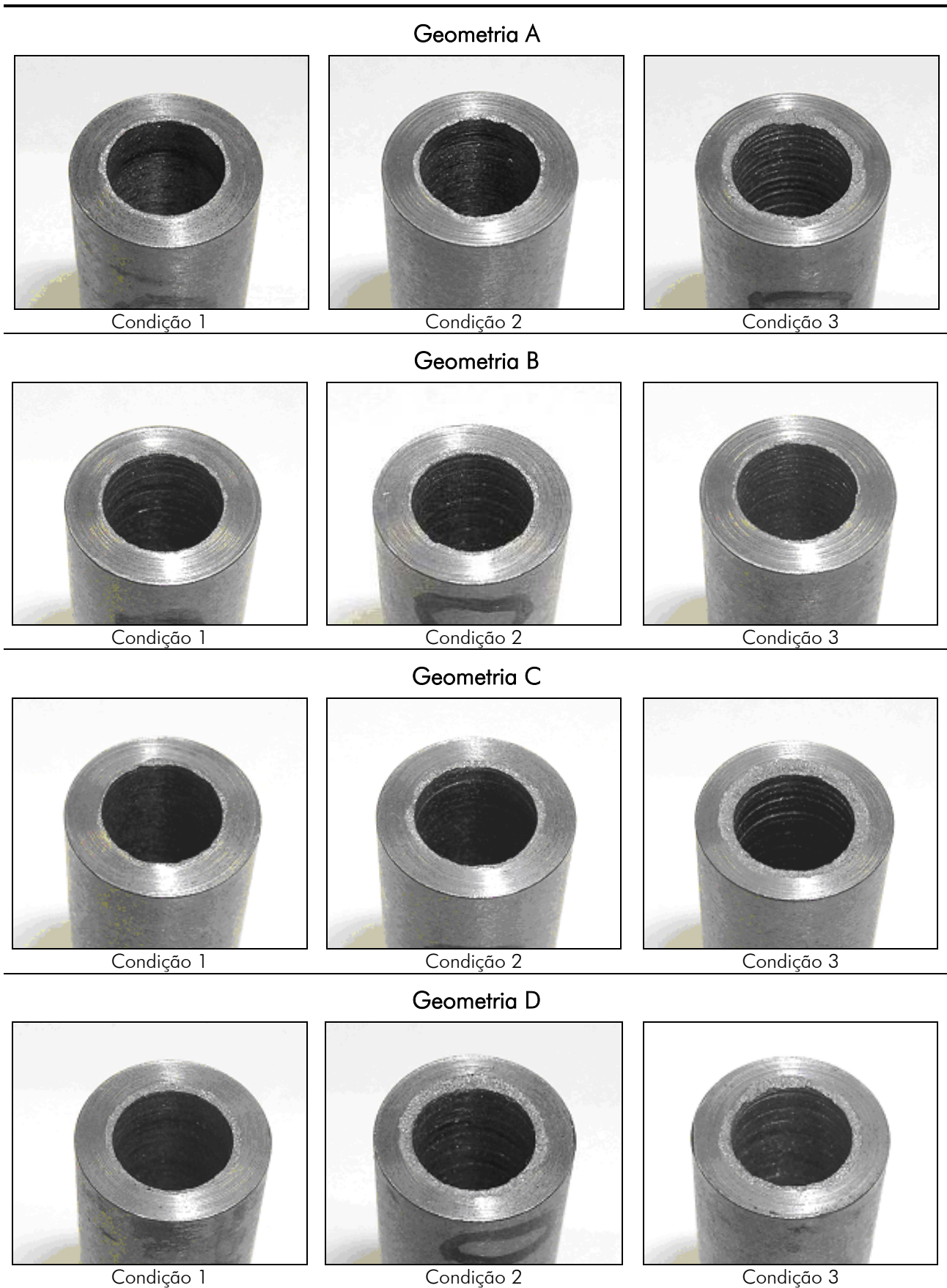


Figura 4.36 – Análise qualitativa dos furos

## 5 CONCLUSÕES E SUGESTÕES

### 5.1 Conclusões

Na maioria dos processos de usinagem, existe uma grande influência dos parâmetros de corte sobre as variáveis de saída do mesmo. Particularmente no processo de furação profunda, além dos parâmetros de usinagem, a rigidez da máquina tem uma importância redobrada, pois as solicitações devido ao comprimento em balanço da ferramenta, bem como às condições críticas de usinagem, são fatores de perturbação do processo.

Dentre as condições de usinagem testadas nesta pesquisa, a velocidade de corte apresenta influência sobre a qualidade da superfície apenas na condição de menor velocidade, 63 m/min, onde os valores de rugosidade  $R_a$  são inferiores aos obtidos com velocidades de corte maiores. Nesse parâmetro de usinagem, as solicitações sobre a rigidez da máquina são menos críticas. Por outro lado, à medida que é aumentado o avanço, a qualidade da superfície piora em todas as condições de velocidades testadas.

As tolerâncias dimensionais dos furos são claramente influenciadas pelos parâmetros de usinagem avanço e velocidade de corte. Com o aumento do avanço, o diâmetro do furo aumenta, e de igual forma, à medida que a velocidade de corte é aumentada, o diâmetro do furo torna-se maior.

A tolerância de cilindridade dos furos mostrou-se sensível principalmente aos parâmetros de avanço e velocidades máximos testados (0,2 mm e 125 m/min), onde os resultados não foram satisfatórios. Nessa faixa de parâmetros, os maiores esforços gerados durante a usinagem contribuem para o surgimento de vibrações, deformações ou desbalanceamentos da máquina-ferramenta, que repercutem negativamente nas tolerâncias de cilindridade do furo. Já os resultados mais favoráveis em relação à tolerância de cilindridade foram verificados para a velocidade de 63 m/min, com avanços na faixa entre 0,063 e 0,12 mm.

A tolerância de circularidade mostrou pequenas variações em função dos parâmetros de avanço e velocidade (na faixa de 3 a 9  $\mu\text{m}$ ). Da mesma forma que ocorreu com a tolerância de cilindridade, em maiores parâmetros de avanço e velocidade, a tolerância de circularidade mostra uma tendência a aumento.

Em relação aos esforços de usinagem, na faixa de velocidades testadas existe baixa influência da velocidade de corte sobre a força de avanço e o momento torçor. Por outro lado, a relação direta existente entre a espessura do cavaco e a força de avanço faz com que à medida que aumenta o avanço, a força aumente significativamente. Da mesma forma, o momento torçor cresce de forma significativa conforme o avanço é aumentado.

Nesta pesquisa foi utilizada uma metodologia de avaliação de desgaste em brocas, que consistiu no monitoramento dos desgastes das ferramentas em chão-de-fábrica. A metodologia utilizada proporcionou resultados válidos para a avaliação dos desgastes  $VB_{max}$  com boa repetitividade dos resultados. Isto permitiu reduzir o número de ferramentas testadas, diminuindo o número de testes e simplificando os ensaios. De igual maneira, a metodologia utilizada para a avaliação dos esforços de usinagem mostrou resultados de repetitividade satisfatórios.

Em relação aos resultados da análise comparativa dos quatro tipos de geometrias testadas, foram concluídos vários aspectos, comentados a seguir:

O efeito da velocidade de corte sobre o desgaste das ferramentas mostrou-se, como esperado, bastante forte em todas as geometrias, pois à medida que a velocidade de corte aumenta, a taxa de desgaste torna-se consideravelmente maior. Assim, os melhores resultados de vida em todas as geometrias, foram verificados com a utilização da velocidade de corte mais baixa, com a qual os efeitos da temperatura são menos significativos, proporcionando um maior tempo de vida para as ferramentas.

Dentre as ferramentas testadas na análise comparativa, as ferramentas com geometria B apresentaram as melhores vidas. Na condição 1, com velocidade de corte de 112 m/min, a geometria A mostrou um rendimento aproximadamente 40% menor que os tempos de vida obtidos com a ferramenta com geometria B. A respeito da ferramenta C, o desempenho foi em torno de 65% inferior à ferramenta B. Já a ferramenta C apresentou uma vida aproximada 35% menor em relação à ferramenta B. Nas demais condições de velocidades testadas, a tendência dos resultados se manteve muito próxima da condição 1, com uma sensível redução na vida das ferramentas, principalmente na geometria C, decorrente do aumento da velocidade de corte.

A análise econômica revelou que a geometria B supera as demais geometrias em relação à velocidade de mínimo tempo de fabricação, o que implica diretamente em o tempo de fabricação por peça ser menor. Além disso, em relação ao custo máximo de

produção, a geometria B também se mostrou mais favorável, com o menor valor das quatro geometrias.

O desempenho econômico menos favorável foi verificado na geometria C. As velocidades de máxima e ótima produção nesta geometria foram as mais baixas dentre todas as geometrias testadas. De igual forma os custos de mínima e máxima produção, foram os mais elevados.

Em relação à comparação dos esforços de usinagem, nas condições de velocidade testadas, todas as geometrias mostraram um acréscimo superior a 30%, da condição de ferramenta nova para a condição de ferramenta no fim de vida. No caso das geometrias A, B e C o aumento dos esforços ultrapassou 50%.

As quatro geometrias mostraram uma mesma tendência, para a condição de ferramenta nova, em relação à força de avanço. Ficou evidente a pouca influência da velocidade de corte sobre as forças de usinagem.

Não é possível afirmar que as geometrias A, B e C gerem valores de esforços diferentes nas condições de velocidade de 112 e 125 m/min. Já na condição de velocidade de 140 m/min, as geometrias A, B e C geraram valores com uma diferença significativa de força de avanço, sendo a geometria C a que apresentou os menores valores. A geometria D, mesmo com ângulo de ponta de  $120^\circ$  (igual à geometria A), mostrou os valores mais elevados de força de avanço em todas as condições testadas, o que leva a confirmar que a qualidade da superfície (superfície de saída, flanco, guias etc.) na afiação dessa ferramenta refletiu diretamente sobre as forças de usinagem nessa geometria.

Em relação ao momento torçor, nas condições de velocidade de 112 e 125 m/min, as tendências dos resultados foram similares, sendo que o maior momento torçor foi apresentado pela geometria D. Já na condição de velocidade de 140 m/min, entre as geometrias A, B, e C não foi observada nenhuma diferença significativa. No entanto, a geometria D difere das demais. A geometria D se manteve como a ferramenta com maior valor de momento torçor em todos os casos.

A qualidade da superfície obtida pelas quatro geometrias testadas foi satisfatória até o fim de vida de cada ferramenta, sendo que os valores de rugosidade  $R_a$  em todas as condições de usinagem ensaiadas se mantiveram na faixa de 1,0 a 3,0  $\mu\text{m}$ .

As quatro geometrias testadas mostraram uma boa estabilidade nos resultados de cilindridade nas condições de usinagem 1 e 2. Na condição 3, na qual a velocidade de

cutte sobe para 140 m/min, observou-se que a geometria B mostrou um desempenho superior.

A respeito da cilíndricidade, a geometria B mostrou maior estabilidade nos resultados em relação às demais geometrias, as quais mostraram grandes flutuações nos resultados.

As melhores qualidades de furo obtidas com as ferramentas testadas nas três condições de usinagem correspondem à classe IT9, as quais foram obtidas com a geometria B e a geometria C.

Em relação à análise qualitativa dos furos realizada, a geometria B mostrou melhores resultados. Os furos obtidos utilizando a geometria B se mostraram sem marcas na superfície, com pequenas quebras na borda e uma rugosidade aceitável até o fim da vida da ferramenta.

## 5.2 Sugestões para Futuros Trabalhos

A literatura ressalta as vantagens da utilização do tipo de ferramentas utilizadas neste trabalho para o material e a profundidade de furos testados. Recomenda-se que nos próximos trabalhos sejam explorados outros tipos e materiais de ferramentas, assim como também a utilização de revestimentos. Dessa forma, seriam testadas outras faixas dos parâmetros de corte.

Outra sugestão está relacionada aos efeitos do fluido lubri-refrigerante sobre as grandezas de saída do processo, sobre o qual poderiam ser investigadas outras condições de pressão, vazão ou concentração do fluido.

Sugere-se uma avaliação mais profunda dos furos usinados, adotando também outros parâmetros de avaliação da qualidade, como linearidade e batimento.

Uma outra sugestão seria fazer um estudo detalhado da integridade da superfície ao longo do furo, em diversas condições de corte.

Recomenda-se também realizar um estudo focalizado na área de vibrações para o conhecimento de suas conseqüências no processo de furação profunda.

Sugere-se verificar a aplicação de outros tipos de brocas ou processos para a profundidade de furo e material testado.

## 6 REFERÊNCIAS

- [1] TÖNSHOFF, H. *et al.* **Machines of holes – developments in drilling technology.** Annals of CIRP, v. 43, p. 551-561, 1994.
- [2] STEMMER, C. E. **Ferramentas de corte I.** 5ª Edição, Florianópolis: Editora da UFSC, 2001, 249 p.
- [3] ARONSON R. B. **Some fresh ideas for hole drilling.** Manufacturing Engineering, v. 131, n. 3, p. 75-84, set. 2003
- [4] DINIZ, A. E. **Tecnologia da usinagem dos materiais.** São Paulo, Art. Líber Editora, 2000, 256 p.
- [5] SANDVIK COROMANT. **Modern metal cutting: a practical handbook.** 1ª Edição. Suécia, 1994. 840 p.
- [6] KÖNIG, W., KLOCKE, F. **Fertigungsverfahren: drehen, fräsen, bohren.** 5 ed. Berlin: Springer, 1997, 471 p.
- [7] EI-KHABEERY M. *et al.* **Some observations of surface integrity of deep drilling holes.** Elsevier, Cairo, Egypto, v. 142, p. 331-349, 1990.
- [8] GODOY J. M. **Furação profunda no alumínio de aviação com brocas normais.** 1988. 86 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 1988.
- [9] 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.
- [10] CHIN J. *et al.* **The shaft behavior of BTA deep hole drilling tool.** Elsevir, Int. J. Mech. Sci., v. 38, n. 5, p. 461-482 1996.
- [11] Efunda. **Drilling machining.** Disponível em: <[http://www.efunda.com/processes/machining/drill\\_press.cfm](http://www.efunda.com/processes/machining/drill_press.cfm)>. Acesso em: 20 de julho de 2004.



- [12] BORK, C. S. **Otimização de variáveis de processo para a furação do aço inoxidável austenítico DIN 1.4541**. 1995.127 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 1995.
- [13] SCHROETER, R.B. *et al.* **Estudo comparativo de desempenho de brocas DIN 338**. Florianópolis, 1999. 32 p.
- [14] TIKAL F., KAMMERMEIER D. **Vollhartmetallbohrer und –fräser**. Lech: Verlag moderne industrie, 1993. 73 p.
- [15] CHEN Y. C., LIAO Y. S. **Study on wear mechanisms in drilling of inconel 718 superalloy**. *Journal of Materials Processing Technology*, v. 140, p. 271-273, 2003.
- [16] FERRARESI, D. **Fundamentos da usinagem dos metais**. São Paulo: Edgard Blücher, 1977, 751 p.
- [17] GÜHRING – **Die ratiobohrer und ihre praxisgerechte anwendung**. Catálogo do fabricante. Albstadt, Alemanha, 1997. 156 p.
- [18] SCHROETER, R.B. *et al.* **Otimização do processo de furação e acabamento guias de válvulas**. Florianópolis: UFSC, 2003. 86 p. (1º Relatório – Projeto Verde-Amarelo).
- [19] BUNSHAH R. F. **Handbook of hard coatings: depositions technologies, properties and applications**. New Jersey: Noyes Publications, 2001. 550 p.
- [20] MICHELETTI, G. F. **Mecanizado por arranque de viruta**. 2ª Edição, Barcelona: Editorial Blume, 1980, 426 p.
- [21] CHILDS T *et al.* **Metal machining theory and applications**. 1 ed. Londres: Arnold, 2000. 400 p.
- [22] CASTRO, P. **Aspectos tecnológicos da usinagem a seco com mínima quantidade de fluido de corte na furação com broca helicoidal**. 2001. 180 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2001.

- [23] SMALLMAN R. E., BISHOP J. R. **Modern physical metallurgy and materials engineering**: Science, process, applications. 6 ed. Oxford: Butterworth Heinemann, 1999. 471 p.
- [24] BRINKSMEIER E. **Prediction of tool fracture in drilling**. Annals of the CIRP, 39, P 97-100, 1990.
- [25] KANAI M. *et al.* **Statistical characteristics of drill wear and drill life for standardized performance tests**. Annals of the CIRP, 27, p. 61-66, 1978.
- [26] VILLARROEL, J. C. **Análise comparativa entre furação com brocas para furos curtos de insertos reversíveis e brocas helicoidais**. 1991.112 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 1991.
- [27] BOEHS, L., SCHUITEK, A J., LEPKSON, M. **Estudo comparativo do desempenho de brocas com diversos tipos de revestimentos e várias geometrias na usinagem do aço SAE 4340 e do ferro fundido FE-450-12**. Florianópolis: LMP, 1992. 58p.
- [28] GOPAL S. U. **Cemented tungsten carbides production, properties, and testing**. Kanpur, Índia: Noyes Publications, 1998, 436 p.
- [29] LASSNER, E; SCHUBERT, W. **Tungsten, properties, chemistry, technology of the element, alloys, and chemical compounds**. Vienna: Kluwer Academic / Plenum Publishers, 1999. 434 p.
- [30] GUHRING – **Herramientas de corte de precisión**. Catálogo del fabricante. Albstadt, 2002. 1114 p.
- [31] CSELLE T. **Carbide drills: ate the peak of development**. Ratio drills and their applications. 3 ed. Albstadt, Guhring. 169 p.
- [32] UHLMANN E. *et al.* **Wear behavior of HFCVD-diamond coated carbide and ceramic tools**. Surface and coatings technology, 131, p. 395-399, 2000.
- [33] BUNSHAH R. F. **Handbook of depositions technologies for films and**. 2 ed.

New Jersey: Noyes Publications, 1994. 888 p.

[34] PIERSON H. O. **Handbook o chemical vapor deposition (CVD): principles, technology and applications**. 2 ed. New York: Noyes Publications, 1999, 498 p.

[35] DONALD M. **Handbook of physical vapor deposition (PVD) processing**. New Jersey: Noyes Publications, 1998, 790 p.

[36] SANTOS S. *et al.* **Tribological characterization of PVD coatings for cutting tools**. *Surface and Coatings Technology*, v. 184, p. 141-148, 2004.

[37] KORLOY. **Cutting tool grades and chip-breakers**. Disponível em: <[http://www.korloy\\_com-eng-e\\_mainF.html](http://www.korloy_com-eng-e_mainF.html)>. Acesso em: 5 de outubro de 2004.

[38] WICK, C. *et al.* **Tool and manufacturing engineers handbook: a reference book for manufacturing engineers, managers, and technicians**. 4th ed. Michigan: Society of Manufacturing Engineers, 1988.

[39] DRAKE P. J. **Dimensioning and tolerancing handbook**. New York: McGraw-Hill, 1999.

[40] MITUTOYO. **User's manual: Roundtest RA-400**. Manual do usuário rugosímetro Mitutoyo, 1999.

[41] FUNDAÇÃO CERTI. **Curso: tolerâncias geométricas – GD&T**. Rio do Sul, 2003, 192 p.

[42] DORNFELD D. *et al.* **Drilling burr formation in titanium alloy, Ti-6Al-4V**. *Annals of the CIRP*, v. 48, P. 73-76, 1999.

[43] NAKAYAMA K. *et al.* **Burr formation in metal cutting**. *Annals of the CIRP*, v. 36, P. 33-36, 1987.

[44] SOARES FILHO, M. **Estudo da formação de rebarbas no processo de furação**. 1995. 145f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 1995.

[45] STEIN J. M., DORNFELD D. A. **Burr formation in drilling miniature holes**.

Annals of the CIRP, v. 46, P. 63-66, 1997.

[46] FACCIO, I. **Investigação sobre o acabamento superficial de usinagens com altíssima velocidade de corte.** 2002. 126 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade de São Paulo Escola Politécnica, São Paulo, 2002.

[47] BET, L. **Estudo da medição da textura de superfícies com sondas mecânicas e com sondas ópticas tipo seguidor.** 1999. 350 f. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) - Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 1999.

[48] Deutsches Institut für Normung e.v. **Terminology of cutting; additional terms for the tool, wedge and the cutting edge.** DIN 6580, 1988.

[49] 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) - Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 1995.

[50] Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR6176: brocas helicoidais. Rio de Janeiro, 1978.

[51] ROCHA, A. **Determinação de um modelo de força de usinagem para a furação, a partir do modelo de força de usinagem do torneamento.** 1985. 117 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 1985.

[52] 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) - Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 1989.

[53] Iowa Waste Reduction Center. **Cutting fluid management for small machining operations: a practical pollution prevention guide.** 3 ed. University of Northern Iowa, 2003, 62 p.

- [54] HAAN D. *et al.* **An experimental study of cutting fluid effects in drilling.** Elsevier, Journal of materials processing technology, v. 71, P. 305-313, 1997.
- [55] SEAH K. *et al.* **The effect of applying coolant on tool wear in metal machining.** Elsevier, Journal of materials processing technology, v. 48, P. 495-501, 1995.
- [56] CALLISTER, William D. **Materials science and engineering: an introduction.** 5 ed. New York: J. Wiley, 1999. 871p.
- [57] CARDONA A. *et al.* **Caracterización de la fundición gris.** Revista Colombiana de física, v. 34, n. 1, 6 p, 2002.
- [58] Pnlinternet. **Canlin castings: ferrous and non ferrous founders.** Disponível em: <<http://www.canlincastings.co.uk/grades.html>>. Acesso em: 7 de agosto de 2004.
- [59] CHEREMIISINOFF, N. **Materials selection deskbook.** Westwood: Noyes publications, 1996. 191 p.
- [60] BURKE C. M. *et al.* **Machinability of gray cast iron: a drilling study.** Modern casting, março de 2001, 9 p. Disponível em: <<http://www.moderncasting.com/>>. Acesso em: 23 setembro 2003.
- [61] AFS. **Iron castings engineering handbook.** American Foundry Society, 2003, 420p.
- [62] Bertol, H. C., Sena L. **Otimização de Condições de Usinagem no Planejamento de Processos.** Trabalho apresentado na disciplina de Planejamento de Processo CAPP do curso de Mestrado em Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Santa Catarina, 2004, 47 p.
- [63] Deutsches Institut für Normung e.v. **Preferred numbers and series of preferred numbers; basic values, calculated values, rounded values.** DIN 323.1, 1974.
- [64] MONTGOMERY D. C. **Diseño y análisis de experimentos.** 2 ed. Mexico: Limusa Wiley, 2002. 687 p.

- [65] WANG Z. M. *et al.* **Advances in precision machining of small deep holes.** *Journal of Materials and Processing Technology*, v. 68, p. 257-261, 1997.
- [66] KIM D., RAMULU M. **Drilling process optimization for graphite/bismaleimide-titanium alloy stacks.** *Composite Structures*, v. 63, p. 101-114, 2004.
- [67] DENG C. *et al.* **Effects of support misalignments in deep-hole drill shafts on hole straightness.** *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, v. 41, p. 1165-1188, 2001.
- [68] MUTHUKRISHNA S., SUJATHA C. **Twist drill deformation and optimum drill geometry.** *Computers & Structures*, v. 57, n. 5, p. 903-914, 1995.
- [69] KUDLA L. **Influence of feed motion features on small holes drilling process.** *Journal of Materials Processing Technology*, v. 109, p. 236-241, 2001.
- [70] GAO C. *et al.* **The investigation on the machining process of BTA deep hole drilling.** *Journal of Materials Processing Technology*, v. 107, p. 222-227, 2000.
- [71] LIN S.C., TING C. J. **Tool wear monitoring in drilling using force signals.** Elsevier, *Wear*, v. 180, p. 53-60, 1994.
- [72] RABINOWICZ, E. **Friction and wear of materials.** 2 ed., New York: John Wiley & Sons, 1995, 315p.
- [73] COLDWELL H.L. *et al.* **The use of soft/lubricating coatings when dry drilling BS L168 aluminium alloy.** Elsevier, *Surface & coatings technology*, v. 177-178, P. 716-726, 2004.
- [74] HARRIS S.G. *et al.* **A study of the wear mechanisms of  $Ti_{1-x}Al_xN$  and  $Ti_{1-x}Al_xCr_yN$  coated high-speed steel twist drills under dry machining conditions.** Elsevier, *Wear*, v. 254, p. 723-734, 2003.
- [75] SANTOS, C. S. **Furação de ferro fundido cinzento com brocas de metal duro integral.** 1999, 105 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) Universidade Federal de Uberlândia, Centro de Ciências Exatas e Tecnologia, Uberlândia.