

MINISTERIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

ESTUDO DA RELAÇÃO ENTRE VELOCIDADE DE CORTE, DESGASTE DE
FERRAMENTA, RUGOSIDADE E FORÇAS DE USINAGEM EM TORNEAMENTO COM
FERRAMENTA DE METAL DURO

por

Heraldo José de Amorim

Dissertação para obtenção do título
de Mestre em Engenharia

Porto Alegre, 13 de maio de 2002

Estudo da relação entre velocidade de corte, desgaste de ferramenta, rugosidade e forças de usinagem em torneamento com ferramenta de metal duro

por

Heraldo José de Amorim

Engenheiro Mecânico

Dissertação submetida ao corpo Docente do programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, PROMEC, da Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como parte dos requisitos necessários para a obtenção do título de

Mestre em Engenharia

Área de concentração: Mecânica dos sólidos

Orientador: Augusto Oscar Kunrath Neto

Comissão de avaliação:

Prof. Dr. Flávio José Lorini

Prof. Dr. José Antônio Esmerio Mazzaferro

Prof. Dr. Marco Antônio Durlo Tier

Alberto Tamagna Dr.

Coordenador do PROMEC

Porto Alegre, 13 de maio de 2002

Para Anelise

AGRADECIMENTOS

Agradeço a todos que, de uma forma ou de outra, ajudaram no desenvolvimento deste trabalho, seja através de participação intelectual, logística, suporte financeiro à pesquisa ou mesmo proporcionando calma e tranqüilidade para que este trabalho pudesse ser realizado. Desse modo, agradeço:

Ao professor Augusto Oscar Kunrath Neto, Ph.D Eng., orientador deste trabalho.

Aos professores Wilson Batista, Dr. Eng. e José Luiz Duarte Ribeiro, Dr. Eng.

A Ricardo G. Mombu, Ms.C. Eng. e Luiz Fernando Pereira de Carvalho, Ms.C. Eng.

Aos bolsistas do Laboratório de Usinagem Cristof Leonhardt, Daniel K. Saraiva, Daniel E. Teles, Gustavo Duciak, Henrique Kohmann, Márcio Afonso Schmidt e Tiago V. Capelari.

Aos funcionários do PROMEC Paulo Kutter e Helen Flores.

Aos professores participantes da banca.

A todos os amigos e colegas alunos do PROMEC.

A minha família, por me proporcionar (quase sempre) a tranqüilidade necessária para a elaboração deste trabalho, e a Anelise pela paciência.

Ao SENAI-CETEMP e a Aços Finos Piratini, pelo auxílio à pesquisa realizada neste trabalho.

RESUMO

O entendimento do processo de fabricação por usinagem passa pelo estudo de fenômenos de formação de cavaco, esforços de corte, qualidade superficial do material usinado, mecanismos de desgaste de ferramenta e a influência de parâmetros de corte e tipo de material usado sobre essas variáveis. Neste contexto, o objetivo principal deste trabalho é analisar os efeitos do desgaste de ferramenta sobre as forças de corte e a rugosidade dos componentes usinados.

O procedimento adotado foi a realização de ensaios de usinabilidade de longa duração em torneamento cilíndrico externo, durante os quais foram medidos desgaste de flanco, força de corte, força de avanço e rugosidade média dos componentes usinados. Os ensaios foram realizados para os aços ABNT 1040 e 1045 usando ferramentas de metal duro com revestimento duplo (TiN-Al₂O₃). Os resultados de vida de ferramenta foram analisados através da equação de Taylor, com maiores vidas de ferramenta observadas para o aço ABNT 1040 em todas as velocidades de corte testadas. As demais variáveis medidas foram analisadas em função do tempo de usinagem, desgaste de flanco máximo e acabamento superficial.

No domínio do tempo, foram encontradas correlações fortes para o desgaste de flanco máximo, força de corte e força de avanço para ambos os materiais. A relação entre a rugosidade média e o tempo de corte observada foi mais “estável” para o aço ABNT 1040. Contudo, variações no comportamento da rugosidade média foram observadas na velocidade de corte inferior usada na usinagem do aço ABNT 1045, devido ao desgaste mais lento do raio de ponta de ferramenta. Não se observou relação entre as forças de usinagem e a rugosidade média. A relação entre a força de corte e o desgaste de flanco máximo apresentou forte correlação para ambos os materiais, assim como a relação entre a força de avanço e o desgaste de flanco máximo, sendo realizada regressão linear para ambas as relações. Foi observada fraca influência da velocidade de corte nas relações força-desgaste de flanco, o que sugere que uma única equação pode descrever estas relações para toda a faixa de condições de corte estudada. Os resultados da análise de regressão permitem a determinação do desgaste de flanco máximo em função da força de corte com um erro médio de 15% para os aços ABNT 1040 e 1045. Para a previsão do desgaste de flanco em função da força de avanço, o erro médio encontrado foi de 19% para o aço ABNT 1040 e 15% para o aço ABNT 1045.

Palavras chave: Forças de Corte, Desgaste de Ferramenta, Usinabilidade, Acabamento Superficial, Equação de Taylor.

ABSTRACT

“Study of the relationship between cutting speed, tool wear, surface finish and machining forces in turning with carbide tool”

The understanding of machining processes comprehends the study of the phenomena of chip forming, cutting forces, surface finish, tool wear mechanisms and the influence of the cutting parameters and machined materials on them. The aim of this work is to analyze the tool wear effects on the machining forces and surface finish of the machined components.

Long-term turning tests were performed, and cutting time, cutting force, feed force, tool wear and surface roughness were measured. ABNT 1040 and 1045 steels, and double-coated (TiN – Al₂O₃) carbide tool were used in the experiments. The tool life results were analyzed through the Taylor equation, with the best tool lives found for the ABNT 1040 steel on all tested cutting speeds. The other measured variables were analyzed as function of time, tool wear and surface finish.

On the time domain, strong correlations for tool wear, cutting force and the feed force for both materials were found. The relationship between the surface roughness and the cutting time was found to be stronger for the ABNT 1040 steel, but variations at the lowest cutting speed for the ABNT 1045 were observed due to the slower wear rate of the nose radius. No relationships were observed between the cutting or the feed force and the surface roughness. The relationship between the cutting force and the tool wear showed strong correlation for both materials, as the feed force and tool wear relationship, and linear regression analyses were made for both. Weak influence of the cutting speed on the tool wear-machining forces relationships was observed, that suggest that a single equation can describe them for all the cutting conditions studied with suitable accuracy. The regression results are able to provide the tool wear as a function of the cutting forces with an average error about 15% for the ABNT 1040 and 1045 steel. For the prediction of tool wear as a function of feed force, the average error are about 19% for the ABNT 1040 steel and 15% for the ABNT 1045 steel.

Keywords: Cutting forces, Tool wear, Machinability, Surface finish, Taylor curve.

ÍNDICE

| | |
|---|-----------|
| 1. INTRODUÇÃO..... | 1 |
| 2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA..... | 4 |
| 2.1 Usinagem..... | 4 |
| 2.1.1 Torneamento..... | 4 |
| 2.1.2 Geração de Cavaco..... | 8 |
| 2.1.3 Tipos de Cavaco..... | 10 |
| 2.1.4 Formas de Cavaco..... | 12 |
| 2.1.5 Materiais de Ferramenta de Corte..... | 14 |
| 2.1.6 Falha e Desgaste de Ferramentas de Corte..... | 16 |
| 2.1.6.1 Tipos de desgaste de ferramenta..... | 16 |
| 2.1.6.2 Critérios de fim de vida de ferramenta segundo a norma ISO 3685 /1993.... | 19 |
| 2.1.6.3 Mecanismos de desgaste de ferramenta de corte..... | 20 |
| 2.1.7 Acabamento superficial..... | 22 |
| 2.1.7.1 Parâmetros de rugosidade..... | 23 |
| 2.1.8 Forças de corte..... | 26 |
| 2.1.8.1 Pressão Específica de Corte..... | 28 |
| 2.1.8.2 Fatores que afetam as forças de usinagem..... | 30 |
| 2.2 Usinabilidade..... | 36 |
| 2.2.1 Fatores Ligados ao Material da peça que Afetam a Usinabilidade..... | 37 |
| 2.2.1.1 Efeito dos elementos de liga na usinabilidade de aços..... | 38 |
| 2.2.1.2 Efeito das propriedades do material na usinabilidade..... | 39 |
| 2.2.2 Ensaios de Usinabilidade..... | 40 |
| 2.2.2.1 Ensaios de Usinabilidade sem Usinagem..... | 42 |
| 2.2.2.2 Ensaios de usinabilidade que requerem usinagem..... | 44 |
| 2.2.2.2.1 Testes Relativos..... | 44 |
| 2.2.2.2.2 Ensaios Absolutos..... | 45 |
| 3. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL..... | 48 |
| 3.1 Material ensaiado..... | 48 |
| 3.2 Corpos de Prova..... | 49 |
| 3.3 Parâmetros de corte..... | 50 |
| 3.4 Equipamentos..... | 51 |
| 3.5 Procedimento..... | 53 |

| | |
|--|------------|
| 4. RESULTADOS | 54 |
| 4.1 Resultados dos ensaios em função do tempo de corte | 54 |
| 4.1.1 Resultados para $V_{B \text{ Max}} \times t$ | 54 |
| 4.1.2 Resultados para Forças de usinagem em função do tempo de corte | 58 |
| 4.1.3 Resultados de rugosidade em função do tempo de usinagem..... | 65 |
| 4.2 Resultados em função do desgaste de flanco máximo | 68 |
| 4.2.1 Resultados para Forças de usinagem em função do desgaste de flanco máximo | 68 |
| 4.2.2 Resultados para rugosidade média em função do desgaste de flanco máximo | 76 |
| 4.3 Resultados relativos à rugosidade | 78 |
| 4.3.1 Rugosidade em função das forças de usinagem..... | 79 |
| 5. DISCUSSÃO..... | 82 |
| 5.1 Resultados em função do tempo de corte | 82 |
| 5.2 Resultados em função do desgaste de flanco máximo | 84 |
| 5.3 Resultados de rugosidade média Ra | 94 |
| 6. CONCLUSÕES | 96 |
| 7. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS..... | 98 |
| 8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS | 99 |
| 9. ANEXO 1 – PLANILHAS DE RESULTADOS | 102 |
| 10. ANEXO 2 – RESULTADOS DE Ra EM FUNÇÃO DE F_c E F_f..... | 113 |

LISTA DE SÍMBOLOS

| | |
|-------------|---|
| A | Área [mm ²] |
| a_p | Profundidade de corte [mm] |
| A_r | Redução de área obtida em ensaio de tração [$\Delta A/A$] |
| A_α | Superfície de folga |
| A'_α | Superfície secundária de folga |
| A_γ | Superfície de saída |
| APC | Aresta postiça de corte |
| b | comprimento da aresta de corte [mm] |
| B | Condutividade térmica [kCal/h.m ² .°C] |
| Ck_s | Constante para a determinação de K_s segundo Kronenberg |
| C_W | Constante relativa ao material usinado para a determinação de K_s segundo AWF |
| C_z | Constante para a determinação de K_s segundo ASME |
| D | Constante para a determinação da V_{60} na usinagem de um material segundo Janitzkg |
| f | Avanço [mm/volta] |
| F_c | Força de corte [N] |
| F_f | Força de avanço [N] |
| F_p | Força passiva [N] |
| F_t | Força ativa [N] |
| F_u | Força de usinagem [N] |
| f_s | Constante para a determinação de K_s segundo Kronenberg |
| G | Índice de esbeltez [a_p/f] |
| g_s | Constante para a determinação K_s segundo Kronenberg |
| h | Espessura de corte [mm] |
| H_B | Dureza [Brinell] |
| H_P | Dureza do material da peça [HB] |
| H_r | Dureza relativa entre o material da ferramenta e peça [H_T/H_P] |
| H_T | Dureza do material da ferramenta [HB] |
| I.U. | Índice de usinabilidade |
| K | Constante da equação de Taylor |
| K_s | Pressão específica de corte [N/mm ²] |
| K_{sI} | Constante para a determinação de K_s segundo Kienzle |
| KF | Distância frontal entre cratera e flanco [mm] |

| | |
|-----------------|---|
| KT | Profundidade de cratera [mm] |
| L | Comprimento [mm] |
| l_m | percurso de medição de rugosidade média [mm] |
| n | Constante para a determinação da pressão específica de corte segundo ASME |
| P_o | Plano ortogonal |
| P_r | Plano de referência |
| P_s | Plano de corte |
| Q | Taxa de remoção de material [cm ³ /min] |
| R_a | Rugosidade média [μm] |
| r_e | Raio de ponta da ferramenta [mm] |
| S | Aresta principal de corte |
| S' | Aresta secundária de corte |
| s | Desvio padrão |
| T | Tempo de vida útil de uma ferramenta de corte [min] |
| t | Tempo [min] |
| V_{60} | Velocidade de corte relativa a uma vida de ferramenta de 60 minutos [m/min] |
| V_B | Desgaste de flanco médio [mm] |
| $V_{B\ Max}$ | Desgaste de flanco máximo [mm] |
| V_c | Velocidade de Corte [m/min] |
| V_{cav} | Volume do cavaco [cm ³] |
| V_p | Volume do material [cm ³] |
| T | tempo de vida da ferramenta de corte [min] |
| x | Constante da equação de Taylor |
| z | Constante para a determinação de K_s segundo Kienzle |
| \mathbf{a} | Ângulo de folga [°] |
| \mathbf{a}_0 | Ângulo de folga medido no plano ortogonal [°] |
| \mathbf{c}_r | Ângulo de posição da ferramenta medido no plano de referência [°] |
| \mathbf{c}'_r | Ângulo de posição secundário da ferramenta no plano de referência [°] |
| \mathbf{g} | Ângulo de saída [°] |
| \mathbf{g} | Ângulo de saída da ferramenta no plano ortogonal [°] |
| \mathbf{l}_s | Ângulo de inclinação da ferramenta medido no plano de corte [°] |
| \mathbf{w} | Coefficiente volumétrico do cavaco [V_{cav}/V_p] |

ÍNDICE DE FIGURAS

| | |
|--|----|
| Figura 2.1 – Classificação dos processos de fabricação (fonte: Machado e Silva)..... | 4 |
| Figura 2.2 – Operação de torneamento. | 5 |
| Figura 2.3 – Parâmetros de corte e superfícies em torneamento cilíndrico externo. | 6 |
| Figura 2.4 – Geometria da ferramenta de corte (Fonte: Machado e Silva, 1999)..... | 7 |
| Figura 2.5 – Ângulos da ferramenta de corte medidos (a) no plano de referência da ferramenta e (b) no plano ortogonal (fonte: Diniz et al.). | 7 |
| Figura 2.6 – Sistema de referência da ferramenta (adaptado de Ferraresi, 1970)..... | 8 |
| Figura 2.7 – Exemplo de corte ortogonal (fonte: Machado e Silva)..... | 9 |
| Figura 2.8 – Formação do cavaco (fonte: Machado e Silva). | 9 |
| Figura 2.9 – Classificação da forma dos cavacos, de acordo com a norma ISO 3685..... | 12 |
| Figura 2.10 – Variação do coeficiente volumétrico de acordo com o tipo de cavaco (fonte: Ferraresi, 1970). | 13 |
| Figura 2.11 – Variação da forma dos cavacos em função das variáveis de processo (fonte: Machado e Silva, 1999)..... | 13 |
| Figura 2.12 – Diagrama de dureza-tenacidade dos materiais de ferramentas de corte (Adaptado de Sandvick Coromant, 1994). | 14 |
| Figura 2.13 – Materiais para ferramentas de corte (fonte: Machado e Silva, 2000)..... | 15 |
| Figura 2.14 – Representação esquemática do desgaste de flanco. | 17 |
| Figura 2.15 – Representação esquemática do desgaste de cratera. | 18 |
| Figura 2.16 – Representação esquemática do desgaste de entalhe. | 18 |
| Figura 2.17 – Critérios de desgaste de ferramenta de corte (adaptado da norma ISO 3685)..... | 20 |
| Figura 2.18: Rugosidade média x coeficiente de transmissão de calor (fonte: Mitutoyo)..... | 23 |
| Figura 2.19 – Rugosidade média Ra (fonte: Mitutoyo). | 24 |
| Figura 2.20 – Variação da rugosidade com o processo de fabricação (fonte: Ferraresi, 1970). ... | 25 |
| Figura 2.21 – Variação da rugosidade com a velocidade de corte (fonte: Ferraresi, 1970)..... | 25 |
| Figura 2.22 – Contribuição geométrica do avanço e raio de ponta de ferramenta na rugosidade (fonte: Diniz et Al., 2000). | 26 |
| Figura 2.23 – Forças de usinagem (adaptado de Ferraresi, 1970)..... | 27 |
| Figura 2.24 – Determinação da área de contato ferramenta-peça para o cálculo da pressão específica de corte (adaptado de Ferraresi, 1970). | 28 |
| Figura 2.25 – Influência dos ângulos da ferramenta nas componentes da força de usinagem (fonte: Ferraresi, 1970)..... | 31 |

| | |
|--|----|
| Figura 2.26 – Influência de V_c na força de corte para vários materiais (fonte: Machado e Silva). | 32 |
| Figura 2.27 – (a) Efeito dos desgastes de flanco na força de corte para vários avanços; (b) efeito combinado dos desgastes de flanco e cratera na força de corte (fonte: Diniz et. al., 2000). | 33 |
| Figura 2.28 – Influência da seção de corte nas componentes da força de usinagem (fonte: Ferraresi, 1970). | 34 |
| Figura 2.29 – Influência da V_c nas forças de avanço e passiva (fonte: Ferraresi, 1970). | 35 |
| Figura 2.30 – Influência de C_r nas forças de avanço e passiva (fonte: Diniz et. al., 2000). | 35 |
| Figura 2.31 – Influência do ângulo de inclinação na força passiva (Fonte: Diniz et al., 2000). | 36 |
| Figura 2.32 – Influência do raio de ponta de ferramenta nas forças de avanço e passiva (Fonte: Diniz et. al., 2000). | 36 |
| Figura 2.33 – Principais fatores que influem na determinação da usinabilidade dos metais segundo Ferraresi (1970). | 37 |
| Figura 2.34 – Classificação dos ensaios de usinabilidade segundo Mills e Redford, 1983. | 40 |
| Figura 2.35 – Curva $V_B \times t$ (Fonte: ISO 3685, 1993). | 47 |
| Figura 2.36 – Curva $V_c \times T$. | 47 |
| Figura 3.1 – Representação esquemática do perfil de dureza dos materiais ensaiados. | 48 |
| Figura 3.2 – Micrografia transversal da superfície: (a) do aço ABNT 1040 e (b) do aço ABNT 1045. | 49 |
| Figura 3.3 – Representação esquemática dos corpos de prova usados nos ensaios do aço ABNT 1045. | 49 |
| Figura 3.4 – Representação esquemática dos corpos de prova usados nos ensaios do aço ABNT 1040. | 50 |
| Figura 3.5 – Ferramentas de corte utilizadas (fonte: sandvik coromant). | 50 |
| Figura 3.6 – Torno Romi Centur 30RV. | 51 |
| Figura 3.7 – Dinamômetro piezoelétrico Kistler 9257A. | 52 |
| Figura 3.8 – Rugosímetro Mitutoyo modelo surfptest 301. | 52 |
| Figura 3.9 – Microscópio de ferramentaria marca Mitutoyo modelo toolmakers TM-201. | 52 |
| Figura 3.10 – Representação esquemática dos ensaios realizados. | 53 |
| Figura 4.1 – $V_{B \text{ Max}}$ x tempo para o aço ABNT 1040 a 425 m/min. | 54 |
| Figura 4.2 – $V_{B \text{ Max}}$ x tempo para o aço ABNT 1040 a 475 m/min. | 55 |
| Figura 4.3 – $V_{B \text{ Max}}$ x tempo para o aço ABNT 1040 a 525 m/min. | 55 |
| Figura 4.4 – Curva de Taylor para o aço ABNT 1040. | 56 |
| Figura 4.5 – $V_{B \text{ Max}}$ x tempo para o aço ABNT 1045 a 355 m/min. | 56 |
| Figura 4.6 – $V_{B \text{ Max}}$ x tempo para o aço ABNT 1045 a 445 m/min. | 57 |

| | |
|---|----|
| Figura 4.7 – $V_{B\ Max}$ x tempo para o aço ABNT 1045 a 535 m/min. | 57 |
| Figura 4.8 – Curva de Taylor para o aço ABNT 1045. | 58 |
| Figura 4.9 – F_c x tempo para o aço ABNT 1040 usinado a 425 m/min. | 59 |
| Figura 4.10 – F_c x tempo para o aço ABNT 1040 usinado a 475 m/min. | 59 |
| Figura 4.11 – F_c x tempo para o aço ABNT 1040 usinado a 525 m/min. | 59 |
| Figura 4.12 – F_f x tempo para o aço ABNT 1040 usinado a 425 m/min. | 60 |
| Figura 4.13 – F_f x tempo para o aço ABNT 1040 usinado a 475 m/min. | 60 |
| Figura 4.14 – F_f x tempo para o aço ABNT 1040 usinado a 525 m/min. | 60 |
| Figura 4.15 – F_f/F_c x tempo para o aço ABNT 1040 usinado a 425 m/min. | 61 |
| Figura 4.16 – F_f/F_c x tempo para o aço ABNT 1040 usinado a 475 m/min. | 61 |
| Figura 4.17 – F_f/F_c x tempo para o aço ABNT 1040 usinado a 525 m/min. | 61 |
| Figura 4.18 – F_c x tempo para o aço ABNT 1045 usinado a 355 m/min. | 62 |
| Figura 4.19 – F_c x tempo para o aço ABNT 1045 usinado a 445 m/min. | 62 |
| Figura 4.20 – F_c x tempo para o aço ABNT 1045 usinado a 535 m/min. | 63 |
| Figura 4.21 – F_f x tempo para o aço ABNT 1045 usinado a 355 m/min. | 63 |
| Figura 4.22 – F_f x tempo para o aço ABNT 1045 usinado a 445 m/min. | 63 |
| Figura 4.23 – F_f x tempo para o aço ABNT 1045 usinado a 535 m/min. | 64 |
| Figura 4.24 – F_f/F_c x tempo para o aço ABNT 1045 usinado a 355 m/min. | 64 |
| Figura 4.25 – F_f/F_c x tempo para o aço ABNT 1045 usinado a 445 m/min. | 64 |
| Figura 4.26 – F_f/F_c x tempo para o aço ABNT 1045 usinado a 535 m/min. | 65 |
| Figura 4.27 – Ra x tempo para o aço ABNT 1040 usinado a 425 m/min. | 66 |
| Figura 4.28 – Ra x tempo para o aço ABNT 1040 usinado a 475 m/min. | 66 |
| Figura 4.29 – Ra x tempo para o aço ABNT 1040 usinado a 525 m/min. | 66 |
| Figura 4.30 – Ra x tempo para o aço ABNT 1045 usinado a 355 m/min. | 67 |
| Figura 4.31 – Ra x tempo para o aço ABNT 1045 usinado a 445 m/min. | 67 |
| Figura 4.32 – Ra x tempo para o aço ABNT 1045 usinado a 535 m/min. | 67 |
| Figura 4.33 – F_c x $V_{B\ Max}$ para o aço ABNT 1040 usinado a 425 m/min. | 68 |
| Figura 4.34 – F_c x $V_{B\ Max}$ para o aço ABNT 1040 usinado a 475 m/min. | 68 |
| Figura 4.35 – F_c x $V_{B\ Max}$ para o aço ABNT 1040 usinado a 525 m/min. | 69 |
| Figura 4.36 – F_f x $V_{B\ Max}$ para o aço ABNT 1040 usinado a 425 m/min. | 70 |
| Figura 4.37 – F_f x $V_{B\ Max}$ para o aço ABNT 1040 usinado a 475 m/min. | 70 |
| Figura 4.38 – F_f x $V_{B\ Max}$ para o aço ABNT 1040 usinado a 525 m/min. | 70 |
| Figura 4.39 – F_f/F_c x $V_{B\ Max}$ para o aço ABNT 1040 usinado a 425 m/min. | 71 |
| Figura 4.40 – F_f/F_c x $V_{B\ Max}$ para o aço ABNT 1040 usinado a 475 m/min. | 71 |

| | |
|---|----|
| Figura 4.41 – $F_f/F_c \times V_{B \text{ Max}}$ para o aço ABNT 1040 usinado a 525 m/min. | 71 |
| Figura 4.42 – $F_c \times V_{B \text{ Max}}$ para o aço ABNT 1045 usinado a 355 m/min. | 72 |
| Figura 4.43 – $F_c \times V_{B \text{ Max}}$ para o aço ABNT 1045 usinado a 445 m/min. | 72 |
| Figura 4.44 – $F_c \times V_{B \text{ Max}}$ para o aço ABNT 1045 usinado a 535 m/min. | 73 |
| Figura 4.45 – $F_f \times V_{B \text{ Max}}$ para o aço ABNT 1045 usinado a 355 m/min. | 73 |
| Figura 4.46 – $F_f \times V_{B \text{ Max}}$ para o aço ABNT 1045 usinado a 445 m/min. | 74 |
| Figura 4.47 – $F_f \times V_{B \text{ Max}}$ para o aço ABNT 1045 usinado a 535 m/min. | 74 |
| Figura 4.48 – $F_f/F_c \times V_{B \text{ Max}}$ para o aço ABNT 1045 usinado a 355 m/min. | 75 |
| Figura 4.49 – $F_f/F_c \times V_{B \text{ Max}}$ para o aço ABNT 1045 usinado a 445 m/min. | 75 |
| Figura 4.50 – $F_f/F_c \times V_{B \text{ Max}}$ para o aço ABNT 1045 usinado a 535 m/min. | 75 |
| Figura 4.51 – $Ra \times V_{B \text{ Max}}$ para o aço ABNT 1040 usinado a 425 m/min. | 76 |
| Figura 4.52 – $Ra \times V_{B \text{ Max}}$ para o aço ABNT 1040 usinado a 475 m/min. | 76 |
| Figura 4.53 – $Ra \times V_{B \text{ Max}}$ para o aço ABNT 1040 usinado a 525 m/min. | 77 |
| Figura 4.54 – $Ra \times V_{B \text{ Max}}$ para o aço ABNT 1045 usinado a 355 m/min. | 77 |
| Figura 4.55 – $Ra \times V_{B \text{ Max}}$ para o aço ABNT 1045 usinado a 445 m/min. | 77 |
| Figura 4.56 – $Ra \times V_{B \text{ Max}}$ para o aço ABNT 1045 usinado a 535 m/min. | 78 |
| Figura 4.57 – $Ra \times V_c$ para o aço ABNT 1040. | 79 |
| Figura 4.58 – $Ra \times V_c$ para o aço ABNT 1045. | 79 |
| Figura 4.59 – $Ra \times F_c$ para o aço ABNT 1040. | 80 |
| Figura 4.60 – $Ra \times F_f$ para o aço ABNT 1040. | 80 |
| Figura 4.61 – $Ra \times F_f/F_c$ para o aço ABNT 1040. | 80 |
| Figura 4.62 – $Ra \times F_c$ para o aço ABNT 1045. | 81 |
| Figura 4.63 – $Ra \times F_f$ para o aço ABNT 1045. | 81 |
| Figura 4.64 – $Ra \times F_f/F_c$ para o aço ABNT 1045. | 81 |
| Figura 5.1 – Comparação das curvas de Taylor obtidas na usinagem dos aços ABNT 1040 e 1045 com ferramenta de metal duro revestida. | 82 |
| Figura 5.2 – Relação entre a força de corte e o desgaste de flanco máximo para o aço ABNT 1040. | 85 |
| Figura 5.3 – Relação entre F_c e $V_{B \text{ Max}}$ para o aço ABNT 1040 para todas as condições de corte. | 85 |
| Figura 5.4 – Relação entre a força de avanço e o desgaste de flanco máximo para o aço ABNT 1040. | 86 |
| Figura 5.5 – Relação entre F_f e $V_{B \text{ Max}}$ para o aço ABNT 1040 para todas as condições de corte. | 87 |

| | |
|---|-----|
| Figura 5.6 – Relação entre a força de corte e o desgaste de flanco máximo para o aço ABNT 1045..... | 87 |
| Figura 5.7 – Relação entre F_c e $V_{B\ Max}$ para o aço ABNT 1040 para todas as condições de corte. | 88 |
| Figura 5.8 – Relação entre a força de avanço e o desgaste de flanco máximo para o aço ABNT 1045..... | 89 |
| Figura 5.9 – Relação entre F_f e $V_{B\ Max}$ para o aço ABNT 1040 para todas as condições de corte. | 90 |
| Figura 5.10 – Comparação entre as equações 30, 36, 42 e 48. | 91 |
| Figura 5.11 – Ra x $V_{B\ Max}$ para o aço ABNT 1040. | 92 |
| Figura 5.12 – Envelope que define Ra x $V_{B\ Max}$ para o aço ABNT 1040. | 93 |
| Figura 5.13 – Ra x $V_{B\ Max}$ para o aço ABNT 1045. | 93 |
| Figura 5.14 – Envelope que define Ra x $V_{B\ Max}$ para o aço ABNT 1045. | 94 |
| Figura 5.15 – <i>Boxplot</i> dos valores de rugosidade média obtidos na usinagem dos aços ABNT 1040 e 1045 para todas as velocidades de corte. | 94 |
| Figura 10.1 – Ra x F_c (a) para o aço ABNT 1040 usinado a 425 m/min; (b) para o aço ABNT 1045 usinado a 355 m/min. | 113 |
| Figura 10.2 – Ra x F_c (a) para o aço ABNT 1040 usinado a 475 m/min; (b) para o aço ABNT 1045 usinado a 445 m/min. | 113 |
| Figura 10.3 – Ra x F_c (a) para o aço ABNT 1040 usinado a 525 m/min; (b) para o aço ABNT 1045 usinado a 535 m/min. | 113 |
| Figura 10.4 – Ra x F_f (a) para o aço ABNT 1040 usinado a 425 m/min; (b) para o aço ABNT 1045 usinado a 355 m/min. | 114 |
| Figura 10.5 – Ra x F_f (a) para o aço ABNT 1040 usinado a 475 m/min; (b) para o aço ABNT 1045 usinado a 445 m/min. | 114 |
| Figura 10.6 – Ra x F_f (a) para o aço ABNT 1040 usinado a 525 m/min; (b) para o aço ABNT 1045 usinado a 535 m/min. | 114 |

ÍNDICE DE TABELAS

| | |
|--|-----|
| Tabela 2.1 – Propriedades do material em função da microestrutura. Fonte: Mills and Redford. | 43 |
| Tabela 2.2 – Critérios de fim de vida de ferramenta de corte recomendados pela norma ISO 3685 (1993). | 46 |
| Tabela 3.1 – Valores de dureza dos aços ABNT 1040 e 1045 ao longo da seção das barras. | 48 |
| Tabela 3.2 – Dados de corte relativos à ferramenta de corte. | 50 |
| Tabela 3.3 – Parâmetros de corte utilizados nos ensaios. | 51 |
| Tabela 4.1 – Vida das ferramentas de corte ($V_{B \text{ Max}} = 0,3 \text{ mm}$) em função da velocidade de corte usada para o aço ABNT 1040. | 55 |
| Tabela 4.2 – Coeficientes da equação de Taylor para o aço ABNT 1040. | 55 |
| Tabela 4.3 – Vida das ferramentas de corte ($V_{B \text{ Max}} = 0,3 \text{ mm}$) de acordo com a velocidade de corte para o aço ABNT 1045. | 57 |
| Tabela 4.4 – Coeficientes da equação de Taylor para o aço ABNT 1045. | 57 |
| Tabela 4.5 – Correlações entre $V_{B \text{ Max}}$ e tempo de corte para os aços estudados. | 58 |
| Tabela 4.6 – Correlação entre valores relativos às forças de usinagem e tempo de corte para o aço ABNT 1040. | 62 |
| Tabela 4.7 – Correlação entre valores relativos às forças de usinagem e tempo de corte para o aço ABNT 1045. | 65 |
| Tabela 4.8 – Correlação entre F_c e $V_{B \text{ Max}}$ para o aço ABNT 1040. | 69 |
| Tabela 4.9 – Correlação entre F_f e $V_{B \text{ Max}}$ para o aço ABNT 1040. | 70 |
| Tabela 4.10 – Correlação entre F_f/F_c e $V_{B \text{ Max}}$ para o aço ABNT 1040. | 72 |
| Tabela 4.11 – Correlação entre F_c e $V_{B \text{ Max}}$ para o aço ABNT 1045. | 73 |
| Tabela 4.12 – Correlação entre F_f e $V_{B \text{ Max}}$ para o aço ABNT 1045. | 74 |
| Tabela 4.13 – Correlação entre F_f/F_c e $V_{B \text{ Max}}$ para o aço ABNT 1045. | 76 |
| Tabela 5.1 – Comparação entre valores de rugosidade média experimentais e teóricos. | 84 |
| Tabela 5.2 – Declividade das equações $F(V_{B \text{ Max}})$. | 90 |
| Tabela 5.3 – Erro médio de previsão para as equações 51 a 54. | 91 |
| Tabela 5.4 – Intervalo de variação de R_a para os aços ABNT 1040 e 1045. | 95 |
| Tabela 9.1 – Resultados relativos à primeira repetição do experimento para o aço ABNT 1040 usinado a 425 m/min. | 102 |
| Tabela 9.2 – Resultados relativos à segunda repetição do experimento para o aço ABNT 1040 usinado a 425 m/min. | 103 |

| | |
|---|-----|
| Tabela 9.3 – Resultados relativos à terceira repetição do experimento para o aço ABNT 1040 usinado a 425 m/min. | 104 |
| Tabela 9.4 – Resultados relativos à primeira repetição do experimento para o aço ABNT 1040 usinado a 475 m/min. | 105 |
| Tabela 9.5 – Resultados relativos à segunda repetição do experimento para o aço ABNT 1040 usinado a 475 m/min. | 105 |
| Tabela 9.6 – Resultados relativos à terceira repetição do experimento para o aço ABNT 1040 usinado a 475 m/min. | 106 |
| Tabela 9.7 – Resultados relativos à primeira repetição do experimento para o aço ABNT 1040 usinado a 525 m/min. | 106 |
| Tabela 9.8 – Resultados relativos à segunda repetição do experimento para o aço ABNT 1040 usinado a 525 m/min. | 107 |
| Tabela 9.9 – Resultados relativos à terceira repetição do experimento para o aço ABNT 1040 usinado a 525 m/min.* | 107 |
| Tabela 9.10 – Resultados relativos à primeira repetição do experimento para o aço ABNT 1045 usinado a 355 m/min. | 108 |
| Tabela 9.11 – Resultados relativos à segunda repetição do experimento para o aço ABNT 1045 usinado a 355 m/min.** | 109 |
| Tabela 9.12 – Resultados relativos à terceira repetição do experimento para o aço ABNT 1045 usinado a 355 m/min. | 110 |
| Tabela 9.13 – Resultados relativos à primeira repetição do experimento para o aço ABNT 1045 usinado a 445 m/min. | 110 |
| Tabela 9.14 – Resultados relativos à segunda repetição do experimento para o aço ABNT 1045 usinado a 445 m/min.** | 111 |
| Tabela 9.15 – Resultados relativos à terceira repetição do experimento para o aço ABNT 1045 usinado a 445 m/min. | 111 |
| Tabela 9.16 – Resultados relativos à primeira repetição do experimento para o aço ABNT 1045 usinado a 535 m/min. | 111 |
| Tabela 9.17 – Resultados relativos à segunda repetição do experimento para o aço ABNT 1045 usinado a 535 m/min.** | 111 |
| Tabela 9.18 – Resultados relativos à terceira repetição do experimento para o aço ABNT 1045 usinado a 535 m/min.*** | 112 |

1. INTRODUÇÃO

Fabricar consiste basicamente em alterar uma matéria-prima com o intuito de obter um produto acabado. Os processos de fabricação representam, nos países industrializados, um terço do produto interno bruto [Kalpakjian, 1985].

Os processos de fabricação que envolvem mudança de forma podem ser classificados em duas categorias: fabricação com remoção de material e fabricação sem remoção de material. Enquanto a segunda categoria é composta por processos de fabricação como soldagem, conformação e fundição, a primeira categoria é composta basicamente pelos processos de usinagem.

A importância dos processos de fabricação que envolvem remoção de material pode ser medida pelo custo envolvido nestes: segundo Shaw, em 1984, estes processos eram considerados os mais importantes economicamente, com custos associados estimados em cerca de 10% do PIB americano na primeira metade da década de 80. Uma avaliação de Trent, também de 1984, indica os processos de usinagem como os mais usados na indústria metal mecânica, com custos associados superiores a 15% do valor de todos os produtos manufaturados em todos os países industrializados.

Segundo Walker, 2000, é difícil citar algum produto que não requeira, direta ou indiretamente, o uso de uma operação de usinagem em algum momento de sua manufatura. A grande utilização dos processos de usinagem se deve principalmente à variedade de geometrias possíveis de ser usinadas, com alto grau de precisão dimensional e acabamento superficial, e ao fato de não haver alteração nas propriedades do material. Estas características fazem com que, na grande maioria dos casos, os processos de usinagem não possam ser substituídos por nenhum outro processo de fabricação, sendo muitas vezes usados com o intuito de prover uma melhora do acabamento superficial ou tolerância dimensional do produto manufaturado por outros processos.

Apesar das vantagens da usinagem, esta possui desvantagens em relação a outros processos de fabricação, como, por exemplo, a baixa velocidade de produção quando comparada a estes. Esta desvantagem faz com que qualquer aprimoramento no sentido de aumentar a produção de um processo de usinagem represente um ganho significativo. A segunda desvantagem dos processos de usinagem diz respeito aos altos custos envolvidos. Estes custos se devem ao uso de maquinário e ferramental caro e à necessidade de mão de obra altamente especializada. O nível de conhecimento requerido na programação e operação das modernas máquinas de comando numérico faz necessário operadores com certo grau de especialização. Os

gastos anuais com mão de obra nos EUA são estimados em U\$300 bilhões, contra U\$7,5 bilhões gastos em maquinário e U\$2,5 bilhões gastos em materiais “consumíveis” (ferramentas de corte e fluídos de corte) [Trent e Wright, 2000, 2000]. Além disso, grande parte da matéria prima usada nestes processos é transformada em resíduo. Estes altos custos inerentes aos processos de usinagem tornam-se mais importantes quando associados ao fato de que a usinagem é um dos processos de fabricação mais utilizados no mundo, transformando em cavaco algo em torno de 10% de toda a produção de metais [Trent, 1984].

A simples análise dos custos inerentes aos processos de usinagem, aliados à representatividade destes processos na indústria mundial, faz com que qualquer aprimoramento nestes converta-se em uma grande redução dos custos de produção. Este aprimoramento pode ser feito através do desenvolvimento de máquinas, ferramentas, ou materiais cuja usinagem seja facilitada.

O estudo de materiais voltado à sua utilização em processos de usinagem é expresso por uma grandeza chamada usinabilidade. Esta característica expressa a facilidade de usinar um material de acordo com determinado critério. Apesar de não ser uma propriedade inerente ao material, a usinabilidade é uma grandeza que qualifica o material a ser usinado de acordo com um determinado critério, que reflete os interesses do usuário. Os critérios de usinabilidade mais usados são o tempo de vida da ferramenta, as forças (e potências) necessárias na usinagem e a rugosidade das peças produzidas por este processo [Ferraresi 1970; Shaw, 1984; Stemmer, 1985].

Devido ao grande número de variáveis possíveis de ser relacionadas à usinabilidade de um material, se faz necessário o pleno conhecimento destas, pois um material que apresente melhor usinabilidade em relação a um determinado critério pode apresentar menor usinabilidade quando relacionado a outro.

Neste contexto se insere este trabalho, cujo objetivo principal é a análise do efeito do desgaste de flanco observado em uma ferramenta de corte nas forças de corte e avanço e na rugosidade dos componentes usinados. Adicionalmente, busca-se relações entre as variáveis mencionadas e o tempo de corte e as velocidade de corte usadas nos ensaios.

O procedimento adotado foi a realização de ensaios usinabilidade de longa duração em torneamento externo para os aços ABNT 1040 e 1045 com ferramenta de metal duro revestida. Nestes ensaios foi realizada a aquisição dos resultados de força de corte, força de avanço, rugosidade média e desgaste de flanco máximo.

A apresentação do trabalho será feita da seguinte forma:

Revisão bibliográfica – divide-se em dois tópicos principais, nos quais são abordados, em ordem, o processo de torneamento cilíndrico externo e a grandeza tecnológica usinabilidade, bem como pontos referentes a estes dois tópicos que sejam considerados importantes para a compreensão do estudo realizado.

Procedimento experimental – são descritos os materiais usados nos ensaio e métodos aplicados tanto na definição dos ensaios quanto na aquisição dos dados e posterior avaliação dos resultados.

Resultados – este capítulo apresenta, com uma rápida discussão, os resultados obtidos em relação às três variáveis analisadas no trabalho: o tempo de usinagem, o desgaste de flanco máximo e a rugosidade superficial.

Discussão – envolve uma análise de todos os resultados apresentados no capítulo de resultados considerados relevantes ou expressivos. Apesar da leve discussão apresentada no capítulo anterior, este capítulo se dispõe a analisar de forma mais aprofundada os resultados obtidos.

Conclusões – apresentadas de forma objetiva, baseadas nos resultados observados no capítulo de resultados, e de acordo com a discussão realizada.

Referências bibliográficas – incluem todos os trabalhos usados na elaboração deste.

Sugestão para trabalhos futuros – Inclui sugestões de continuidade para o tema abordado neste trabalho.

Anexo – em anexo estão todos os dados complementares ao trabalho, como planilha de experimentos e alguns gráficos.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Usinagem

Usinagem é um termo que abrange processos de fabricação por geração de superfícies através da retirada de material, conferindo dimensão e forma à peça. Uma definição bastante ampla do termo usinagem foi apresentada por Ferraresi (1970), que diz que “como operações de usinagem entendemos aquelas que, ao conferir à peça a forma, ou as dimensões ou o acabamento, ou qualquer combinação destes três itens, produzem cavaco”.

As operações de usinagem dividem-se em processos de usinagem convencional e não convencional (Figura 2.1). Dentre os processos de usinagem convencional se destacam, devido ao uso mais amplamente difundido, o torneamento, fresamento e furação.

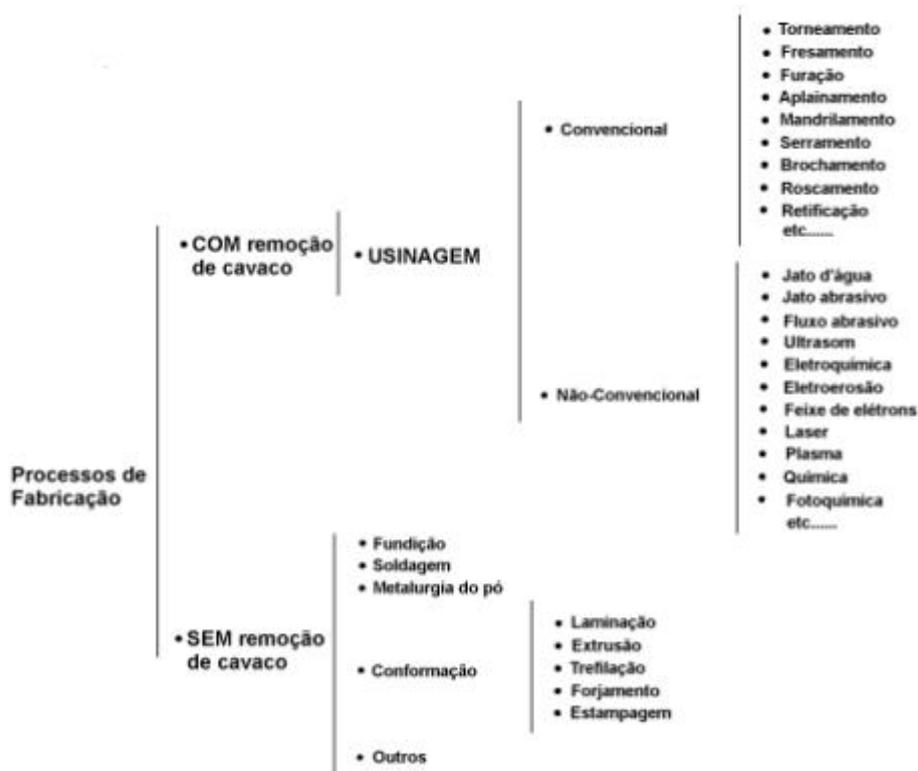


Figura 2.1 – Classificação dos processos de fabricação (fonte: Machado e Silva).

2.1.1 Torneamento

Segundo Trent (2000), o torneamento (Figura 2.2) é a operação de usinagem mais comumente empregada em trabalhos de corte de metal. O material a ser cortado é fixado ao mandril de um torno e rotacionado, enquanto a ferramenta, presa firmemente em um porta-ferramenta, move-se em um plano que, idealmente, contém o eixo de rotação da peça.

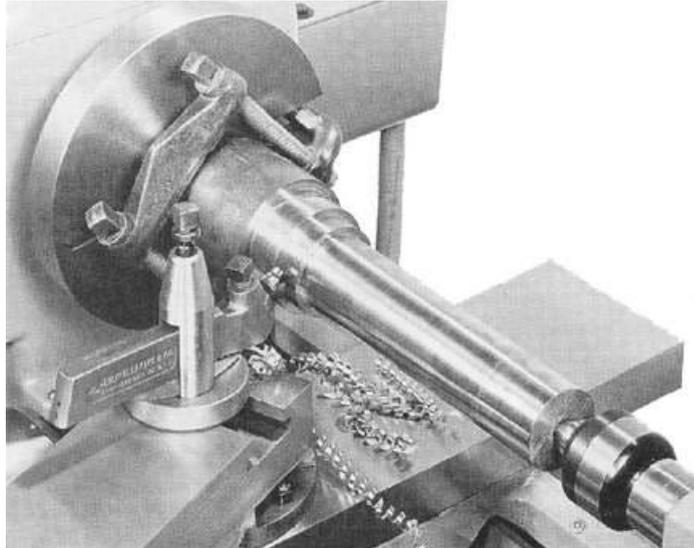


Figura 2.2 – Operação de torneamento.

Podemos destacar três características do torneamento que não ocorrem em muitos outros processos de usinagem:

- ✓ O corte é normalmente contínuo;
- ✓ O corte pode ser descrito em coordenadas cilíndricas (coordenadas polares para a seção reta da peça em rotação e mais uma coordenada de profundidade para designar o movimento da ferramenta);
- ✓ Ocorrem, simultaneamente, movimentos da peça e da ferramenta (rotação da peça e translação da ferramenta).

Existem, no torneamento, dois fatores cuja influência (independente de material de peça e ferramenta) determina o resultado final do processo: os parâmetros de corte e a geometria da aresta de corte.

Entre os parâmetros de corte (Figura 2.2), a velocidade de corte (V_c) é a taxa na qual a superfície não cortada da peça passa pela aresta de corte da ferramenta, expressa normalmente em m/min. O avanço (f) é a distância percorrida pela ferramenta por revolução da peça, e a profundidade de corte (a_p) é a espessura ou profundidade de penetração da ferramenta medida perpendicularmente ao plano de trabalho, que é definido pelas direções de avanço e V_c da ferramenta. A partir destes três parâmetros é possível determinar a taxa de remoção de material (equação 1), parâmetro usado para a medição da eficiência da operação.

$$Q = V_c \cdot f \cdot a_p \quad (cm^3 / min) \quad (1.)$$

As superfícies definidas sobre a peça são:

- Superfície a usinar.
- Superfície em usinagem, divide-se em superfície em usinagem principal e secundária, de acordo com a aresta de corte com a qual está em contato.
- Superfície usinada.

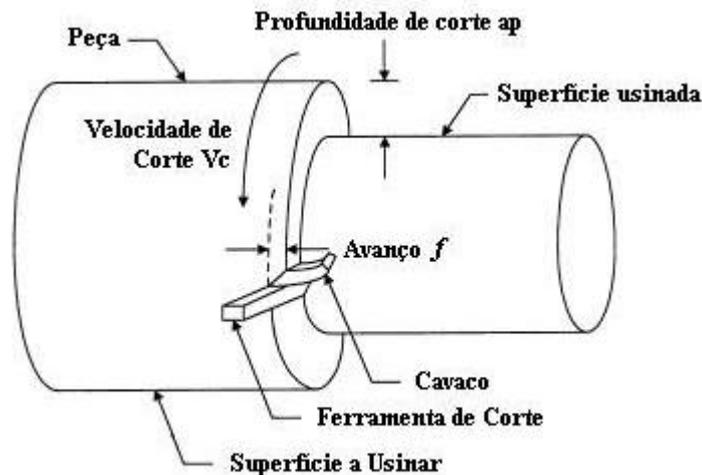


Figura 2.3 – Parâmetros de corte e superfícies em torneamento cilíndrico externo.

A geometria da ferramenta (Figura 2.4) é um dos fatores de maior influência no torneamento. A ferramenta de corte para torneamento é definida em:

- Superfície de saída (A_g) – é a superfície da ferramenta sobre a qual o cavaco desliza após o corte.
- Superfície de folga (A_a) – é a superfície que determina a folga entre a ferramenta e a superfície em usinagem principal.
- Superfície secundária de folga (A'_a) – é a superfície que determina a folga entre a ferramenta e a superfície em usinagem secundária.
- Cunha de corte – é a cunha formada pelas superfícies de saída e de folga, sobre a qual ocorre o corte do metal.
- Arestas de corte – são as arestas da cunha de corte, nas quais ocorre a interface ferramenta-peça, e distinguem-se como;
 - Aresta principal de corte (S) – formada pela intersecção das superfícies de saída e de folga;
 - Aresta secundária de corte (S') – formada pela intersecção das superfícies de saída e secundária de folga;
- Ponta de corte – local da cunha de corte onde se encontram a aresta principal e a aresta secundária de corte.

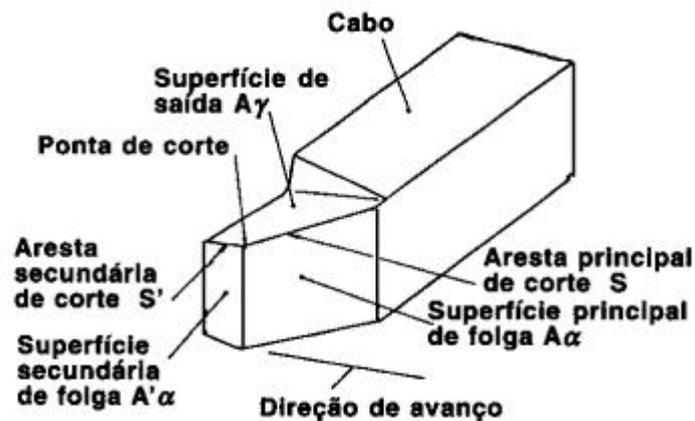


Figura 2.4 – Geometria da ferramenta de corte (Fonte: Machado e Silva, 1999).

Os ângulos referentes à ferramenta e à posição desta em relação a peça (Figura 2.5) são medidos em diferentes planos de referência (Figura 2.6), com diferentes representações para cada operação de usinagem. Para a operação de torneamento, os ângulos mais influentes são o ângulo de posição da ferramenta (ζ_r), o ângulo de posição secundário da ferramenta (ζ'_r) e o ângulo de ponta de ferramenta (ϵ_r), medidos no plano de referência (P_r), o ângulo de inclinação da ferramenta (λ_s) no plano de corte (P_s) e o ângulo de saída da ferramenta (γ) e o ângulo de folga (α_0) medidos no plano ortogonal (P_o).

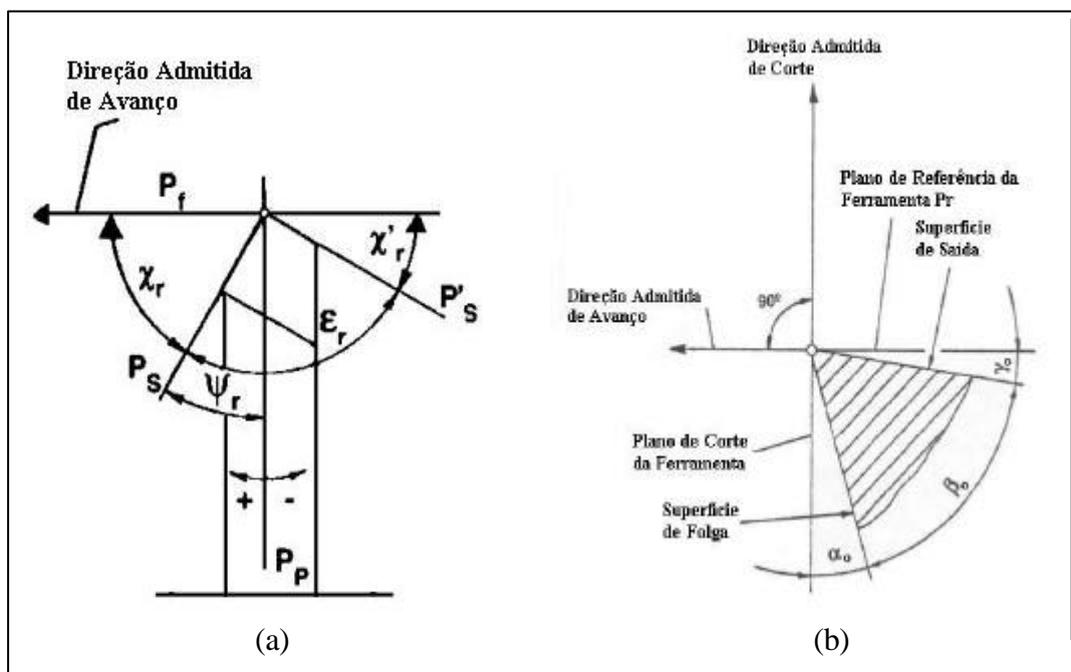


Figura 2.5 – Ângulos da ferramenta de corte medidos (a) no plano de referência da ferramenta e (b) no plano ortogonal (fonte: Diniz et al.).

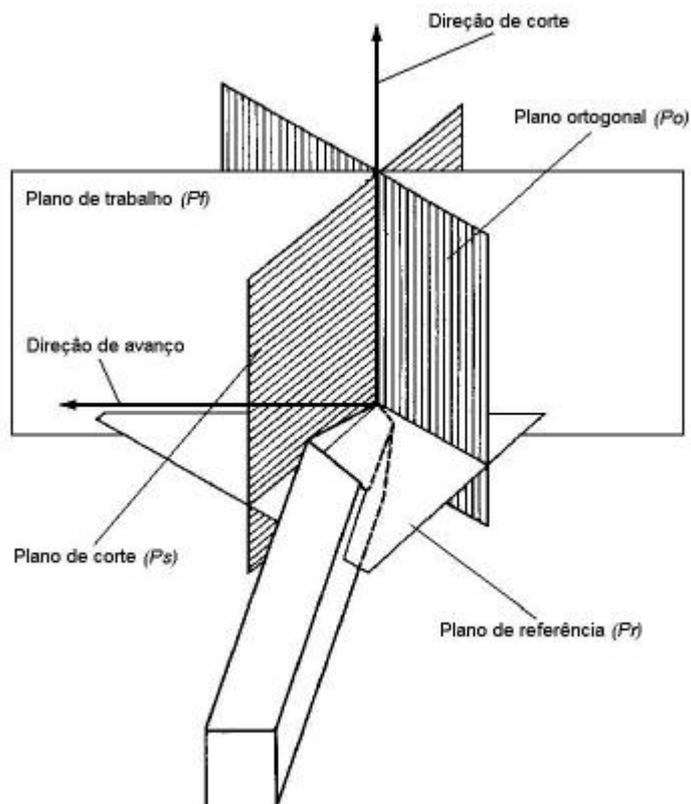


Figura 2.6 – Sistema de referência da ferramenta (adaptado de Ferraresi, 1970).

2.1.2 Geração de Cavaco

O cavaco é o principal ponto em comum entre os processos de usinagem, pois é o subproduto final presente em todos eles. O cavaco pode variar muito (em tipo, forma, extensão) para cada operação de usinagem, ou mesmo em uma única operação, como por exemplo o torneamento, sendo o resultado final (forma, espessura) deste função de praticamente todas as variáveis envolvidas no processo.

O meio mais simples de visualizar os mecanismos de geração de cavaco é através do corte ortogonal. O exemplo mais facilmente assimilado de corte ortogonal é o de um cilindro, com um anel usinado ao seu redor (Figura 2.7), que é torneado em direção ao centro da peça com uma ferramenta de corte. Para um espectador posicionado em frente ao plano que contém a seção transversal do cilindro, este corte se realiza num plano. As demais simplificações assumidas são:

- ✓ Cavaco contínuo, sem APC (aresta postiça de corte);
- ✓ Superfície de folga da ferramenta e a peça sem contato;
- ✓ Avanço menor que a espessura de corte;
- ✓ Espessura de corte menor que a aresta de corte;
- ✓ Espessura de corte igual à espessura do cavaco.

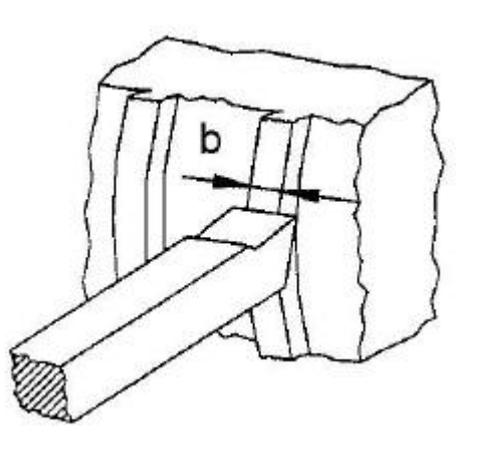


Figura 2.7 – Exemplo de corte ortogonal (fonte: Machado e Silva).

Considere-se agora o volume representado pelas letras *klmn* na Figura 2.8. Este volume é deformado elasticamente, conforme vai ocorrendo sua aproximação da aresta de corte. Próximo à aresta o material escoá, deformando-se plasticamente até que as tensões tornam ao material impossível manter o regime, causando a ruptura. Estas deformações plásticas ocorrem na chamada zona de cisalhamento primária, definida, a fins de simplificação, pelo plano \overline{OD} , e a ruptura inicia-se pela abertura de uma trinca em “O”, que se propaga segundo o plano \overline{OD} , e cuja extensão depende do material da peça. A extensão desta trinca é um dos fatores determinantes do tipo de cavaco a resultar do corte. Uma trinca longa tende a gerar um cavaco curto (chamado cavaco descontínuo), enquanto uma trinca curta tende a gerar um cavaco contínuo.

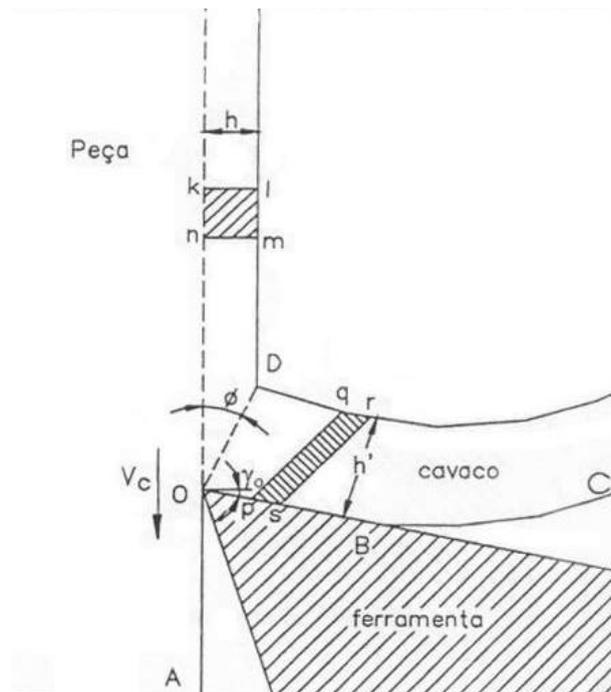


Figura 2.8 – Formação do cavaco (fonte: Machado e Silva).

Independente da extensão da trinca, o único “caminho” possível ao volume $klmn$ é a passagem pelo plano de cisalhamento, durante a qual é “transformado” no volume $pqrs$ que, a seguir, passa pela superfície de saída da ferramenta tornando-se um componente do cavaco. Apesar de muitas vezes tratado na literatura (Stemmer, 1995) como um sistema de atrito simples de Coulomb, sem acarretar conseqüências importantes ao processo, o estudo da passagem do cavaco pela superfície de saída da ferramenta tornou-se atualmente um dos principais objetos de estudo na área de usinagem. Isto porque, ao passar pelo plano definido pelos pontos \overline{OB} o volume estudado sofre, além de deformações plásticas cisalhantes de elevada ordem, a ação de temperaturas elevadas, causando vários mecanismos de desgaste de ferramenta.

2.1.3 Tipos de Cavaco

Apesar de ser um subproduto da usinagem, o cavaco gerado pode ser ao mesmo tempo evidência e causa de problemas no processo de usinagem. Ou seja, ao mesmo tempo em que determinado tipo de cavaco pode causar algum problema, como danos à superfície da peça ou estar ocupando volume excessivo, a sua forma e tamanho podem ser indicativos de problemas, relativos tanto à qualidade do material usinado quanto às condições da ferramenta de corte utilizada.

Os tipos de cavaco são basicamente três, a saber;

1. *Cavaco contínuo*, caracteriza-se pelo grande comprimento, independente da forma. Ocorre principalmente na usinagem de metais dúteis (como aços baixa liga), sob pequenos e médios avanços, com altas velocidades de corte e grandes ângulos de saída da ferramenta. É formado quando o material é recalcado ao chegar na aresta de corte, sem que, no entanto, ocorra o rompimento deste, deslizando, então, pela superfície de saída da ferramenta.
2. *Cavaco de cisalhamento* ou *parcialmente contínuo*, ocorre principalmente quando a trinca, ao propagar-se pelo plano de cisalhamento, provoca a ruptura total do cavaco, que, em seguida, é soldado devido à pressão e temperatura. O resultado final costuma ser um cavaco nem ininterrupto e uniforme nem fragmentado como o cavaco descontínuo, constituindo um meio termo entre os dois.
3. *Cavaco arrancado* ou *descontínuo*, muito comum na usinagem de metais frágeis, como ferro fundido cinzento. Este tipo de cavaco ocorre também na usinagem de alguns materiais menos frágeis a baixas velocidades de corte, grandes avanços e com ângulo de saída pequeno.

Além destes tipos, alguns autores [Shaw, 1984; Machado e Silva, 1999] mencionam o *cavaco segmentado*, que ocorre mais frequentemente na usinagem de materiais com baixa condutividade térmica, como o titânio e suas ligas, num processo referido como “cisalhamento termoplástico catastrófico”. Segundo esses autores, este tipo de cavaco pode ocorrer inclusive na usinagem de materiais com boa condutividade térmica, a partir de uma velocidade de corte, chamada pelos autores de “*velocidade de corte crítica*”, característica do material.

O controle do tipo de cavaco produzido é de extrema importância. O cavaco contínuo, além de oferecer perigo ao operador, pode emaranhar-se ao redor da peça ou ferramenta, dificultando a operação e tornando a superfície usinada menos atrativa. Além disso, ainda há o alto coeficiente volumétrico do cavaco contínuo em relação aos outros tipos.

O coeficiente volumétrico (equação 2) é um índice definido como a razão entre o volume ocupado pelo cavaco (V_{cav}) e o volume ocupado pela mesma quantidade, em massa, do mesmo material (V_p).

$$w = \frac{V_{cav}}{V_p} \quad (2.)$$

Não é rara a ocorrência de cavacos contínuos com $\omega=200$, o que dificulta tanto a estocagem do cavaco quanto a remoção do mesmo. Apesar disso, alguns autores, como Stemmer, 1995, defendem que, do ponto de vista do acabamento superficial, da durabilidade da ferramenta e da energia consumida, o cavaco contínuo é o mais benéfico.

Também o cavaco parcialmente contínuo pode apresentar problemas, como geração de vibrações, que podem acarretar danos como ondulações na superfície usinada, desgaste excessivo da ferramenta, e até mesmo efeitos nocivos como desbalanceamento rotativo nos principais mancais do torno.

A ocorrência de cavaco contínuo pode ser evitada, ou ao menos minimizada adotando-se alterações nos parâmetros de corte, dentre as quais estão:

- ✓ Diminuição do ângulo de saída e de inclinação da ferramenta, ou ainda o uso destes como valores negativos;
- ✓ Aumento do avanço e da profundidade de corte;
- ✓ Diminuição da velocidade de corte;
- ✓ Uso de quebra-cavaco.

Destas opções, a mais comumente adotada em processos cujos parâmetros de corte propiciem a formação de cavaco contínuo, é o uso de quebra-cavacos na superfície de saída da

ferramenta, pois, além de proporcionar uma solução simples e rápida para o problema, o uso de quebra-cavaco dispensa alterações nos parâmetros de corte.

2.1.4 Formas de Cavaco

Além da extensão do cavaco, também é possível diferenciá-lo quanto à sua forma. A importância desta diferenciação se deve ao fato de algumas formas de cavaco dificultarem a operação de usinagem, prejudicarem o acabamento superficial da peça e desgastarem mais ou menos a ferramenta.

A classificação usual dada às formas de cavacos é a seguinte:

- Cavaco em fita;
- Cavaco helicoidal;
- Cavaco espiral;
- Cavaco em lascas ou pedaços.

A norma ISO 3685 (1993) faz uma classificação mais detalhada das formas de cavaco possíveis (Figura 2.9).

| 1 – Cavaco em fita | 2 – Cavaco tubular | 3 – Cavaco espiral | 4 – Cavaco hel. tipo arruela | 5 – Cavaco hel. cônico | 6 – Cavaco em arco | 7 – Cavaco fragmentado | 8 – Cavaco tipo agulha |
|--------------------|--------------------|--------------------|------------------------------|------------------------|--------------------|------------------------|------------------------|
| | | | | | | | |
| 1 – 1 – Longo | 2 – 1 – Longo | 3 – 1 – Plano | 4 – 1 – Longo | 5 – 1 – Longo | 6 – 1 – Conect. | | |
| | | | | | | | |
| 1 – 2 – Curto | 2 – 2 – Curto | 3 – 2 – Cônico | 4 – 2 – Curto | 5 – 2 – Curto | 6 – 2 – Solto | | |
| | | | | | | | |
| 1 – 3 – Emaranhado | 2 – 3 – Emaranhado | | 4 – 3 – Emaranhado | 5 – 3 – Emaranhado | | | |

Figura 2.9 – Classificação da forma dos cavacos, de acordo com a norma ISO 3685.

Segundo Ferraresi (1970), a forma mais conveniente é geralmente a helicoidal, sendo o cavaco em lascas preferido em casos onde o cavaco deve ser removido pelo fluido de corte ou quando há pouco espaço disponível para o cavaco. O cavaco em fita é o mais problemático, pode gerar acidentes e ocupa muito espaço. A Figura 2.10 mostra a variação do coeficiente volumétrico de acordo com a forma do cavaco.

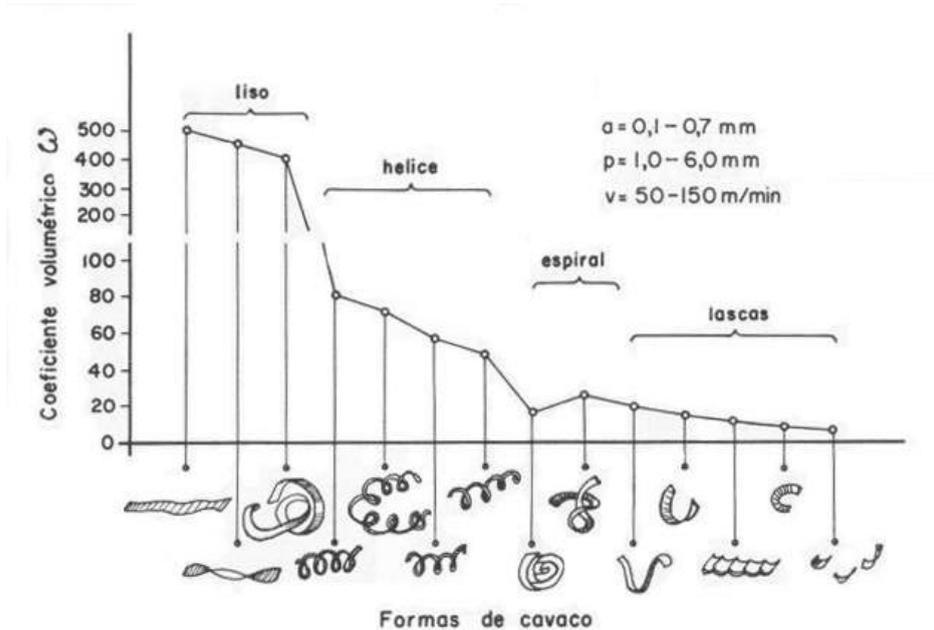


Figura 2.10 – Variação do coeficiente volumétrico de acordo com o tipo de cavaco (fonte: Ferraresi, 1970).

A forma do cavaco pode ser alterada das seguintes maneiras:

- Alterando os parâmetros de corte;
- Alterando a superfície de saída da ferramenta;
- Usando elementos especiais (quebra-cavaco) na superfície de saída.

Geralmente, o aumento da velocidade de corte e do ângulo de saída tendem a mover a forma do cavaco para a esquerda na Figura 2.11, enquanto o avanço move a forma do cavaco para a direita na mesma figura. A Figura 2.11 mostra a variação da forma do cavaco em função do avanço e da profundidade de corte.

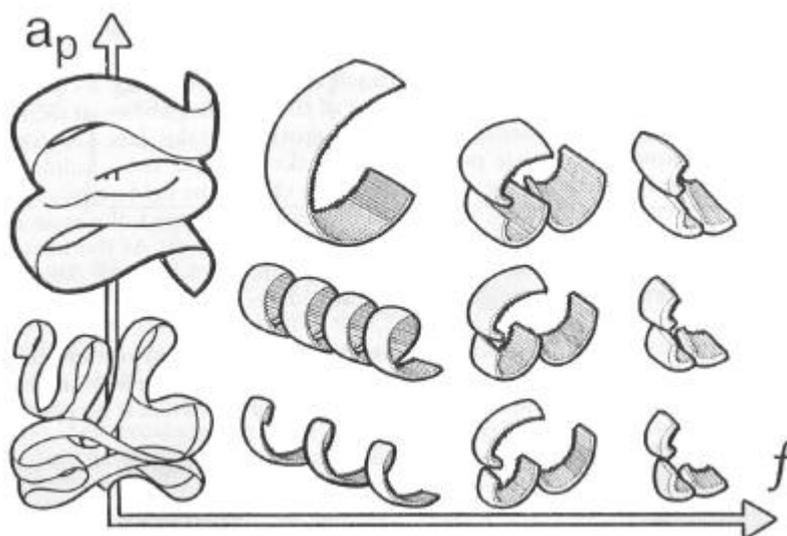


Figura 2.11 – Variação da forma do cavaco em função das variáveis de processo (fonte: Machado e Silva, 1999).

2.1.5 Materiais de Ferramenta de Corte

Os processos de usinagem convencional em geral baseiam-se no corte de uma peça utilizando-se uma ferramenta de corte. Este corte só é possível porque a ferramenta possui uma dureza mais elevada do que a peça, ou seja, uma dureza relativa (eq. 3) positiva e maior que a unidade. Dessa forma, o constante surgimento de novas ligas, com propriedades mecânicas e dureza cada vez maiores, cria uma demanda contínua por novos materiais de ferramenta, com propriedades à altura dessas ligas.

$$Hr = \frac{H_T}{H_p}, \quad (3.)$$

onde Hr é a dureza relativa, H_T a dureza do material da ferramenta e H_p a dureza do material da peça.

O maior desafio no desenvolvimento de ferramentas de corte está exatamente no balanço entre a dureza e a tenacidade, visto que são duas propriedades de extrema importância para o desempenho da ferramenta de corte e que não são facilmente encontradas em um mesmo material (Figura 2.12). Atualmente, consegue-se boas combinações de dureza e tenacidade, tanto em materiais de ferramenta puros quanto nos revestidos. As ferramentas revestidas buscam o equilíbrio entre as propriedades necessárias através do uso de um material base, que confere propriedades de tenacidade e alguma dureza, e um revestimento, com alta dureza, resistência a abrasão e inércia química.

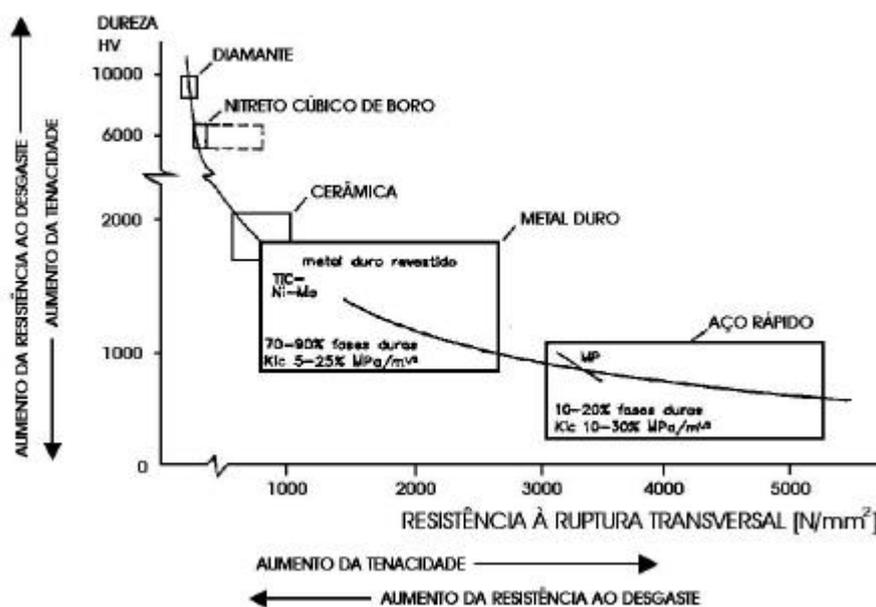


Figura 2.12 – Diagrama de dureza-tenacidade dos materiais de ferramentas de corte (Adaptado de Sandvick Coromant, 1994).

As propriedades que um material para ferramenta de corte deve ter são:

- Dureza;
- Tenacidade;
- Resistência ao desgaste;
- Resistência a compressão;
- Resistência ao cisalhamento;
- Boas propriedades mecânicas e térmicas a altas temperaturas;
- Resistência ao choque térmico;
- Inércia química.

Estas propriedades não estão listadas em ordem de importância, até porque as qualidades necessárias à ferramenta podem variar bastante com a operação de usinagem, com o material a ser usinado e com os parâmetros de corte.

A Figura 2.13 mostra os materiais para ferramentas existentes atualmente no mercado. Como se observa, estes materiais estão em ordem crescente de dureza, e decrescente de tenacidade. Esta ordem também representa o avanço tecnológico dos materiais, de acordo com a cronologia, com algumas exceções.

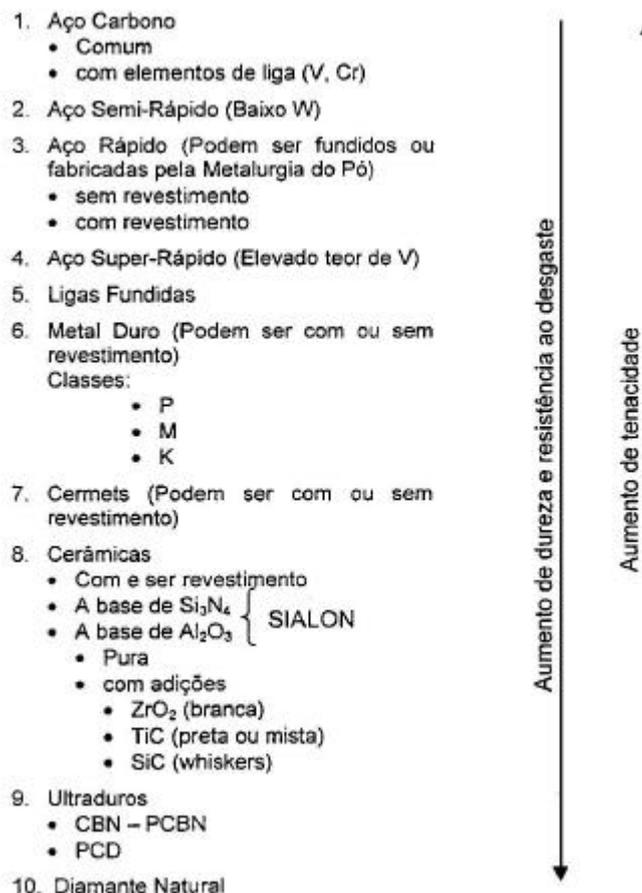


Figura 2.13 – Materiais para ferramentas de corte (fonte: Machado e Silva, 2000).

No contexto histórico, duas categorias de materiais se sobressaem, e podem ser considerados os mais importantes para usinagem, ainda que não os mais eficientes ou tecnologicamente desenvolvidos. Estes materiais são os aços rápidos e os metais duros.

A importância dos aços rápidos e dos metais duros se deve ao fato de, na época de seu desenvolvimento, terem permitido os maiores saltos tecnológicos da história dos processos de usinagem, tendo ocorrido na ocasião do desenvolvimento de cada um desses materiais um aumento nas velocidades de corte de uma ordem de grandeza, comparado com os materiais de corte então existentes. Segundo Machado e Silva, 1999, quando foram desenvolvidos os aços rápidos, as velocidades de corte foram aumentadas de aproximadamente 3m/min para até 35m/min, e após o desenvolvimento do metal duro chegaram a 300m/min.

2.1.6 Falha e Desgaste de Ferramentas de Corte

Existem, num processo de usinagem, duas causas fortes o suficiente para a substituição da ferramenta de corte, que são:

- Avarias ou falhas catastróficas, como lascamento, trincamento ou até mesmo quebra da ferramenta;
- Desgaste excessivo, de modo que as condições de corte ou a qualidade da peça usinada sejam comprometidos.

Na prática, as avarias e falhas catastróficas costumam ocorrer em processos de corte interrompido, como o fresamento, devido aos choques térmicos e mecânicos envolvidos nestes processos. Já nos processos de corte contínuo, como o torneamento, sua ocorrência é mais rara, exceto para condições de corte que excedam as recomendadas, ou que a ferramenta possua algum defeito de fabricação, o que torna seu estudo dispensável ao escopo deste texto.

Ao contrário das avarias e falhas catastróficas, o desgaste de ferramenta é observado tanto nos processos de corte contínuo quanto nos de corte interrompido, podendo se desenvolver de acordo com vários mecanismos diferentes.

2.1.6.1 Tipos de desgaste de ferramenta

Existem três tipos principais de desgaste de ferramenta: desgaste de flanco, desgaste de cratera e desgaste de entalhe.

O desgaste de flanco (Figura 2.14) ocorre nas superfícies de folga, atingindo tanto a aresta principal de corte como a secundária, ou ambas. Quando atinge a aresta principal de corte, resulta num aumento das temperaturas e forças envolvidas no corte, podendo causar vibrações tanto na ferramenta como na peça. Já na aresta secundária de corte, da qual dependem o controle

dimensional e a qualidade do acabamento superficial da peça, um desgaste excessivo resulta numa superfície mal acabada e peças fora da especificação. Em condições normais de usinagem, o desgaste de flanco é o tipo de falha que apresenta o maior risco de danos à peça e que exige mais potência de corte, motivo pelo qual costuma ser o mais usado na determinação de critérios de fim de vida de ferramenta.

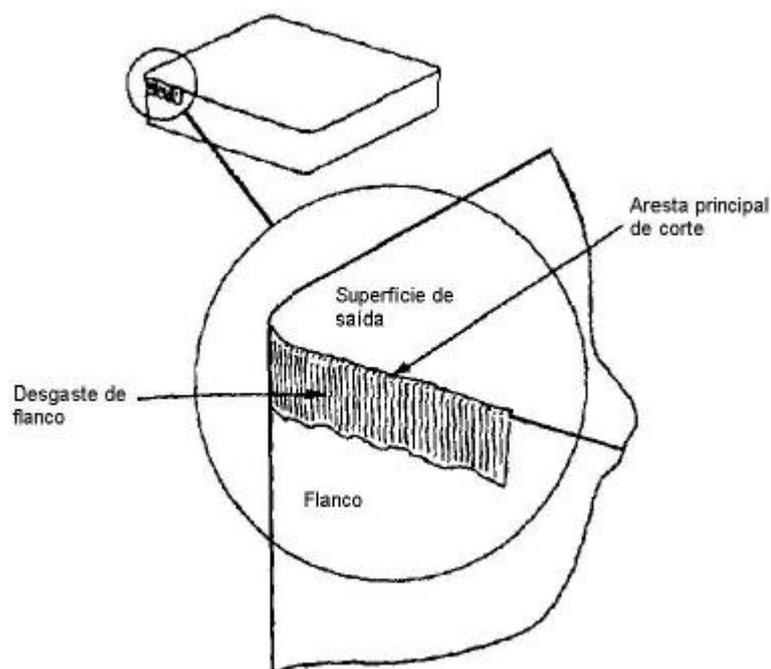


Figura 2.14 – Representação esquemática do desgaste de flanco.

O desgaste de cratera (Figura 2.15) ocorre na superfície de saída da ferramenta, onde se localiza, durante o corte, a zona de deslizamento do cavaco. Este tipo de desgaste resulta de uma combinação entre os mecanismos de desgaste por abrasão e por difusão, e ocorre principalmente a altas velocidades de corte, devido às altas temperaturas geradas, o que favorece o mecanismo de desgaste por difusão. Devido à redução da resistência a abrasão causada pela difusão, é favorecido o desgaste abrasivo, sendo então a forma da cratera resultante da distribuição de tensões na superfície de saída da ferramenta. O desgaste assume então a forma de uma cratera alongada com as extremidades arredondadas, paralela à aresta de corte.

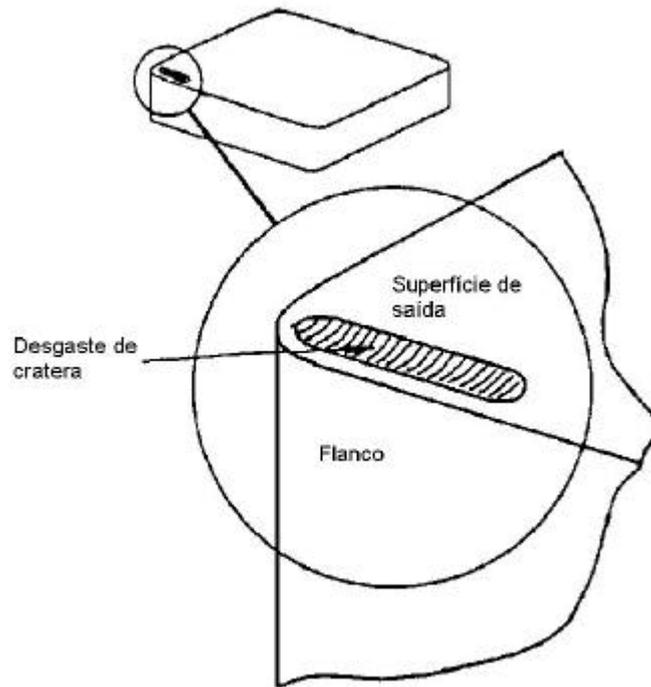


Figura 2.15 – Representação esquemática do desgaste de cratera.

É comum o desgaste de flanco ser mais pronunciado na região onde ocorre o contato com a superfície externa da peça do que nas demais regiões, o que pode ocorrer devido a várias causas, como corte de uma camada de material endurecido pelo passe anterior da ferramenta ou ainda oxidado devido às altas temperaturas, exposição ao ar ou ao fluido de corte. Este tipo de desgaste é chamado desgaste de entalhe (Figura 2.16).

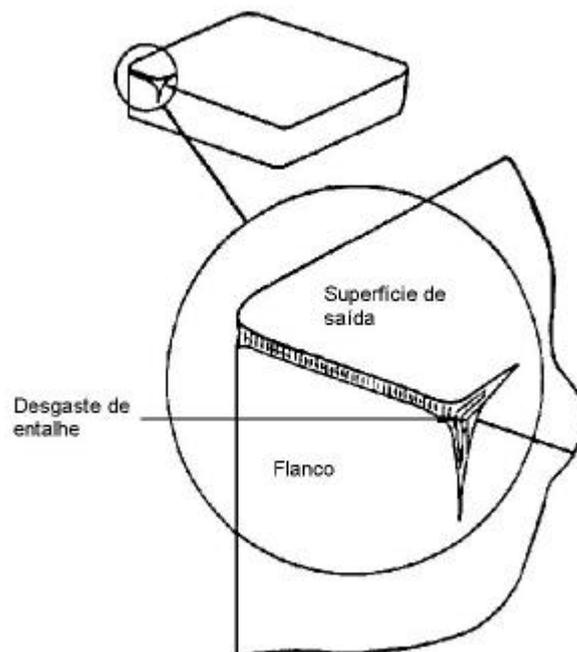


Figura 2.16 – Representação esquemática do desgaste de entalhe.

Apesar de nem sempre afetar o processo de corte, o desgaste de entalhe pode ser bastante prejudicial, pois o entalhe costuma ser relativamente profundo, constituindo uma região de concentração de tensões, que pode levar à quebra da ferramenta.

2.1.6.2 Critérios de fim de vida de ferramenta segundo a norma ISO 3685 /1993

Devido ao caráter progressivo do desgaste de ferramentas de corte, é necessário, para evitar danos causados por falhas catastróficas e gastos excessivos por operação inadequada da máquina operatriz, que se defina até onde uma ferramenta de corte pode ser útil, e quando esta começa a perder suas características operacionais, ou seja, quando a ferramenta deverá ser reafiada ou substituída.

A forma mais usual de determinar este ponto é dada pela norma ISO 3685 (1993). Esta norma estabelece ensaios de usinabilidade para determinar o período de tempo no qual uma ferramenta de corte pode trabalhar, até que seja necessária a sua substituição. Este período, denominado de “*tempo de vida da ferramenta de corte*” (T), é determinado através do tempo de trabalho necessário para que se desenvolva um defeito crítico.

Segundo a norma, os critérios que devem ser adotados para ferramentas de metal duro são (Figura 2.17):

- Desgaste de flanco médio, $V_B = 0,3$ mm
- Desgaste de flanco máximo, $V_{B\ Max} = 0,6$ mm, no caso do desgaste não ocorrer de forma regular ao longo do flanco
- Profundidade da cratera, $KT = 0,06 + 0,3f$, (onde f representa o avanço)
- Distância frontal entre cratera e flanco, $KF = 0,02$ mm
- Falha catastrófica.

Para ferramentas de aço rápido e de cerâmica, os critérios mais comuns são os relativos ao desgaste de flanco médio e máximo, cujos valores são os mesmos indicados para ferramentas de metal duro.

A norma ISO 3685 (1993) recomenda a reafiação ou substituição da ferramenta ao atingir qualquer um destes limites.

A norma ISO 3695 cita também a rugosidade superficial (de acordo com a norma ISO 468), e o crescimento repentino das forças de usinagem como critério de fim de vida de ferramenta em operações de acabamento. No caso específico da rugosidade média, os valores indicados são: 0,4; 0,8; 1,6; 3,2; 6,3; 12,5 μ m, a serem definidos de acordo com a necessidade do fabricante.

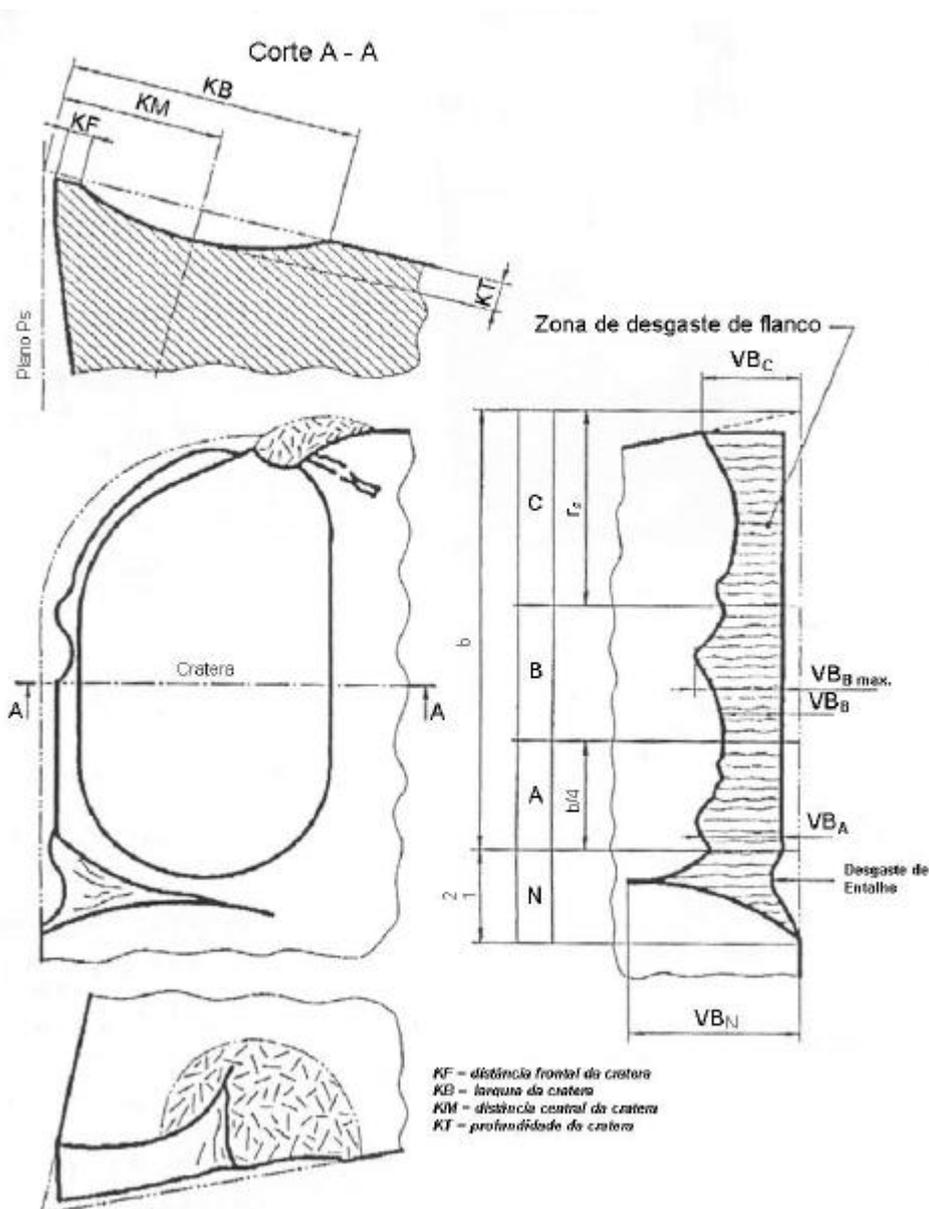


Figura 2.17 – Critérios de desgaste de ferramenta de corte (adaptado da norma ISO 3685).

2.1.6.3 Mecanismos de desgaste de ferramenta de corte

Uma vez que se conheça os tipos de desgaste que costumam ocorrer em ferramentas de corte, é importante conhecer também os mecanismos de desgaste que podem causar as avarias já relatadas na seção 2.1.6.2. Os mecanismos de desgaste de ferramentas constituem um importante objeto de estudo no desenvolvimento de novas tecnologias de usinagem, pois uma forma de aumentar a vida da mesma é atuando no mecanismo de desgaste predominante, a fim de evitá-lo ou minimizar seus efeitos.

Segundo Mills e Redford (1983), existem 5 mecanismos básicos de desgaste de ferramenta: desgaste abrasivo, desgaste adesivo, desgaste difusivo, desgaste causado por ação eletroquímica e desgaste por fadiga superficial.

O mecanismo mais comum entre todos é o desgaste por abrasão, que é causado pelo movimento relativo entre a superfície inferior do cavaco e a superfície de saída da ferramenta, e entre a nova superfície de corte e a aresta de corte da ferramenta. Este mecanismo geralmente causa desgaste de flanco, devido ao movimento relativo entre a aresta de corte e a nova superfície da peça e desgaste de cratera, devido ao movimento entre o cavaco e a superfície de saída. O desgaste abrasivo pode ocorrer até mesmo na usinagem de metais com dureza relativa muito baixa, devido à presença de inclusões endurecidas ou precipitados resultantes da produção ou tratamento térmico do material. De acordo com este mecanismo de desgaste, os materiais que contêm inclusões duras e afiadas são mais prejudiciais do que aqueles que contêm inclusões endurecidas e esféricas, que tendem a deformar plasticamente a superfície da ferramenta.

O desgaste causado por aderência ocorre na zona onde há a “soldagem” entre o cavaco e a superfície de saída da ferramenta, chamada zona de aderência, e está associado à ocorrência da aresta postiça de corte (APC). A APC é basicamente uma camada de cavaco que, permanecendo aderida à aresta de corte, modifica o seu comportamento com relação à força de corte, desgaste da ferramenta e acabamento superficial da peça. O desgaste causado por aderência ocorre, na verdade, quando há a presença de APC instável, pois neste caso ela é periodicamente arrancada da ferramenta, carregando pequenas quantidades de material da ferramenta. Devido à sua dependência ao aparecimento da APC, este mecanismo de desgaste costuma ocorrer a baixas velocidades de corte, e seus efeitos são vistos na superfície de saída da ferramenta.

O desgaste difusivo consiste na transferência de átomos de um material para outro, o que causa variações nas propriedades da camada superficial da ferramenta. Este mecanismo é altamente dependente da temperatura e da solubilidade dos elementos presentes na zona de fluxo (zona de cisalhamento secundário), e costuma ser mais forte a altas velocidades de corte e grandes avanços. A difusão ocorre na zona de aderência, que proporciona tempo para que esta ocorra (assumindo a velocidade da camada inferior do cavaco como zero) e renovação constante de material, pois as camadas do cavaco acima da interface estão em constante movimento.

O desgaste por difusão pode ocorrer de duas formas. Na primeira, o ferro do aço difunde-se para a fase cobalto da ferramenta de metal duro, fragilizando-a e aumentando a solubilidade do carbono de 0,07% para 2,1%, causando a dissociação de carbonetos de tungstênio e formando carbonetos complexos do tipo $(FeW)_{23}C_6$, que possuem uma resistência à abrasão muito menor do que o carboneto de tungstênio original. Já na segunda, o cobalto se difunde no aço do cavaco, fazendo com que camada externa da ferramenta torne-se, onde ocorrer a difusão, de baixa resistência ao cisalhamento. Em ambos os casos, o resultado será uma camada superficial de baixa resistência à abrasão, facilmente desgastada.

O meio mais seguro, atualmente, de evitar o desgaste difusivo é o uso de ferramentas de materiais com maior inércia química, ou com revestimento de materiais que dificultem a difusão ou a formação de carboneto complexos de baixa resistência ao cisalhamento. Exemplos destes materiais são os carbonetos de tântalo (TaC), titânio (TiC) e, principalmente, alumina (Al_2O_3).

Desgaste por ação eletroquímica ocorre, geralmente, em processos onde há o uso de fluido de corte, o que, segundo Mills & Redford (1983), pode gerar condições adequadas à ocorrência de uma reação eletroquímica entre ferramenta e peça. Desta reação, resulta uma camada de baixa resistência ao cisalhamento na superfície de saída da ferramenta, da qual pequenas porções de material são arrancadas. Segundo Mills & Redford (1983), a redução nas forças de corte provenientes da redução do atrito na camada de baixa resistência, aliada à redução do desgaste abrasivo e, por vezes, adesivo, resultante da ação do fluido de corte na redução da temperatura e fiação, irá compensar o desgaste de ferramenta devido à reação eletroquímica.

Por último, o desgaste por fadiga consiste na falha superficial devida a carregamentos (tanto mecânicos quanto térmicos) repetidos. Este mecanismo de desgaste assume importância somente quando há pouca participação dos mecanismos de desgaste abrasivo e adesivo. Devido às características da fadiga de materiais, este mecanismo de desgaste ocorre com mais frequência em processos de corte interrompido, ou em corte contínuo com força de corte instável, e é favorecido quando a dureza relativa entre a peça e o material da ferramenta não é muito elevada.

2.1.7 Acabamento superficial

Geralmente especificado em projetos mecânicos, o acabamento superficial, representado principalmente pela rugosidade, consiste em um conjunto de irregularidades, com espaçamento regular ou irregular, que tendem a formar um padrão ou textura característicos em uma superfície. Estas irregularidades estão presentes em todas as superfícies reais, por mais perfeitas que estas sejam, e muitas vezes constituem uma herança do método empregado na obtenção da superfície (torneamento, fresamento, furação).

A importância da rugosidade justifica-se pela sua relação, entre outros, com fatores como:

Precisão e tolerância – muito importante, em especial em peças com acoplamentos onde furo e eixo estejam em movimento relativo. Neste caso, superfícies com rugosidades mais pronunciadas estarão expostas a desgastes mais intensos do que os que sofreriam caso tivessem um melhor acabamento.

Resistência à corrosão – superfícies com acabamentos superficiais mais pobres tendem a reter maior quantidade de líquidos e vapores do que superfícies melhor acabadas. Desse modo, tornam-se mais vulneráveis à corrosão.

Resistência à fadiga – peças que trabalham sob cargas dinâmicas necessitam de melhor acabamento superficial, pois superfícies com alta rugosidade apresentam maior área efetiva, e geometrias mais propensas a concentração de tensões, oferecendo melhores condições para a nucleação de trincas de fadiga.

Escoamento de fluidos – superfícies com melhores acabamentos permitem escoamentos laminares a faixas mais amplas de velocidade, reduzindo a turbulência. No caso de pistões ou elementos que atuam como retentor, superfícies com melhor acabamento garantem uma vedação mais eficiente, evitando a fuga do elemento sob pressão.

Lubrificação – Caso a profundidade da rugosidade de um entre dois componentes entre os quais haja lubrificação seja maior do que a espessura do filme de óleo usado, ocorrerá contato entre partes metálicas, anulando a lubrificação.

Transmissão de calor – à medida que a rugosidade de um componente diminui, aumenta a área de contato entre este componente e outra superfície, aumentando o coeficiente de transmissão de calor (Figura 2.18).

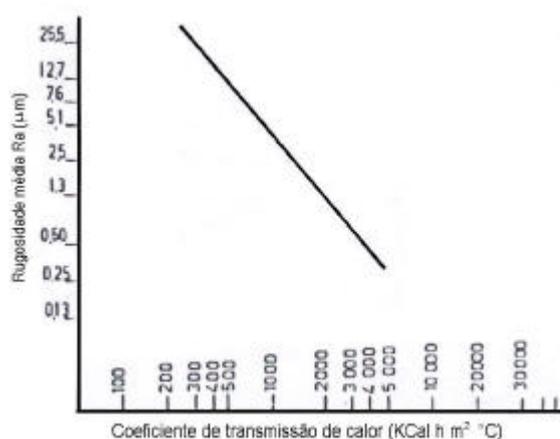


Figura 2.18: Rugosidade média x coeficiente de transmissão de calor (fonte: Mitutoyo).

2.1.7.1 Parâmetros de rugosidade

Parâmetros de rugosidade são procedimentos usados para avaliar o acabamento superficial de um componente. Dentre todos, o mais amplamente usado é a rugosidade média. Este parâmetro de rugosidade consiste na média aritmética dos valores absolutos das ordenadas de afastamento (equação 4) em relação à linha média (Figura 2.19). Pode ser representada como

a altura de um retângulo com área igual à soma absoluta das áreas delimitadas pelo perfil de rugosidade e a linha média, e comprimento igual ao percurso de medição.

$$Ra = \frac{1}{l_m} \int_0^{l_m} |y(x)| dx, \quad (4.)$$

onde l_m é o percurso de medição.

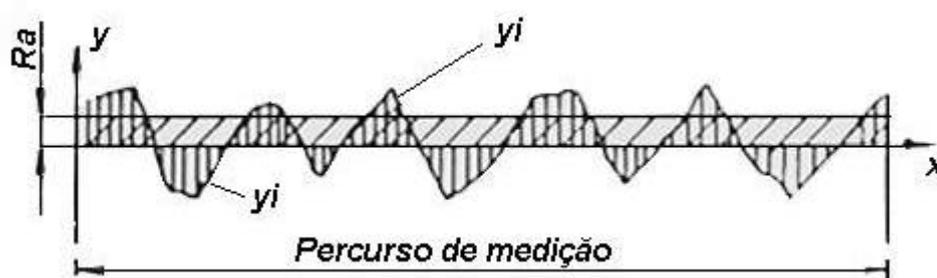


Figura 2.19 – Rugosidade média Ra (fonte: Mitutoyo).

O valor de Ra é geralmente expresso em μm no sistema métrico ou μin no sistema inglês, com os rugosímetros possuindo geralmente resoluções que vão de 0,1 a 0,001 μm .

Devido à facilidade de sua medição, a rugosidade média é bastante empregada em controles continuados em linhas de produção para avaliação da rugosidade em superfícies de pouca responsabilidade e que apresentem sulcos bem definidos, sendo peças torneadas exemplos clássicos.

A rugosidade de uma peça manufaturada é afetada por diversos fatores, desde o processo de fabricação até a geometria da ferramenta, passando pelos parâmetros de corte. Dentre as variáveis que influem sobre a rugosidade, as mais importantes são:

Processo de fabricação – a Figura 2.20 mostra a variação da rugosidade em função do processo de fabricação utilizado, segundo Ferraresi (1970).

Parâmetros de corte – em relação aos parâmetros de corte, Diniz et al. (2000) cita o mais importante como sendo o avanço, sendo este usado para a determinação teórica da rugosidade média (equação 5) segundo Machado e Silva, 1999, juntamente com o raio de ponta da ferramenta. Em relação à profundidade de corte, esta não apresenta grande influência na rugosidade, exceto que, para profundidades de corte superiores a 1mm ocorre um pequeno decréscimo na rugosidade [Diniz et al., 2000].

$$Ra = \frac{f^2}{31,2 \cdot r_e} \quad (5.)$$

| | | RUGOSIDADE SUPERFICIAL | | | | | | | | | | | | | | | |
|----------------------|---------------------------------------|------------------------|-------|------|------|------|------|------|-----|-----|-----|------|------|------|------|--|--|
| Ra | microns (μm) | 0,02 | 0,025 | 0,05 | 0,10 | 0,20 | 0,40 | 0,80 | 1,6 | 3,2 | 6,3 | 12,5 | 25 | 50 | 100 | | |
| | micro polegadas (μin) | 0,5 | 1,0 | 2,0 | 4,0 | 8,0 | 16 | 32 | 63 | 125 | 250 | 500 | 1000 | 2000 | 4000 | | |
| Método de produção | Campo de aplicação 1) | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Fundição em areia | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Corte por maçarico | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Laminação a quente | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Jato de areia | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Serramento | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Forjamento | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Aplainamento | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Fundição em coquilha | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Furacão | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Extrusão | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Fresamento | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Torneamento | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Fundição de precisão | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Mandrilamento | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Laminação a frio | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Fundição sob pressão | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Alarg., brochamento | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Retificação | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Tamboramento | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Rodagem | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Espelhamento | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Lapidação | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Polimento | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Superacabamento | | | | | | | | | | | | | | | | | |

1) Código:
 Campo usual de aplicação
 Aplicação menos comum
Valores maiores ou menores que os indicados podem ser obtidos em condições especiais

Figura 2.20 – Variação da rugosidade com o processo de fabricação (fonte: Ferraresi, 1970).

A velocidade de corte (V_c) mostra, para valores baixos, forte relação com a rugosidade média, devido à formação da aresta postiça de corte (Figura 2.21). Para velocidades de corte superiores a 100 m/min a rugosidade torna-se praticamente estável em relação à velocidade de corte [Ferraresi, 1970].

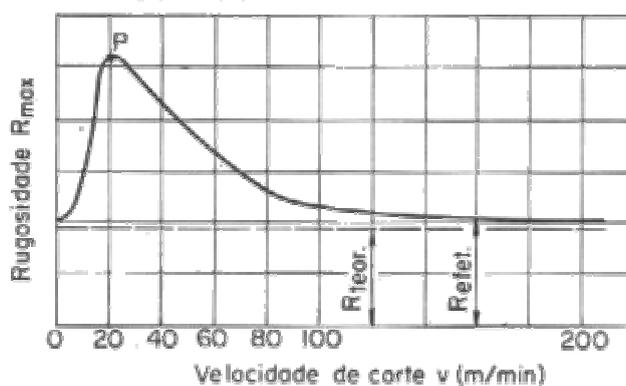


Figura 2.21 – Variação da rugosidade com a velocidade de corte (fonte: Ferraresi, 1970).

Geometria da ferramenta de corte – em relação à geometria da ferramenta de corte, os componentes que mais afetam a rugosidade são:

Ângulo de saída (ϕ) – quanto maior, menores as forças de usinagem e vibrações, e menores os danos causados por estas no acabamento superficial.

Ângulo de folga (α) – quando menor que 5° , acarreta um aumento nas forças de corte, cujo efeito é negativo para o acabamento superficial. Além disso, o atrito entre a superfície usinada e a superfície de folga tende a imprimir na peça o perfil de desgaste da ferramenta de corte, além de dificultar a saída de fragmentos da aresta postiça de corte (quando houver), que tendem a aderir à peça.

Raio de ponta de ferramenta (r_e) – junto com o avanço é o parâmetro mais influente na determinação da rugosidade. A equação 5 constitui uma tentativa de prever a menor Ra possível de ser obtida em um processo de torneamento, pois considera apenas os benefícios do aumento do raio de ponta da ferramenta, não reservando atenção aos problemas causados por este ao acabamento superficial (o aumento de r_e a partir de determinado ponto crítico acarreta o crescimento das forças de usinagem e vibrações, afetando de forma negativa a rugosidade). A Figura 2.22 mostra a influência do raio de ponta de ferramenta, bem como do avanço, na rugosidade máxima do material, sendo facilmente visíveis as relações presentes na equação 5.

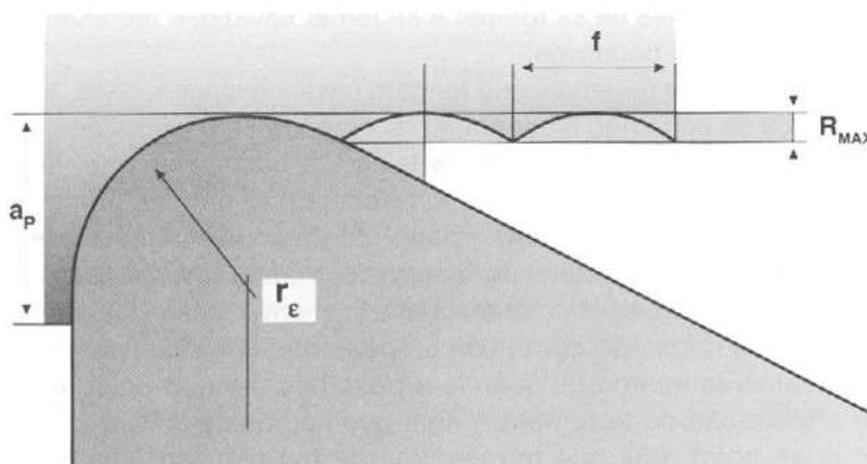


Figura 2.22 – Contribuição geométrica do avanço e raio de ponta de ferramenta na rugosidade (fonte: Diniz et Al., 2000).

2.1.8 Forças de corte

As forças envolvidas no corte de metais são variáveis de fundamental importância para o perfeito entendimento dos vários processos de usinagem convencional. Segundo Trent e Wright, 2000, “o conhecimento das forças de corte é necessário para a estimativa da potência requerida e para o projeto de máquinas operatrizes, suportes e fixação de ferramentas, com rigidez adequada

e livres de vibração”. Além disso, a força de corte pode ser um importante indicador da usinabilidade, constituindo um parâmetro importante na tomada de decisões sobre o material a ser usado em determinada operação.

Por convenção, as forças de usinagem são consideradas como se fossem aplicadas pela peça sobre a ferramenta, sendo a força resultante (tridimensional) chamada força de usinagem (F_u) (Figura 2.23), da qual nem a direção nem o sentido são conhecidos, o que torna muito difícil sua medição direta.

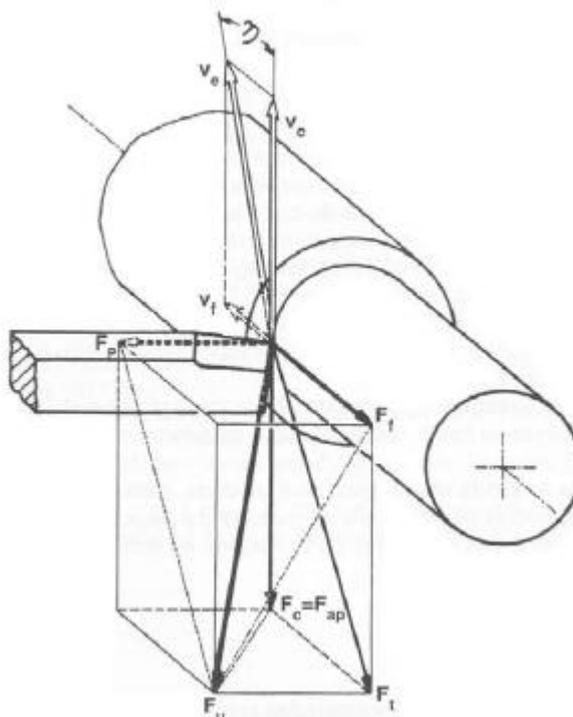


Figura 2.23 – Forças de usinagem (adaptado de Ferraresi, 1970).

Para que se possa determinar a força de usinagem são utilizadas, então, suas componentes, obtidas na direção dos eixos do sistema de referência. Assim, a definição de F_u , em termos vetoriais é:

$$\vec{F}_u = \vec{F}_t + \vec{F}_p, \quad (6.)$$

onde \vec{F}_t é a força ativa, localizada no plano de trabalho, e \vec{F}_p a força passiva, localizada perpendicularmente ao plano de trabalho. Destas, a força ativa ainda se divide em duas componentes, conforme a equação 7:

$$\vec{F}_t = \vec{F}_c + \vec{F}_f \quad (7.)$$

Onde \vec{F}_f é a força de avanço e \vec{F}_c a força de corte que, na operação de torneamento coincide com a força de apoio, devido ao ângulo da direção de avanço ser igual a 90° .

2.1.8.1 Pressão Específica de Corte

Uma forma prática de expressar a força de corte é através da relação

$$F_c = K_s \cdot A, \quad (8.)$$

na qual K_s é a pressão específica de corte e A a área da seção de corte (Figura 2.24). No torneamento, a área da seção de corte é definida pela equação 9.

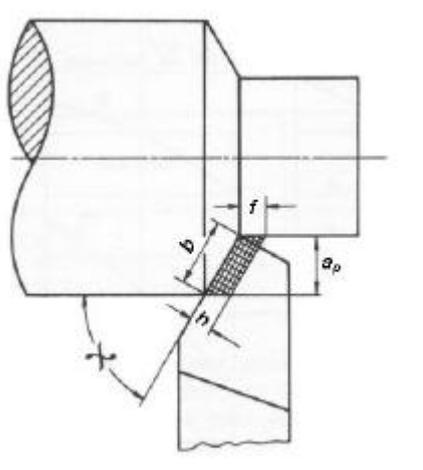


Figura 2.24 – Determinação da área de contato ferramenta-peça para o cálculo da pressão específica de corte (adaptado de Ferraresi, 1970).

$$A = a_p \cdot f = b \cdot h, \quad (9.)$$

Onde b é o comprimento de corte e h a espessura de corte, definidos pelas equações 10 e 11 para ferramentas sem arredondamento nas pontas.

$$b = \frac{a_p}{\text{sen } c} \quad (10.)$$

$$h = f \cdot \text{sen } c \quad (11.)$$

Desse modo, K_s pode ser expressa como

$$K_s = \frac{F_c}{a_p \cdot f}, \quad (12.)$$

A pressão específica de corte pode ser usada, quando conhecida, para a determinação da força de corte, através da equação 12. Desse modo, a dificuldade consiste na determinação de K_s de acordo com os parâmetros de corte usados. A fim solucionar este problema com eficiência e sem a necessidade de realizar medições de força, vários autores desenvolveram formulações empíricas para o cálculo de K_s . Alguns autores, bem como suas respectivas teorias, são:

- a) Taylor, que em 1908 desenvolveu equações específicas para uso em fofo cinzento (eq. 13), fofo branco (eq. 14) e aços “semi-doces” (eq. 15).

$$K_s = \frac{88}{a_p^{0,07} \cdot f^{0,25}} \quad (13.)$$

$$K_s = \frac{138}{a_p^{0,07} \cdot f^{0,25}} \quad (14.)$$

$$K_s = \frac{200}{f^{0,07}} \quad (15.)$$

- b) ASME (American Society of Mechanical Engineers), 1952, apresenta, além da equação 16, tabelas com valores de C_z para vários materiais. A fórmula desenvolvida pela ASME é

$$K_s = \frac{C_z}{f^n}, \quad (16.)$$

Onde C_z é uma constante específica para o material usinado e n é igual a 0,2 para aços e 0,3 para ferro fundido.

- c) AWF (Ausschuss für Wirtschaftliche Fertigung), 1949, sugere o uso da equação 17, na qual C_w é uma constante dependente do material, para o cálculo de K_s .

$$K_s = \frac{C_w}{f^{0,477}} \quad (17.)$$

- d) Kienzle, 1951, criou uma das fórmulas cujo resultado mais se aproxima dos valores reais observados por medição direta das forças em usinagem, motivo pelo qual é bastante usada. Nesta fórmula (Equação 18), K_s é calculado em função da espessura de corte (h), enquanto as constantes K_{s1} e z são determinadas pelo material.

$$K_s = \frac{K_{s1}}{h^z} \quad (18.)$$

- e) Kronenberg, 1954, criou uma fórmula (Equação 19) também bastante difundida devido à boa aproximação entre os resultados decorrentes do uso desta e aqueles verificados experimentalmente.

$$K_s = \frac{Ck_s \left(\frac{G}{5}\right)^{g_s}}{A^{f_s}} \quad (19.)$$

Ck_s , g_s e f_s são constantes que dependem do material da peça e da ferramenta e G é o índice de esbeltez, calculado pela equação 20.

$$G = \frac{a_p}{f} \quad (20.)$$

2.1.8.2 Fatores que afetam as forças de usinagem

O conhecimento das variáveis que afetam as forças de usinagem é importante para o correto projeto do processo, levando em consideração principalmente os aspectos econômicos envolvidos na usinagem.

Como a força de usinagem F_u pode ser separada em três componentes, serão abordados em separado os fatores que afetam a força de corte F_c (e K_s), F_f e F_p .

Fatores que afetam a força de corte

Material da peça – de forma geral, como o corte dos metais depende da deformação plástica e ruptura por cisalhamento destes, quanto maior a resistência do material maior a força de corte (e K_s). Também a dureza do material afeta a força de corte, que geralmente cresce com o aumento desta. Porém, fatores como o acabamento superficial e um baixo atrito cavaco-ferramenta e ferramenta-peça tendem a reduzir a força de corte, podendo mascarar o aumento causado pela dureza da peça. A adição de certos elementos ao material usinado também pode causar alterações na força de corte. A adição de carbono tende a aumentar F_c , enquanto materiais como fósforo, chumbo, enxofre e boro atuam no sentido inverso, motivo pelo qual alguns destes elementos são utilizados nos chamados metais de corte fácil, ou corte livre. A redução de F_c com a adição destes materiais se deve a dois mecanismos: ao mesmo tempo em que geram planos de baixa resistência ao cisalhamento, facilitando a quebra do cavaco, estes materiais formam inclusões que lubrificam a interface cavaco-ferramenta, reduzindo a tensão no plano de cisalhamento secundário.

Material da ferramenta – a ação do material da ferramenta sobre a força de corte costuma ser desprezível, porém, dependendo da afinidade deste com o material da peça, pode ser observada a ocorrência de uma zona de aderência estável e forte, aumentando F_c , ou, no caso contrário, a diminuição do atrito na interface cavaco-ferramenta, o que diminuirá F_c .

Os revestimentos de nitreto de titânio tendem a diminuir sensivelmente o atrito nas interfaces, causando reduções consideráveis na força de corte e K_s .

Geometria da ferramenta – dentre os ângulos de ferramenta, o mais influente é o ângulo de saída (γ). O aumento deste ângulo acarreta a diminuição da força de corte, devido à menor deformação do cavaco (Figura 2.25). O ângulo de inclinação (I_s) causa o mesmo efeito, ainda que em menor escala.

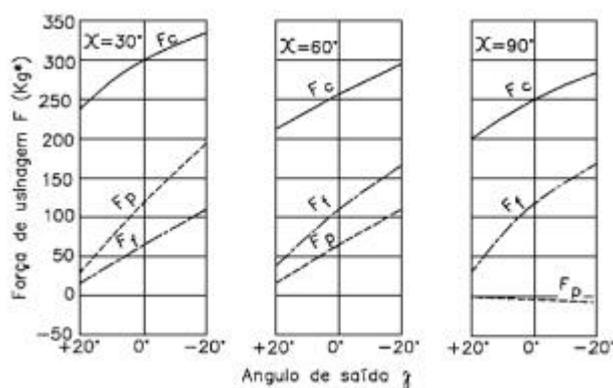


Figura 2.25 – Influência dos ângulos da ferramenta nas componentes da força de usinagem (fonte: Ferraresi, 1970).

Apesar de promover a diminuição da F_c , o aumento de γ e I_s nem sempre é recomendado. No caso de metais dúteis, observa-se uma queda pronunciada da força de corte, pois ocorrem grandes deformações antes da ruptura do cavaco. Porém, na usinagem de metais frágeis, o aumento dos ângulos de saída e de inclinação resulta numa variação pequena de F_c , devida à baixa deformação sofrida pelo cavaco antes da ruptura. Além disso, a ferramenta estará mais suscetível à quebra, uma vez que terá sua seção resistente reduzida.

Outro ângulo de ferramenta que influi na força de corte é o ângulo de folga (α_0), que, se reduzido, faz com que a força de corte aumente devido ao aumento do atrito entre a ferramenta e a peça. Obviamente, com o aumento de F_c sem variação da área da seção de corte, ocorre um aumento de K_s , o que vai contra o argumento de que esta é a pressão exercida sobre a área da seção de corte. Para ângulos de folga maiores que 5°, a influência sobre F_c diminui bastante, se tornando inexpressiva para valores muito maiores.

Velocidade de corte – para valores até cerca de 50m/min, o aumento da velocidade de corte (V_c) causa forte redução na força de corte (Figura 2.26) para todos os metais. Este efeito permanece até velocidades de corte de cerca de 100m/min para os materiais nos quais não ocorre APC, onde a força de corte se estabiliza.

Para os aços nos quais ocorre APC, a atenuação das forças ocorre rapidamente a baixas velocidades de corte (onde ocorre a APC), até um ponto mínimo, a partir do qual a força de corte inicia o crescimento. O aço volta ao regime normal no momento em que a APC deixa de existir (velocidade de corte próxima a 50 m/min).

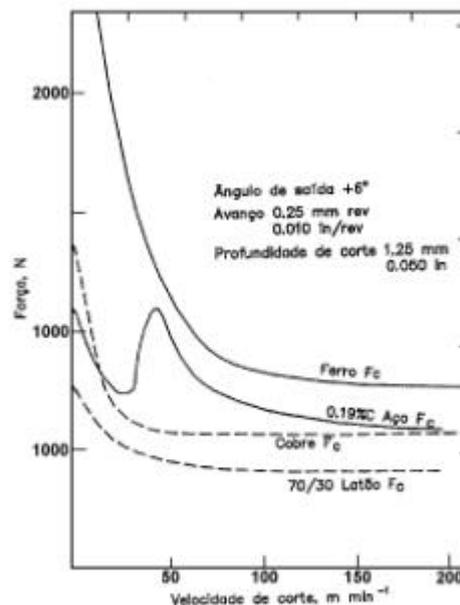


Figura 2.26 – Influência de V_c na força de corte para vários materiais (fonte: Machado e Silva).

O fenômeno da aresta postiça de corte (APC) se faz presente na usinagem de todos os metais que possuam segunda fase, causando uma diminuição acentuada de F_c devido ao aumento do ângulo de saída efetivo. Este efeito desaparece a velocidades de corte mais elevadas (como as usadas na usinagem com metal duro), onde cessa a ocorrência de APC.

Uso de fluido de corte – A ação do fluido de corte sobre a força de corte deve ser encarada de dois pontos de vista, podendo esta influir de maneiras diferentes, dependendo do efeito predominante.

Enquanto a ação lubrificante do fluido de corte atua no sentido de diminuir os esforços através da redução do atrito entre cavaco e ferramenta, a ação refrigerante deste causa um aumento na resistência ao cisalhamento do material da peça, devido à redução de temperatura o que, conseqüentemente, leva ao aumento dos esforços. Logo, a ação positiva ou negativa do fluido de corte está condicionada à ação predominante deste sobre o processo de corte.

Desgaste da ferramenta – O desgaste da ferramenta causa, devido ao aumento da área de contato cavaco-ferramenta, um aumento no atrito, que por sua vez acarreta o aumento da força de corte, como observado na Figura 2.27 (a).

Porém, este aumento pode não ser constante. Para o caso particular onde ocorra desgaste de flanco combinado com desgaste de cratera ocorre o predomínio, em diferentes momentos da vida da ferramenta, de diferentes tipos de desgaste, o que faz com que a força de corte varie de forma distinta do que se observa quando ocorre apenas V_B . A Figura 2.27 (b) mostra o comportamento da força de corte em relação ao tempo de corte para uma operação onde ocorra desgaste de flanco combinado com desgaste de cratera.

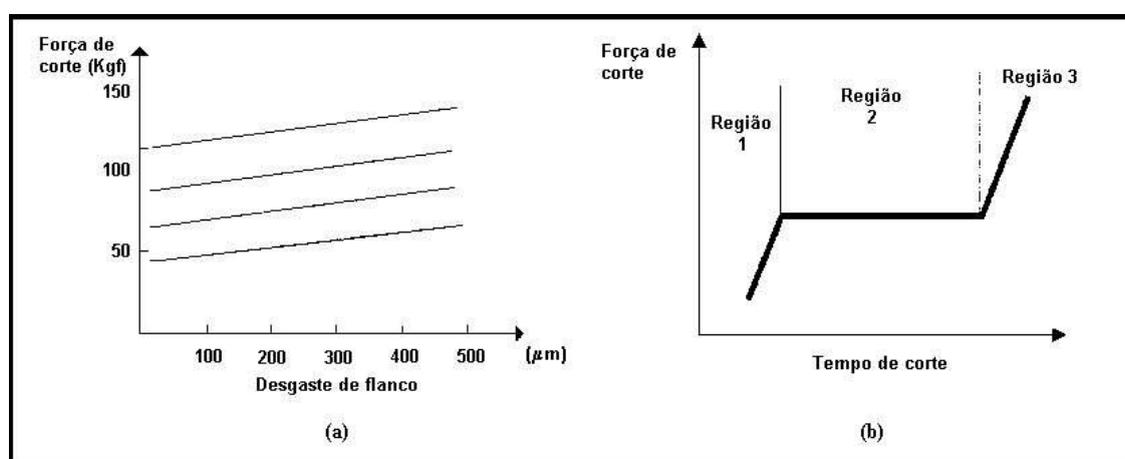


Figura 2.27 – (a) Efeito dos desgastes de flanco na força de corte para vários avanços; (b) efeito combinado dos desgastes de flanco e cratera na força de corte (fonte: Diniz et. al., 2000).

Na região 1 da Figura 2.27 (b), ocorre um rápido aumento na força de corte no início da vida em serviço da ferramenta, que se deve ao fato do desgaste de flanco ocorrer, inicialmente, de forma mais rápida do que o desgaste de cratera. Ocorre então o aumento da força de corte (F_c), devido ao aumento da área de contato cavaco-ferramenta causado pelo desgaste de flanco. Com o aumento do desgaste de cratera, ocorre o aumento do ângulo de saída efetivo da ferramenta, o que gera uma tendência à diminuição de F_c que, compensado pela tendência ao aumento desta causada pelo aumento do desgaste de flanco, faz com que F_c seja aproximadamente constante por um período descrito no gráfico como região 2.

Por fim, no final da vida da ferramenta, os altos valores de desgaste de flanco e cratera acabam por causar mais um aumento nos esforços (região 3).

Área da seção de corte (a_p e f) – De todas as variáveis de processo aqui citadas, o avanço e a profundidade de corte são as únicas que influenciam de forma diferente F_c e K_s .

À medida que aumenta a área da seção de corte (A), ocorre a queda da pressão específica de corte, especialmente devido ao aumento do fluxo lateral de cavaco (constituído por parte do

material deformado da peça que não se transforma em cavaco) causado pelo aumento do avanço (Shaw, 1996).

A força de corte, influenciada tanto pelo aumento de A quanto pela queda da pressão específica de corte, apresenta um crescimento não linear em função da área da seção de corte.

A Figura 2.28 mostra a variação das componentes da força de usinagem com a variação da seção de corte, onde se pode observar o aumento de F_c em proporção menor que a direta.

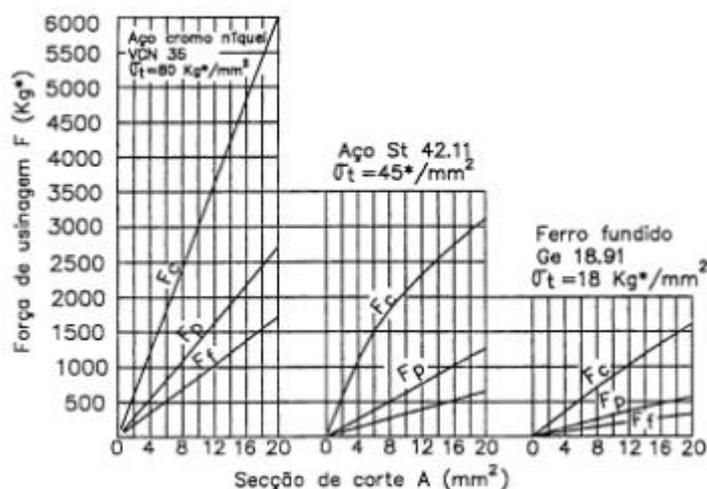


Figura 2.28 – Influência da seção de corte nas componentes da força de usinagem (fonte: Ferraresi, 1970).

Fatores que afetam as forças de avanço e passiva

As forças passiva e de avanço são influenciadas por vários fatores já citados por afetarem a força de corte e a pressão específica de corte. Porém, alguns parâmetros, como a velocidade de corte e alguns ângulos da ferramenta têm, sobre estas forças de usinagem, influências maiores do que sobre a força de corte.

Com o aumento da velocidade de corte, ocorre em F_f e F_p uma variação ainda maior do que aquela observada em F_c . A Figura 2.29 mostra que estas forças apresentam queda até mesmo em velocidades nas quais F_c tende a se estabilizar (acima de 100 m/min).

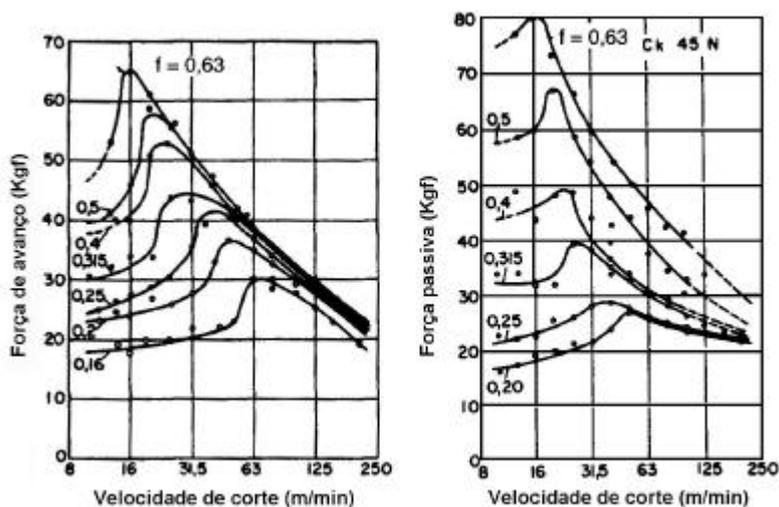


Figura 2.29 – Influência da V_c nas forças de avanço e passiva (fonte: Ferraresi, 1970).

Quanto à geometria de ferramenta, os fatores mais influentes são os ângulos de posição (χ_r) e de inclinação (λ_s) e o raio de ponta da ferramenta. Na Figura 2.30, a influência do ângulo de posição em F_f e F_p é evidente, com o crescimento do ângulo gerando um aumento em F_f , enquanto com F_p ocorre o contrário.

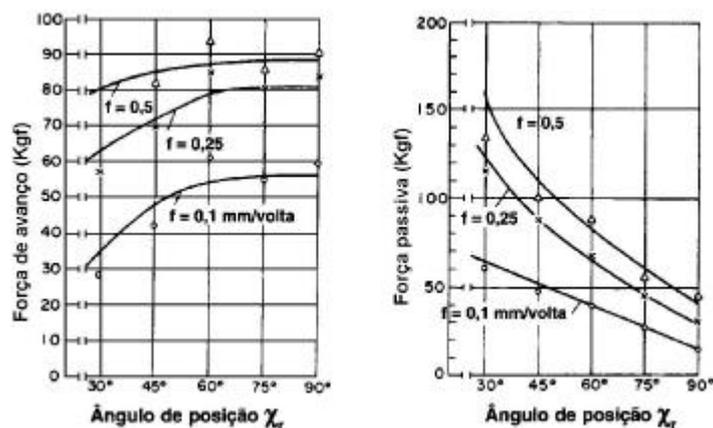


Figura 2.30 – Influência de χ_r nas forças de avanço e passiva (fonte: Diniz et. al., 2000).

A variação do ângulo de inclinação reflete inversamente em F_p , fazendo com que esta aumente quanto menores os valores assumidos (Figura 2.31).

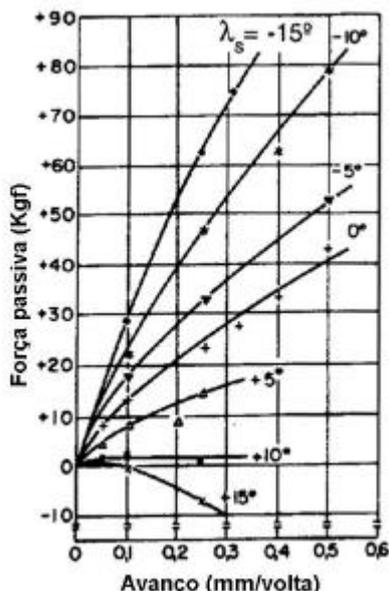


Figura 2.31 – Influência do ângulo de inclinação na força passiva (Fonte: Diniz et al., 2000).

Quanto ao raio de ponta da ferramenta, pode ser observado na Figura 2.32 que o aumento deste acarreta uma diminuição na força de avanço e um aumento substancial na força passiva.

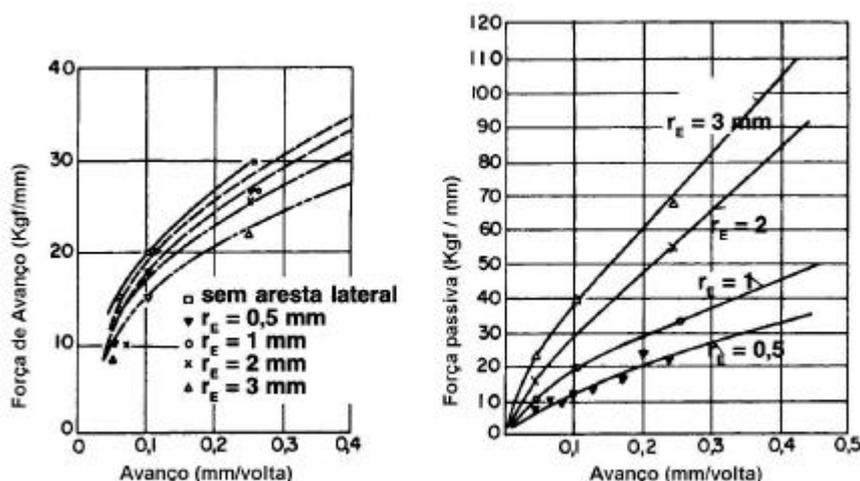


Figura 2.32 – Influência do raio de ponta de ferramenta nas forças de avanço e passiva (Fonte: Diniz et. al., 2000)

2.2 Usinabilidade

Usinabilidade é um termo bastante usado no estudo dos processos de usinagem, e diz respeito tanto ao material da peça quanto ao da ferramenta, e às variáveis de processo envolvidas no corte dos metais. A complexidade e a importância desta “propriedade” pode ser observada pela simples análise das diversas definições encontradas na literatura.

Segundo Ferraresi (1970), usinabilidade pode ser definida como “*uma grandeza tecnológica que expressa, por meio de um valor numérico comparativo (índice de usinagem), um*

conjunto de propriedades de usinagem de um material em relação a outro tomado como padrão”. Trent, 1984, sugere que usinabilidade não é uma propriedade, e sim o modo do material se comportar durante a usinagem. Porém, a definição mais simples e que melhor se aplica foi apresentada por Mills e Redford (1983): “Usinabilidade é a propriedade de um material que governa a facilidade ou a dificuldade com a qual este material pode ser usinado usando uma ferramenta de corte”, que também sugerem que, na prática, o termo usinabilidade tende a refletir os interesses imediatos do fabricante.

A Figura 2.33 mostra os principais fatores que influem na determinação da usinabilidade de um material segundo Ferraresi, 1970:

| Material da peça | Ferramenta de Corte | Processo/máquina |
|--|---|---|
| <ul style="list-style-type: none"> - Composição química - Microestrutura - Propriedades físicas, químicas e mecânicas | <ul style="list-style-type: none"> - Geometria da ferramenta - Material da ferramenta | <ul style="list-style-type: none"> - Processo de usinagem adotado - Condições de usinagem (V_c, f, a_p) - Condições de refrigeração (fluido de corte) - Rigidez da máquina, ferramenta e fixação da peça |

Figura 2.33 – Principais fatores que influem na determinação da usinabilidade dos metais segundo Ferraresi (1970).

Devido aos vários parâmetros de processo e propriedades dos materiais que podem afetar a usinabilidade de um par ferramenta-peça, a determinação do índice de usinabilidade torna-se complexa, e seu uso deve ser criterioso – pois um material que possui um índice de usinabilidade maior de acordo com determinado critério pode apresentar um comportamento completamente distinto quando outro critério for considerado. Além disso, a usinabilidade de dado material sob dada condição de corte também é fortemente influenciada pela ferramenta de corte usada. Assim sendo, para que o índice de usinabilidade encontrado seja plenamente utilizável, faz-se necessária a completa documentação dos ensaios e critérios empregados na sua determinação.

2.2.1 Fatores Ligados ao Material da peça que Afetam a Usinabilidade

Vários fatores ligados ao material da peça influem na usinabilidade do par ferramenta-peça, sendo os mais importantes a composição química (elementos de liga) e as propriedades do material.

2.2.1.1 Efeito dos elementos de liga na usinabilidade de aços

De modo geral, os elementos de liga permitem um certo controle sobre as propriedades do material, por vezes condicionado a outras variáveis como tratamentos térmicos e mecânicos. Os efeitos decorrentes da adição de alguns desses elementos nas propriedades dos aços são mais estudados e divulgados, devido especialmente a seu uso freqüente em projetos. No caso do efeito da adição de elementos de liga na usinabilidade dos aços, alguns elementos possuem pouca documentação, especialmente devido ao “segredo industrial” envolvido na maioria dos estudos.

Alguns elementos adicionados aos metais, e seus efeitos na usinabilidade são:

Enxofre – adicionado ao aço em teores que costumam variar entre 0,08 e 0,13% em massa, podendo chegar, em algumas classes de aço, a 0,35%. O enxofre interage com o manganês, resultando na formação de precipitados de sulfeto de manganês (*MnS*). O *MnS* causa o aumento da usinabilidade dos materiais devido aos seguintes fatores:

- ocorrência de uma camada de *MnS*, que adere à superfície de saída da ferramenta, reduzindo as forças de corte através da redução do atrito entre cavaco e ferramenta;
- aumento na vida da ferramenta, através da proteção oferecida à aresta de corte e à superfície de saída pela camada de *MnS*, que diminui os desgastes abrasivo e difusivo;
- redução das forças de corte através da diminuição da resistência ao cisalhamento do material.

Dos mecanismos através dos quais o *MnS* promove o aumento da usinabilidade dos materiais, os dois primeiros foram observados por Trent e Wright (2000) na usinagem com ferramentas de metal duro (classe P) e algumas ferramentas revestidas.

De todos os aditivos usados para gerar aumento na usinabilidade, o enxofre é o mais barato e um dos mais amplamente usados. Seu uso, porém, acarreta certos efeitos nocivos, como a deterioração das propriedades mecânicas, plasticidade a quente e resistência à corrosão do material usinado. Logo sua aplicabilidade se condiciona principalmente a uma análise detalhada de custos de usinagem (de modo geral, deseja-se saber se a economia decorrente do uso deste aditivo cobre o prejuízo devido à diferença no custo do material e às alterações nas propriedades deste).

Chumbo – adicionado em teores que variam de 0,1 a 0,35% em massa, o chumbo melhora a usinabilidade dos aços devido à formação de inclusões que facilitam a quebra do cavaco, ao efeito lubrificante que gera na superfície de saída da ferramenta e a uma proteção física das superfícies de ferramenta potencialmente desgastadas (Mills e Redford, 1983).

Quanto às propriedades do material, a adição de chumbo causa alterações mínimas nas tensões de escoamento e ruptura, bem como na ductilidade e resistência a fadiga.

Apesar de excelente no que diz respeito ao aumento da usinabilidade com um mínimo dano às demais propriedades, o uso de chumbo como aditivo nos metais têm diminuído gradativamente, pois, devido à sua elevada toxicidade, cada vez mais novas leis ambientais restringem a produção destes aços.

Manganês – quando adicionado em combinação com enxofre, forma o sulfeto de manganês (MnS), cujo resultado foi descrito anteriormente. Porém, na ausência de enxofre, causa diminuição na usinabilidade devido ao aumento causado na dureza do material.

Cálcio – a desoxidação do aço com cálcio durante a fundição é uma técnica recente que leva a uma melhora na usinabilidade, e apresenta uma vantagem indiscutível em relação ao uso de outros aditivos: a de não causar nenhuma alteração nas propriedades do material, motivo pelo qual seu uso se dá principalmente em aços estruturais.

A melhora na usinabilidade se deve ao controle da morfologia de inclusões duras (como alumina e silicatos nos aços) e à formação de uma camada protetora de óxido na interface cavaco-ferramenta durante a usinagem. Este fenômeno promove a diminuição do desgaste da ferramenta a altas velocidades de corte (Yamane,1991), quando usinando com ferramentas de metal duro com revestimento de TiN , ferramentas de WC contendo alta quantidade de TiC (Milan, 1999), aço rápido revestido de TiN (Kankaanpää, 1987) e cermet (Tönshoff e Cassel, 1992).

Selênio e Telúrio – a adição de selênio e telúrio, cujas proporções típicas são de 0,04 a 0,05% em massa para cada elemento, é geralmente feita em combinação com enxofre e chumbo. Estes elementos induzem a formação de inclusões esféricas de sulfetos, eliminando os efeitos negativos causados por estes nas propriedades mecânicas (Boulger, 1990). Aços contendo estes elementos não são facilmente encontrados devido ao custo elevado.

Bismuto – muitas vezes utilizado como substituto do chumbo (possui densidade e peso molecular semelhantes) forma inclusões metálicas, insolúveis no estado sólido, que beneficiam a usinabilidade, com a vantagem de não ser tóxico.

2.2.1.2 Efeito das propriedades do material na usinabilidade

Algumas propriedades que afetam a usinabilidade dos materiais são:

Dureza e resistência mecânica – em altos valores, estas propriedades diminuem a usinabilidade dos materiais, por oferecer demasiada resistência ao processo de corte. Em valores muito baixos, porém, causam a diminuição da usinabilidade devido ao favorecimento à formação de APC a baixas velocidades de corte, e porque o material tende a deformar muito antes de romper, aumentando a área de contato cavaco-ferramenta, o que causa um aumento nas forças de corte devido ao maior atrito na superfície de saída. Logo, deve-se tomar cuidado quanto à dureza

do material, de modo a, sempre que possível, usar materiais com durezas intermediárias. Diniz et al. (2000) sugerem um valor médio de dureza próximo a 200 HB como um ponto a partir do qual a variação da dureza, tanto para cima quanto para baixo, afeta de forma negativa um ou mais critérios de usinabilidade.

Condutividade Térmica – atua de duas maneiras sobre o material: se este possui uma alta condutividade térmica, o calor gerado no corte é retirado rapidamente da interface peça-ferramenta, de modo que a ferramenta não seja superaquecida, o que diminui seu desgaste. Por outro lado, materiais com baixa condutividade térmica tendem a apresentar altas temperaturas na interface cavaco-ferramenta, causando uma redução na resistência ao cisalhamento do material da peça, facilitando seu corte.

2.2.2 Ensaios de Usinabilidade

Os ensaios de usinabilidade são divididos em 2 categorias básicas, que são ensaios que requerem usinagem e ensaios que não requerem usinagem, com subdivisões entre estas categorias. A primeira destas faz distinção entre os testes relativos (ranking testes), que indicam a usinabilidade relativa entre dois ou mais pares ferramenta-peça para condições específicas de corte, e os testes absolutos, que indicam os méritos de dois ou mais pares ferramenta-peça para uma dada faixa de condições de corte. Adicionalmente, uma outra distinção feita entre os ensaios de usinabilidade diz respeito à duração dos ensaios (curta e longa duração).

Os ensaios que não requerem usinagem são sempre testes relativos, enquanto os que requerem usinagem podem ser tanto absolutos quanto relativos. No nível seguinte, os testes relativos são sempre ensaios de curta duração, enquanto os testes absolutos são, na maioria das vezes, de longa duração. Desse modo, a classificação dos ensaios de usinagem é dada de acordo com a Figura 2.34.

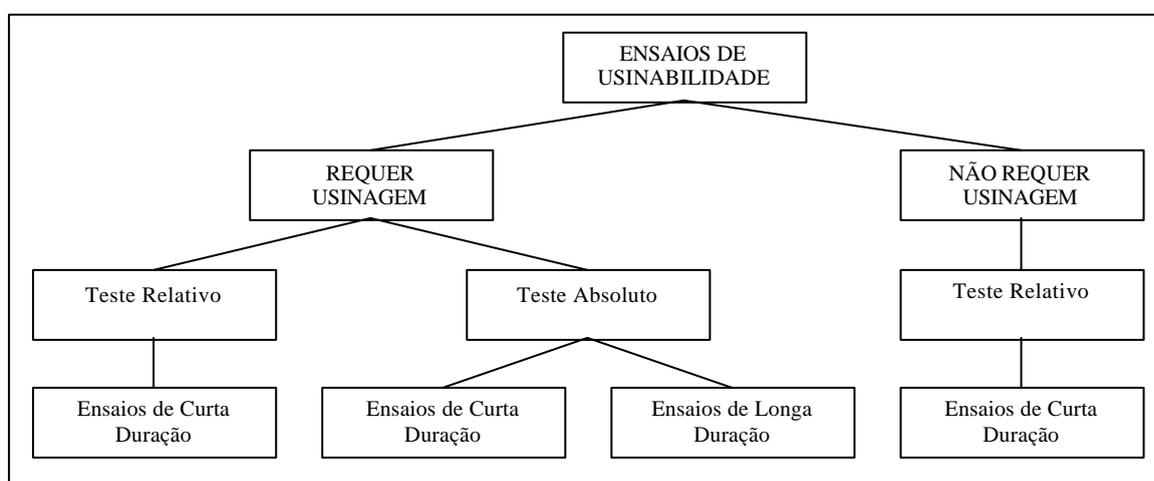


Figura 2.34 – Classificação dos ensaios de usinabilidade segundo Mills e Redford, 1983.

Os testes relativos são muito usados, especialmente na indústria, onde se fazem necessárias decisões rápidas. Porém, estes testes apresentam duas grandes desvantagens, a saber: em primeiro lugar, pode-se verificar através de um ensaio, que um material “A” se comporta melhor que um material “B”, que por sua vez se comporta melhor do que um material “C”. Porém, não há como saber quão melhor este material “A” é do que o material “B” ou “C”, pois a medida de usinabilidade não foi relacionada com alguma escala previsível. A outra desvantagem é que, uma vez que os testes relativos têm o objetivo de comparar a usinabilidade dos materiais para determinada condição de corte, não há garantia de que a classificação permanecerá igual no caso de alguma condição de corte ser alterada.

Já os testes absolutos costumam abranger grandes amplitudes de velocidades de corte e, em alguns casos (especialmente quando do uso da Equação de Taylor expandida) abrange também outras variáveis envolvidas, como avanço, profundidade de corte e geometria de ferramenta.

Quanto aos critérios usados para a avaliação do comportamento em usinagem do material (mais especificamente, da combinação peça-ferramenta) nos ensaios descritos a seguir, Ferraresi (1970) classificou-os como critérios básicos ou específicos, da seguinte maneira:

Critérios Básicos

Critérios baseados na vida da ferramenta

Curvas de vida da ferramenta, velocidade V_{60} .

Método do comprimento usinado.

Método do Faceamento rápido.

Método do aumento progressivo da velocidade de corte.

Método do aumento discreto da velocidade de corte.

Ensaio de sangramento com ferramenta bedame.

Método Radioativo.

Critérios baseados na força de usinagem

Método da pressão específica de corte.

Método da tensão de cisalhamento

Método da força de avanço constante

Critérios baseados no acabamento superficial

Critério baseado na produtividade.

Critérios específicos

Critério baseado na análise dimensional

Critério baseado na temperatura de corte

Critério baseado nas características do cavaco

Grau de recalque.

Coeficiente volumétrico e forma do cavaco.

Frequência e amplitude de variação da força de usinagem

Critério baseado na energia fornecida pelo pêndulo

Pêndulo de Leyensetter

Pêndulo Ehrenreich

Devido à grande quantidade de critérios de usinabilidade, não serão abrangidos todos estes, apenas os mais utilizados, ou mais relacionados ao escopo deste trabalho. Segundo Ferraresi, 1970, os mais comuns são aqueles relacionados à vida da ferramenta, às forças de usinagem e ao acabamento superficial.

2.2.2.1 Ensaios de Usinabilidade sem Usinagem

Os ensaios que não requerem usinagem são sempre relativos e de curta duração, sendo de mais fácil execução do que os ensaios que requeiram usinagem, sejam estes relativos ou não. Estes ensaios são bastante úteis no sentido de prover uma resposta rápida à necessidade do projetista de componentes ou mesmo como um embasamento no desenvolvimento de novos materiais.

Alguns ensaios de usinabilidade que não requerem usinagem são:

Teste de composição química: busca correlacionar dados relativos à composição química de um material a grandezas nas quais seja possível efetuar comparação em termos de usinabilidade. Dois exemplos são os métodos desenvolvidos por Czaplicki (1962) e Boulger et al. (1951), que relacionam a composição do material à V_{60} (velocidade de corte que acarreta uma vida de ferramenta de 60 minutos) e a um índice de usinabilidade de 0 a 100%, respectivamente.

O método desenvolvido por Czaplicki para usinagem com ferramenta de aço rápido garante uma precisão de 8% em relação aos valores obtidos de ensaios de usinabilidade com usinagem (obviamente dentro de uma variedade de materiais, e considerando tratamentos térmicos restritos) para aços. A relação então proposta é:

$$V_{60} = 161,5 - 141,4.\%C - 42,4.\%Si - 39,2.\%Mn - 179,4.\%P + 121,4.\%S \quad (21.)$$

Segundo Ferraresi (1970), esta relação não apresenta resultados coerentes para ferramentas de metal duro.

A equação proposta por Boulger et al., 1951, relaciona seu índice de usinabilidade ($I.U.$) com a composição química da seguinte forma:

$$I.U. = 146,0 - 400,0.\%C - 1500,0.\%Si + 200,0.\%S \quad (22.)$$

Teste de microestrutura: a microestrutura determina várias propriedades de um material, influenciando grandemente em sua usinabilidade. Strafford et al., 1997, verificou, em estudos relacionados ao monitoramento da usinabilidade de aços, que as amplitudes dos componentes da força de corte dependem fortemente do tamanho de grão e da proporção das fases ferrítica e perlítica em diferentes aços. Um estudo publicado por Singh et al., 1996, relacionando o nível de inclusões com a usinabilidade de aços, verificou que a remoção das inclusões em um aço causa tanto o aumento das forças de corte quanto a redução do desgaste de flanco, influenciando de forma diferente em critérios de usinabilidade diferentes.

Segundo Mills e Redford (1983), a avaliação mais usada do efeito da microestrutura do material da peça na usinabilidade é a desenvolvida por Zatlín e Field (1950), cujos resultados estão na Tabela 2.1, segundo a qual aços contendo 50% ou mais de perlita combinam boa usinabilidade com alta dureza.

Tabela 2.1 – Propriedades do material em função da microestrutura. Fonte: Mills and Redford.

| Tipo de Microestrutura | Dureza Brinell | V20 (m/min) (ferramenta de metal duro) |
|------------------------|----------------|---|
| 10% perlita + | | |
| 90% Ferrita | 100 - 120 | 290 |
| 20% perlita + | | |
| 80% Ferrita | 120 - 140 | 260 |
| 25% perlita | 150 | ---- |
| Esferoidizada | 160 - 180 | 180 |
| 50% perlita + | | |
| 50% Ferrita | 150 - 180 | ---- |
| 75% perlita + | | |
| 25% ferrita | 170 - 190 | 140 |
| 100% perlita | 180 - 220 | 145 |
| martensita | | |
| temperada | 240 | ---- |
| " | 280 - 320 | 105 |
| " | 350 | ---- |
| " | 370 - 420 | 46 |

Teste de propriedades físicas: a técnica desenvolvida por Henkin e Datsko (1963), citados por Mills e Redford (1996), associa propriedades como condutividade térmica (B), dureza Brinell (HB) do material e comprimento característico (L) e redução percentual de área obtidos em ensaio de tração convencional (Ar) com a V_{60} de um material (eq. 23). Esta correlação funciona para os aços utilizados na determinação do método e outros de composição similar, mas, por não levar em consideração o material da ferramenta, está sujeita a erros significativos.

$$V_{60} \propto \frac{B}{L.HB} \left(1 - \frac{Ar}{1000}\right)^{1/2} \quad (23.)$$

Outro trabalho relacionando propriedades físicas com a V_{60} com bons resultados é o desenvolvido por Janitzkg (1944), também citado por Mills e Redford (1983).

$$V_{60} \propto \frac{D}{H_B . Ar} \quad (24.)$$

Onde D é uma constante dependente das dimensões de corte.

2.2.2.2 Ensaio de usinabilidade que requerem usinagem

Estes ensaios, bastante usados na indústria são classificados, conforme a Figura 2.34, em testes absolutos e relativos.

2.2.2.2.1 Testes Relativos

Ensaio de pressão constante: proposto por Boulger et al. (1949) e, segundo Mills e Redford (1983), provavelmente o mais conhecido dos testes relativos, consiste, no torneamento, em manter a força de avanço constante e, a partir da medição do tempo necessário para usinar uma distância predeterminada, obter a taxa de avanço resultante, que será então usada como parâmetro de usinabilidade do material. Este ensaio pode ser feito também para operações de furação e alargamento, com facilidade ainda maior do que no caso do torneamento, pois, por exemplo, em uma furadeira de coluna ou bancada o avanço constante pode ser facilmente obtido pelo uso de um sistema de roldana, cabos e pesos adaptados ao eixo de avanço da máquina.

Ensaio de faceamento rápido: este ensaio, proposto por Kraus e Weddel (1937), citado por Mills e Redford (1983), consiste no faceamento, em torno, de uma peça, partindo do centro em direção ao perímetro externo, estando o torno a uma rotação constante. O aumento na velocidade de corte resultante desse procedimento causa, em um ponto crítico, o colapso da ferramenta, verificado facilmente na peça a partir de uma análise da superfície usinada.

A medida de usinabilidade proveniente deste ensaio pode ser o tempo necessário para o colapso da ferramenta, a distância percorrida pela ferramenta até o seu colapso, ou ainda a velocidade crítica de corte.

Devido à falha catastrófica não ser um critério válido para ferramentas de metal duro, este tipo de ensaio apresenta como principal limitação o fato de ser aplicável apenas a ferramentas de aço rápido. Outras limitações são relativas ao espaço físico do torno, que deve suportar uma peça de dimensões suficientes para atingir o colapso da ferramenta, e ao material da peça, que deve ser tão homogêneo quanto possível para garantir um resultado confiável.

Teste de Rosqueamento: não exatamente um ensaio de curta duração, apesar de assim classificado, este tipo de ensaio é bastante interessante por focar não o material da peça ou da ferramenta de corte, mas o fluido de corte usado.

Os ensaios de rosqueamento são bastante usados na indústria, e seus resultados, segundo Mills e Redford (1983), correlacionam-se com os obtidos na prática, não apenas para o rosqueamento como também para outras operações de corte.

Os parâmetros usados para a comparação da usinabilidade são o número de furos rosqueados até o desgaste de flanco atingir determinado ponto, o desgaste gerado por furo e as dimensões dos furos.

2.2.2.2.2 Ensaio Absolutos

São os ensaios mais completos, abrangendo mais de uma condição de corte. Estes ensaios costumam se basear na equação de Taylor, calculada a partir dos dados obtidos no teste.

A equação de Taylor (equação 25) relaciona a vida da ferramenta de corte (T) com a velocidade de corte (V_c), considerando as propriedades do material através das constantes K e x , dependentes do par ferramenta-peça.

$$T = K.V_c^{-x} \quad (25.)$$

Ensaio de Torneamento Cônico

Este ensaio de curta duração (apesar de absoluto) foi proposto por Heigmbotam e Pandey (1966) e citado por Mills e Redford (1996), e consiste basicamente no torneamento do menor para o maior diâmetro e com avanço constante de uma peça de perfil cônico, de forma que a velocidade de corte aumenta a uma taxa constante.

O aumento constante na velocidade de corte acelera, de certa forma como o teste de faceamento rápido, o desgaste da ferramenta, diminuindo sua vida. A partir dos resultados,

conhecendo-se a velocidade de corte inicial, a taxa de variação da velocidade de corte, o tempo de usinagem e o desgaste de flanco na ferramenta, pode-se determinar as constantes x e K da equação de Taylor.

Segundo os autores, apesar dos resultados obtidos por este método não representaram o comportamento do material a uma velocidade de corte constante, estão em concordância com os resultados obtidos em ensaios de longa duração.

Ensaio de torneamento com velocidade de corte variável

Desenvolvido a partir do conceito introduzido pelo teste de torneamento cônico, este ensaio difere basicamente pelo fato da velocidade de corte variar devido a uma aceleração constante na rotação do torno, o que elimina tanto o preparo de um corpo de prova cônico quanto as dificuldades de usiná-lo.

Os dados decorrentes deste teste podem ser processados da mesma forma que os dados do procedimento anteriormente explicado, e a única desvantagem aparente é o fato de um torno com variação de rotação programável se fazer necessário. Evangelista (2001), buscou relações entre resultados de ensaios de torneamento com velocidade de corte variável e de ensaios de taxa de desgaste de flanco, encontrando boa correlação com o aço SAE 1045.

Teste da taxa de desgaste

Considerado o mais eficiente dos ensaios de usinabilidade, este ensaio, regulamentado pela norma ISO 3685 de 1993 consiste no torneamento de corpos de prova, com parada da operação e verificação do desgaste da ferramenta a intervalos regulares. O procedimento é repetido continuamente até que o desgaste da ferramenta chegue a um limite preestabelecido como o fim de vida da ferramenta (tabela 2.2).

Tabela 2.2 – Critérios de fim de vida de ferramenta de corte recomendados pela norma ISO 3685 (1993).

| Critérios de fim de vida de ferramenta de corte | |
|---|--------------|
| Desgaste de flanco médio (V_B) | 0,3mm |
| Desgaste de flanco máximo ($V_{B Max}$) | 0,6mm |
| Profundidade de cratera (KT) | $0,06+0,3.f$ |
| Falha catastrófica | |

De posse dos dados relativos ao tempo de corte e desgaste de ferramenta, plota-se a curva de desgaste da ferramenta em função do tempo de corte (Figura 2.35), repetindo-se o

experimento para no mínimo mais duas velocidades de corte diferentes, necessárias para a determinação da equação de Taylor.

A seguir é plotada, a partir dos dados obtidos na curva $V_B \times t$, a curva de vida de ferramenta $V_c \times T$, em escala logarítmica (Figura 2.36), na qual pode-se observar uma clara tendência dos resultados (caso o experimento tenha sido realizado para várias velocidades de corte) agruparem-se em torno de uma reta, que possui a forma

$$\text{LOG}T = \text{LOG}K - x\text{LOG}V_c, \quad (26.)$$

que nada mais é do que a equação de Taylor na forma logarítmica. A partir do gráfico, pode-se resolver esta equação, restando apenas a definição de um parâmetro facilmente comparável em termos quantitativos, por conveniência a V_{60} .

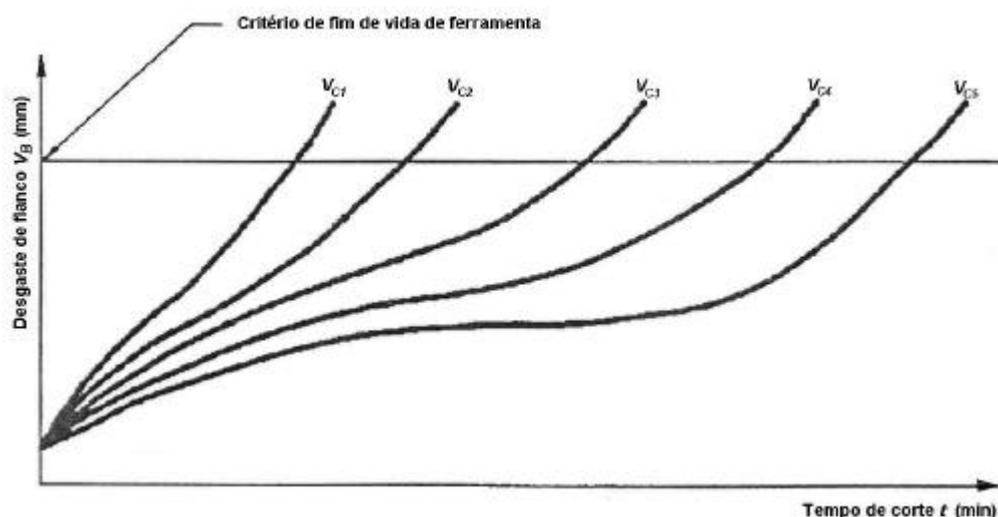


Figura 2.35 – Curva $V_B \times t$ (Fonte: ISO 3685, 1993) .

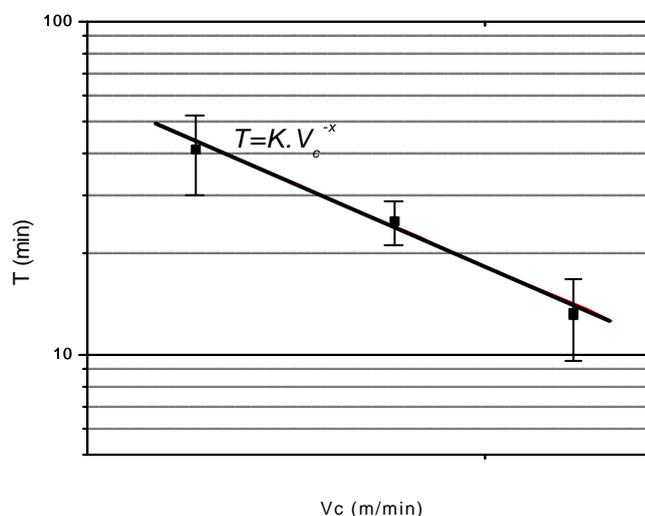


Figura 2.36 – Curva $V_c \times T$.

3. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

O procedimento experimental foi realizado no SENAI-CETEMP de São Leopoldo, em parceria com o Laboratório de Usinagem – UFRGS, e com apoio da Aços Finos Piratini. Foram realizados ensaios de taxa de desgaste de flanco para determinação da equação de Taylor, com aquisição simultânea das forças de corte e avanço, e medição da rugosidade média das peças usinadas.

3.1 Material ensaiado

Na realização deste trabalho, foram utilizados dois materiais: aço ABNT 1040 ($187,6 \pm 0,6$ HB na superfície) e ABNT 1045 ($188,7 \pm 1,5$ HB na superfície), ambos dentro da especificação comercial e fornecidos pela Aços Finos Piratini.

Não foi feito tratamento térmico em nenhum dos aços estudados, sendo ambos ensaiados em estado bruto de laminação. Quanto à variação da dureza em relação ao diâmetro do material, mediu-se o perfil transversal de dureza (Figura 3.1), cujos valores são mostrados na Tabela 3.1. Cada ponto no qual efetuou-se a medição situa-se em uma camada aproximadamente 4,3mm distante da anterior.

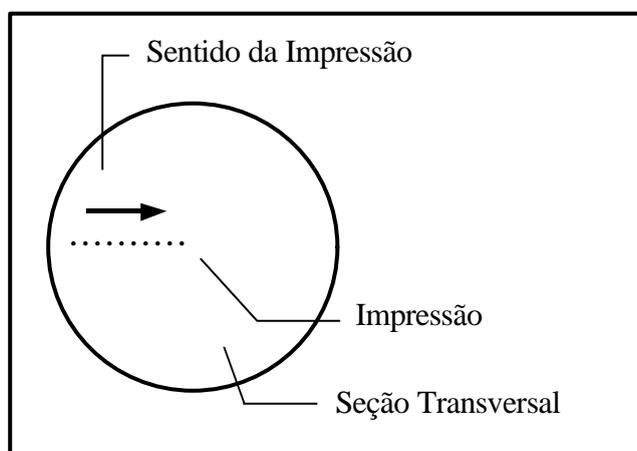


Figura 3.1 – Representação esquemática do perfil de dureza dos materiais ensaiados.

Tabela 3.1 – Valores de dureza dos aços ABNT 1040 e 1045 ao longo da seção das barras.

| Aço | Dureza HB | | | | | | | | |
|-----------|------------|-----|-----|--------------------|-----|-----|--------|-----|-----|
| | Superfície | | | $\frac{1}{2}$ Raio | | | Núcleo | | |
| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 |
| ABNT 1040 | 187 | 188 | 188 | 192 | 196 | 195 | 194 | 193 | 190 |
| ABNT 1045 | 187 | 189 | 190 | 190 | 191 | 192 | 193 | 196 | 194 |

A análise da microestrutura dos aços (Figura 3.2), mostra uma microestrutura contendo ferrita e perlita para os dois materiais em questão. Pode-se observar um grão mais refinado para o aço ABNT 1045.

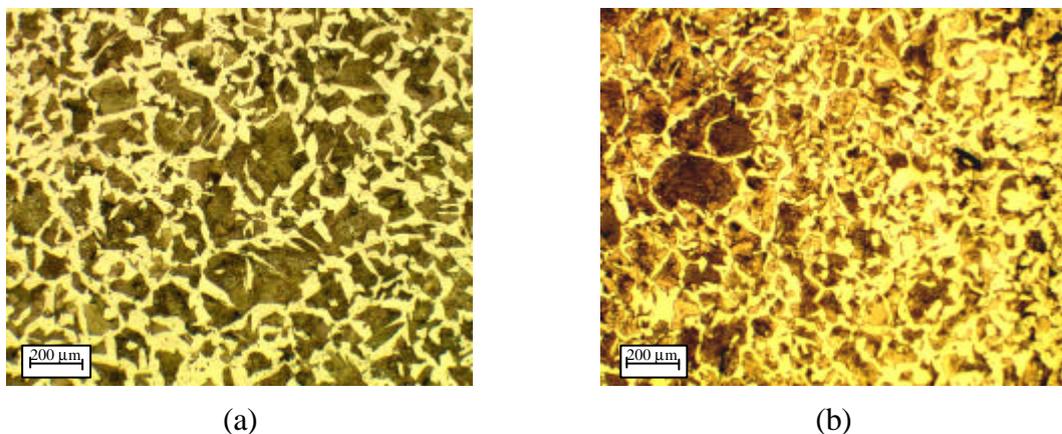


Figura 3.2 – Micrografia transversal da superfície: (a) do aço ABNT 1040 e (b) do aço ABNT 1045.

3.2 Corpos de Prova

Os corpos de prova utilizados para os ensaios dos dois aços testados foram semelhantes, variando apenas no comprimento útil para usinagem. Para o aço ABNT 1045, estipulou-se um comprimento de corte constante, com o tempo de corte entre medições de desgaste e rugosidade variando de acordo com a velocidade de corte empregada (Figura 3.3). Para o aço ABNT 1040, a fim de padronizar os resultados dos ensaios em relação ao tempo, variou-se o comprimento usinado de acordo com a velocidade de corte empregada. Em todas as amostras o comprimento a ser usinado é delimitado por um canal pré-usinado, que tem a função de facilitar a saída da ferramenta. O sistema de fixação usado foi placa e ponto, motivo pelo qual todas as amostras possuem furo de centro com chanfro de 120° . A usinagem de ambos os aços foi feita em uma região situada entre a superfície e uma profundidade máxima de 6mm.

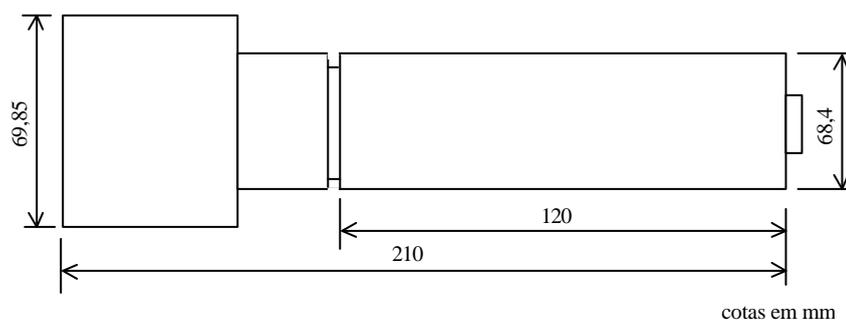


Figura 3.3 – Representação esquemática dos corpos de prova usados nos ensaios do aço ABNT 1045.

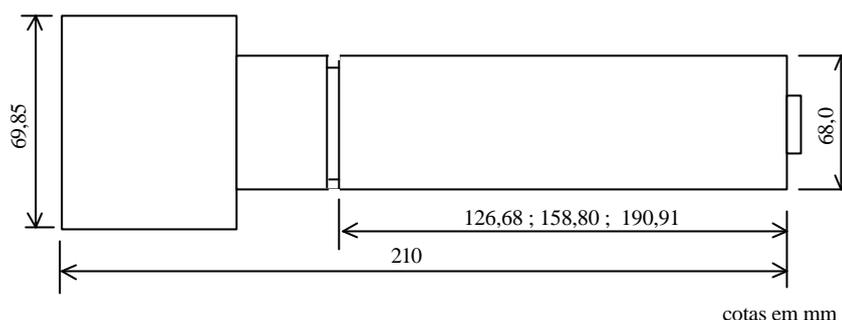


Figura 3.4 – Representação esquemática dos corpos de prova usados nos ensaios do aço ABNT 1040.

3.2 – Ferramenta de corte

Em todos os ensaios, para ambos os aços, a ferramenta de corte usada foi Sandvik Coromant, tipo TNMG 160404-PF GC 4015 P15 (Figura 3.5), em conjunto com o suporte de ferramenta modelo MTJNR 2525M 16M1. Esta ferramenta é feita de metal duro tipo P15 com revestimento de alumina e nitreto de titânio, e possui quebra-cavaco. Para os aços utilizados, esta ferramenta é indicada para operações de acabamento e desbaste médio. A Tabela 3.2 mostra os dados relativos ao conjunto ferramenta e porta ferramenta, bem como as condições de corte indicadas pelo fabricante e as utilizadas no trabalho.

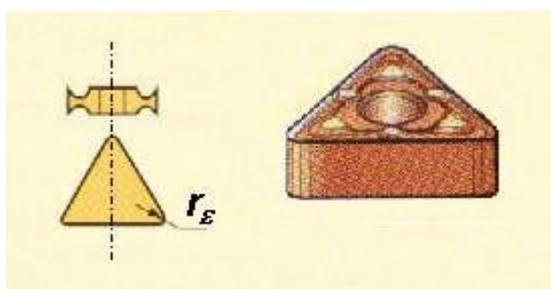


Figura 3.5 – Ferramentas de corte utilizadas (fonte: sandvik coromant).

Tabela 3.2 – Dados de corte relativos à ferramenta de corte.

| | |
|--|---|
| Ângulos | $\alpha_0 = 6^\circ$; $\gamma = 93^\circ$; $\lambda = -6^\circ$; |
| | ângulo de saída do quebra-cavaco = 15° ; $\beta = 9^\circ$ |
| Raio de ponta r_e (mm) | 0,4 |
| Avanço f indicado (mm/volta) | 0,07 – 0,30 |
| Profundidade de corte a_p indicada (mm) | 0,30 – 1,50 |
| Velocidade de corte V_c indicada (m/min) | 395 – 550 |

3.3 Parâmetros de corte

Os parâmetros de corte utilizados nos ensaios de usinabilidade para os aços ABNT 1040 e 1045 são apresentados na Tabela 3.3. As velocidades de corte foram definidas a partir de pré-

testes, nos quais buscou-se faixas de condições de corte onde a vida da ferramenta não fosse menor do que 5 minutos, e nem excessivamente longa. Desse modo, a partir da inclinação das curvas observada nos pré-testes, escolheu-se intervalos mais ou menos amplos para cada material.

Tabela 3.3 – Parâmetros de corte utilizados nos ensaios.

| | |
|---|---------------|
| Avanço f utilizado (mm/volta) | 0,15 |
| Profundidade de corte a_p utilizada (mm) | 0,8 |
| Velocidades de corte V_c utilizadas para o aço 1040 (m/min) | 425, 475, 525 |
| Velocidades de corte V_c utilizadas para o aço 1045 (m/min) | 355, 445, 535 |

3.4 Equipamentos

Torno: marca Romi, modelo Centur 30 RV (Figura 3.6). Este torno possui como características potência de 10 CV, distância entre pontas de 1000 mm, diâmetro máximo de 160 mm e rotação máxima de 3500 rpm.



Figura 3.6 – Torno Romi Centur 30RV.

Equipamento para medição de forças de usinagem: foi usado, para medição das forças de usinagem, um dinamômetro Kistler modelo 9257A (Figura 3.7), conectado a um amplificador de sinal Kistler 5006. Este dinamômetro realiza a medição de forças por efeito *piezométrico*, nos eixos x , y e z , em uma escala que vai de -5 a 5kN para os eixos x e y , e -5 a 10kN em z . Sua alta frequência natural de vibração permite a medição dinâmica das forças de corte minimizando erros relativos à vibração.

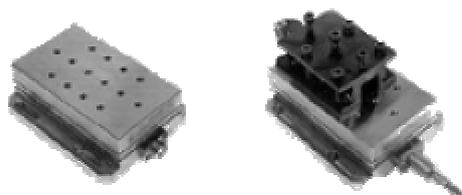


Figura 3.7 – Dinamômetro piezzoelétrico Kistler 9257A.

A aquisição das forças de usinagem é feita via computador, através de conversor A/D 12 bits marca Computer Boards. O software usado para a aquisição dos dados foi o Labview Pro.

Equipamento para medição da rugosidade: rugosímetro Mitutoyo modelo surfstest 301 (Figura 3.8).

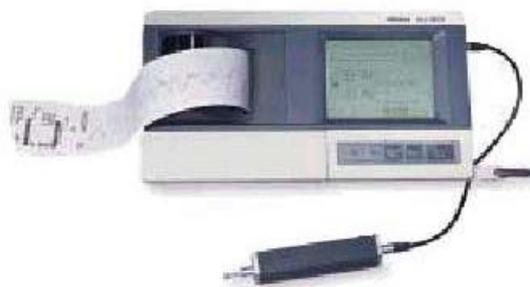


Figura 3.8 – Rugosímetro Mitutoyo modelo surfstest 301.

Equipamento para medição do desgaste de flanco da ferramenta: o desgaste de flanco da ferramenta foi medido com um microscópio de ferramentaria marca Mitutoyo modelo toolmakers TM-201 (Figura 3.9). Este microscópio possui dois nônios (para medição em x e y), com resolução de 0,01 mm.



Figura 3.9 – Microscópio de ferramentaria marca Mitutoyo modelo toolmakers TM-201.

3.5 Procedimento

O procedimento adotado na execução dos ensaios foi o mesmo para os dois aços estudados, realizado de acordo com o esquema apresentado na Figura 3.10.

Durante a usinagem do corpo de prova (1), realizou-se a medição das forças de corte e avanço através do dinamômetro Kistler 9257 A (2), cujo sinal foi amplificado pelo condicionador de sinais (3). Para a conversão do sinal analógico em digital, usou-se o conversor A/D (4), após o qual o sinal foi gravado em computador (5) para análise futura. Cada ciclo de aquisição de forças compreendeu dois passes de ferramenta, após os quais a peça e a ferramenta eram retiradas dos respectivos suportes para que e realiza-se as medições de desgaste de flanco máximo ($V_{B\ Max}$) e rugosidade média (Ra).

A medição do desgaste de flanco máximo foi realizada no microscópio de ferramentaria Mitutoyo toolmakers TM-201, com cada medição sendo realizada 3 vezes por operadores diferentes. Simultaneamente, o corpo de prova usinado era adaptado em um suporte horizontal (7), onde realizava-se a medição da rugosidade média da peça usinada, com o rugosímetro Mitutoyo surfestest 301 (8). Cada medição da rugosidade média foi feita em 3 pontos da peça, distantes entre si aproximadamente 120° . Este procedimento foi repetido, em cada ensaio, até que o critério de fim de vida de ferramenta fosse atingido.

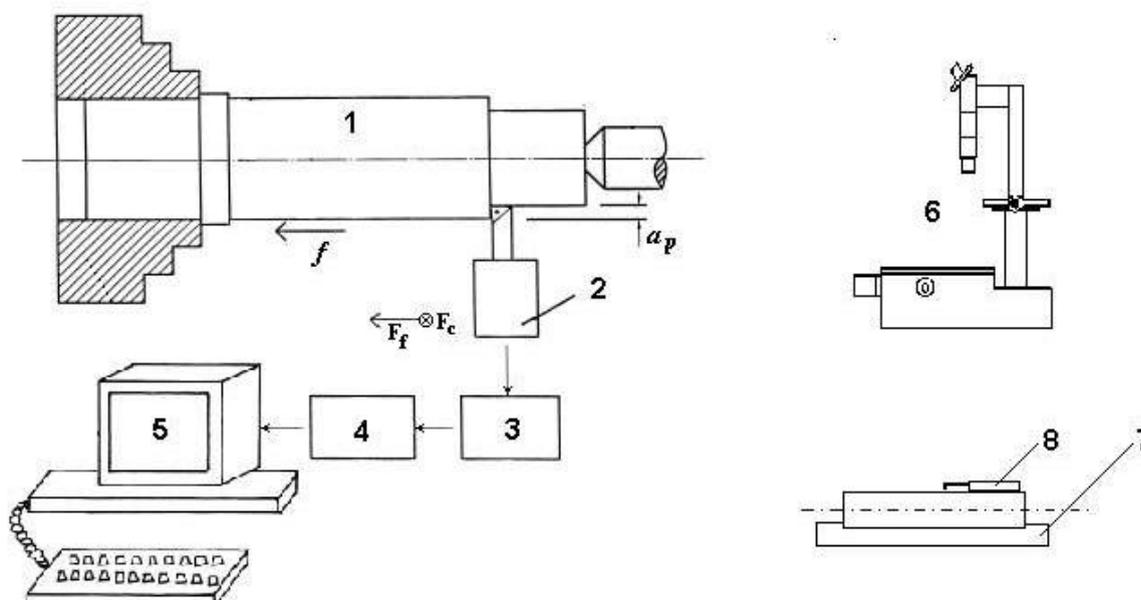


Figura 3.10 – Representação esquemática dos ensaios realizados.

4. RESULTADOS

Neste capítulo serão apresentados os resultados obtidos para desgaste de flanco máximo, rugosidade média da peça, força de corte e avanço para os aços ABNT 1040 e 1045. A apresentação destes resultados será feita através de gráficos, com os respectivos valores e seus desvios padrão apresentados em anexo.

4.1 Resultados dos ensaios em função do tempo de corte

4.1.1 Resultados para $V_{B\text{ Max}} \times t$

Os ensaios de taxa de desgaste de flanco foram realizados para os aços ABNT 1040 e ABNT 1045, em 3 velocidades de corte, sendo realizadas 3 repetições para cada condição. As figuras 4.1 a 4.3 mostram o desgaste de flanco máximo em função do tempo de corte para o aço ABNT 1040 às velocidades de corte de 425, 475 e 525 m/min, respectivamente.

A partir das relações entre desgaste de flanco e tempo de corte, obtém-se o fim da vida da ferramenta de corte, estipulado como sendo o momento no qual o desgaste de flanco máximo atinge o valor de 0,3 mm. A vida média da ferramenta para cada velocidade de corte, bem como o desvio padrão, é mostrada na tabela 4.1, onde V_c é a velocidade de corte, T é a vida da ferramenta de corte, e S é o desvio padrão encontrado para a vida da ferramenta.

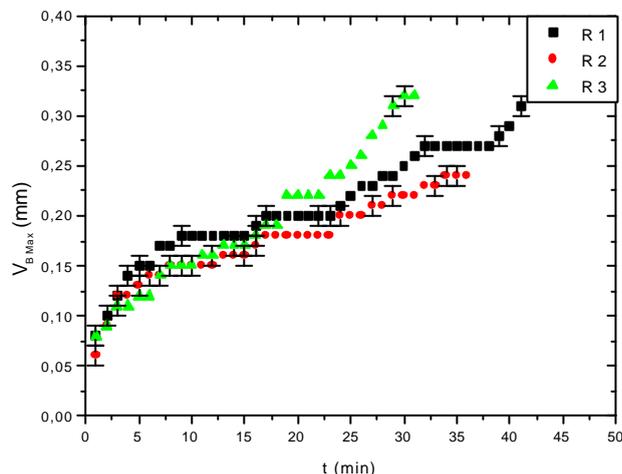


Figura 4.1 – $V_{B\text{ Max}}$ x tempo para o aço ABNT 1040 a 425 m/min.

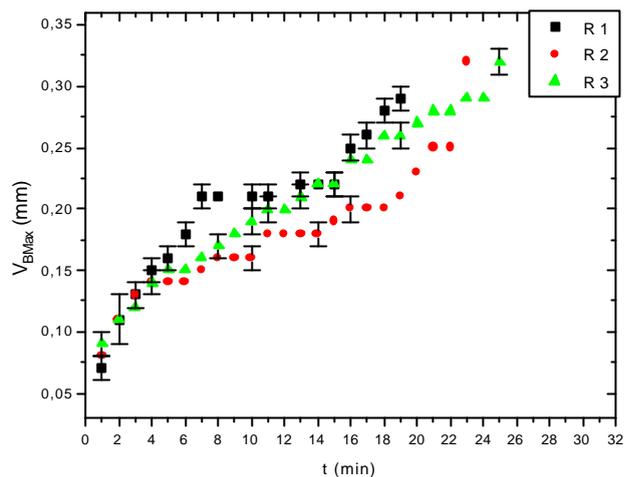


Figura 4.2 – $V_{B\ Max}$ x tempo para o aço ABNT 1040 a 475 m/min.

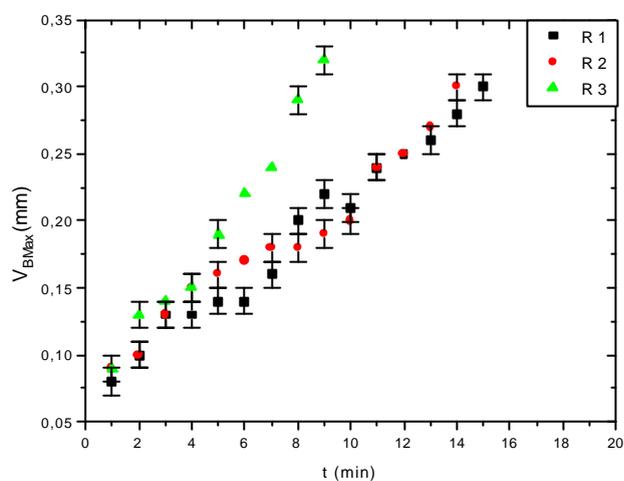


Figura 4.3 – $V_{B\ Max}$ x tempo para o aço ABNT 1040 a 525 m/min.

Tabela 4.1 – Vida das ferramentas de corte ($V_{B\ Max} = 0,3\text{ mm}$) em função da velocidade de corte usada para o aço ABNT 1040.

| V_c (m/min) | T (min) | s (min) |
|---------------|---------|---------|
| 425 | 40,89 | 9,90 |
| 475 | 24,37 | 4,12 |
| 525 | 13,12 | 3,82 |

A Tabela 4.2 mostra os coeficientes da equação de Taylor para o aço ABNT 1040, representada na Figura 4.4.

Tabela 4.2 – Coeficientes da equação de Taylor para o aço ABNT 1040.

| Coeficientes da equação de Taylor | |
|-----------------------------------|----------|
| K | 5,61E+15 |
| x | 5,37 |

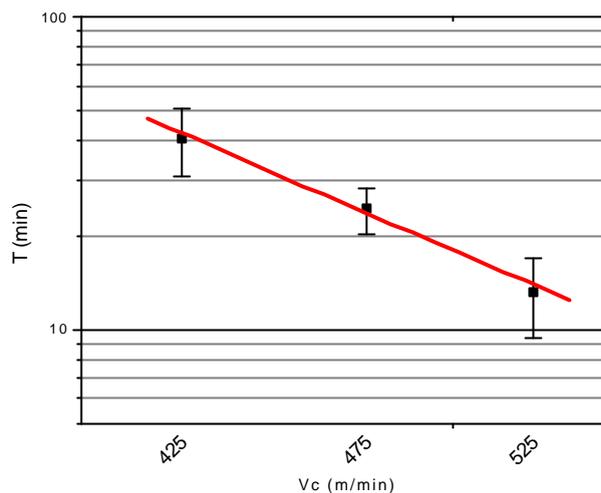


Figura 4.4 – Curva de Taylor para o aço ABNT 1040.

A relação $V_B \text{ Max}$ x tempo de corte para o aço ABNT 1045 é mostrada nas figuras 4.5 a 4.7, às velocidades de corte de 335, 445 e 535 m/min, respectivamente. A vida média da ferramenta encontrada para cada velocidade de corte, bem com o desvio padrão associado, é mostrada na tabela 4.5.

Os resultados de $V_B \text{ Max}$ em função do tempo de usinagem para o aço ABNT 1045 mostram menor variação entre resultados provenientes de ensaios realizados à mesma velocidade de corte do que se observou para o aço ABNT 1040, o que reflete nos menores valores de desvio padrão relativos à vida da ferramenta.

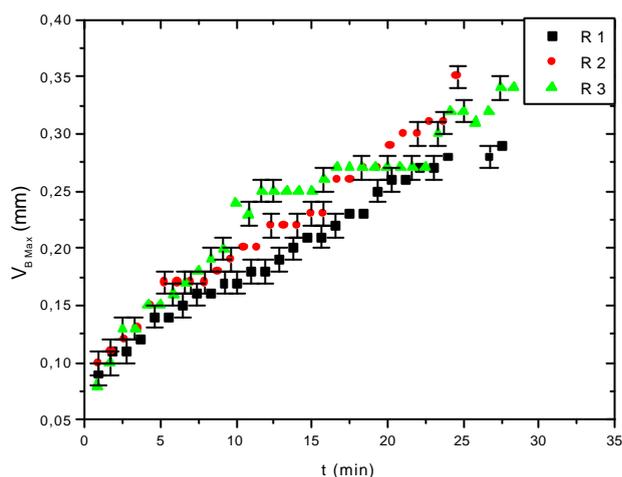


Figura 4.5 – $V_B \text{ Max}$ x tempo para o aço ABNT 1045 a 355 m/min.

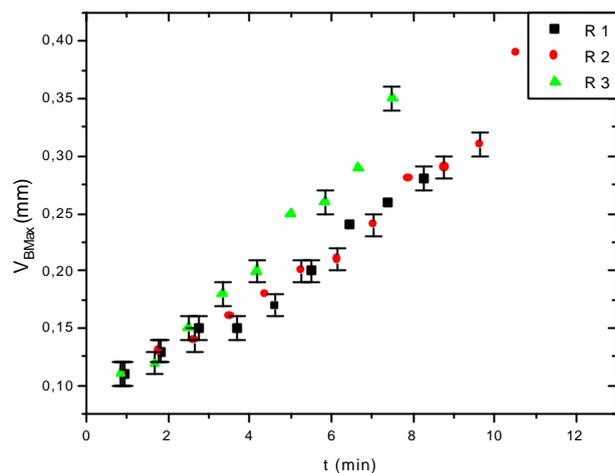


Figura 4.6 – $V_{B\text{Max}}$ x tempo para o aço ABNT 1045 a 445 m/min.

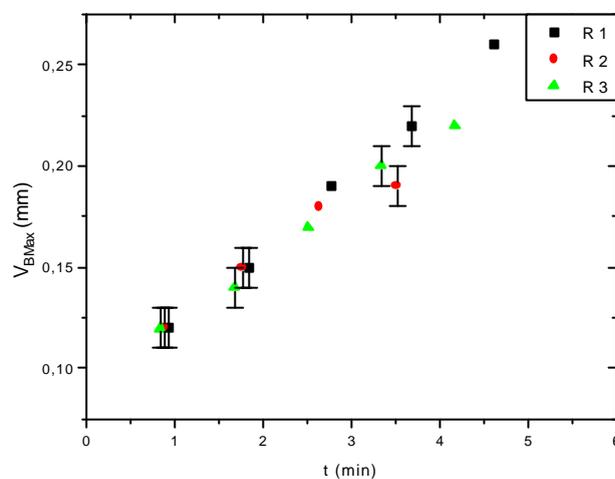


Figura 4.7 – $V_{B\text{Max}}$ x tempo para o aço ABNT 1045 a 535 m/min.

Tabela 4.3 – Vida das ferramentas de corte ($V_{B\text{Max}} = 0,3$ mm) de acordo com a velocidade de corte para o aço ABNT 1045.

| V_c (m/min) | T (min) | s (min) |
|---------------|---------|---------|
| 355 | 25 | 2,95 |
| 445 | 8,27 | 1,43 |
| 535 | 6,93 | 1,09 |

A curva correspondente à equação de Taylor para o aço ABNT 1045 está representada na Figura 4.8, com os respectivos coeficientes na Tabela 4.4.

Tabela 4.4 – Coeficientes da equação de Taylor para o aço ABNT 1045.

| Coeficientes da equação de Taylor | |
|-----------------------------------|----------|
| K | 6,57E+09 |
| X | 3,31 |

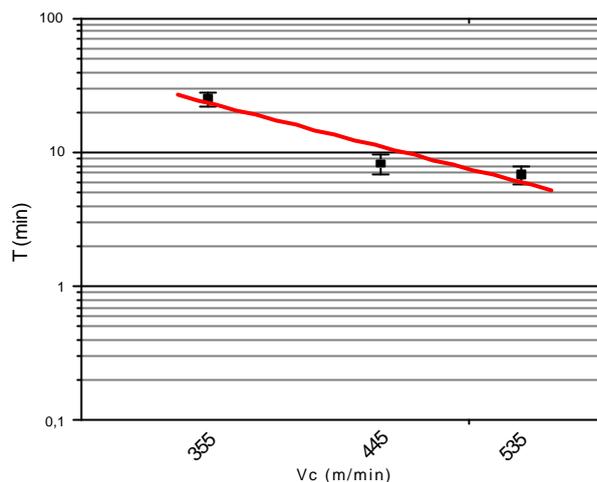


Figura 4.8 – Curva de Taylor para o aço ABNT 1045.

A análise de correlação feita para cada velocidade de corte para os dois aços estudados é mostrada na tabela 4.5.

Tabela 4.5 – Correlações entre $V_{B \text{ Max}}$ e tempo de corte para os aços estudados.

| Aço | ABNT 1040 | | | ABNT 1045 | | |
|---------------|-----------|------|------|-----------|------|------|
| V_c (m/min) | 425 | 475 | 525 | 355 | 445 | 535 |
| Correlação | 0,92 | 0,93 | 0,89 | 0,96 | 0,95 | 0,83 |

4.1.2 Resultados para Forças de usinagem em função do tempo de corte

Foram analisados neste trabalho os resultados de força de corte e força de avanço. Analisou-se também a relação entre estas forças (F_f/F_c), usada por diversos autores [Yellowley e Lai, 1993; Choundhury e Kishore, 1999; Lee e Lee, 1999] em estudos que relacionam as forças de usinagem com o desgaste de flanco.

As figuras 4.9, 4.10 e 4.11 mostram a força de corte em função do tempo de usinagem, para o aço ABNT 1040 às velocidades de corte de 425, 475 e 525 m/min, respectivamente.

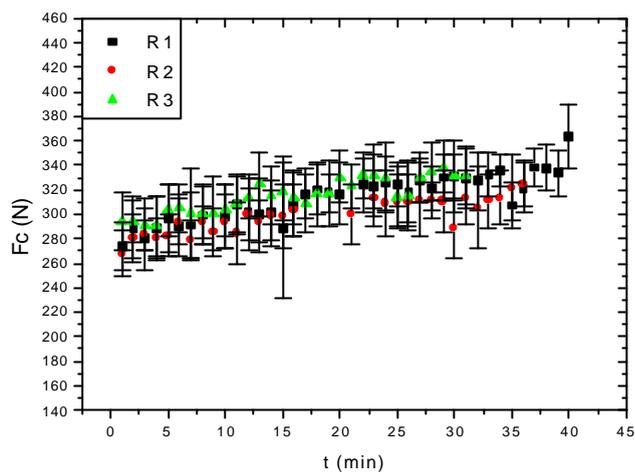


Figura 4.9 – F_c x tempo para o aço ABNT 1040 usinado a 425 m/min.

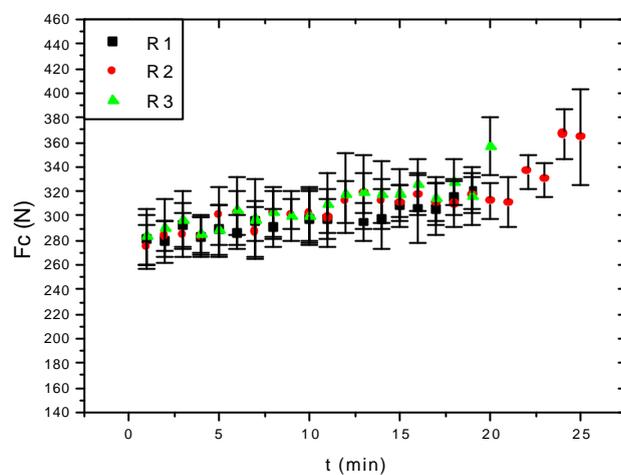


Figura 4.10 – F_c x tempo para o aço ABNT 1040 usinado a 475 m/min.

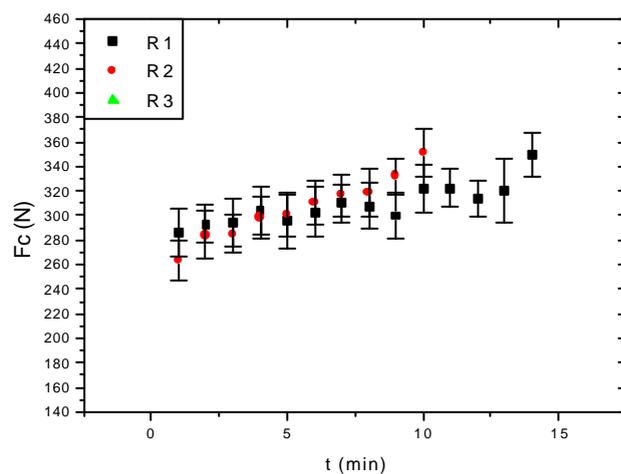


Figura 4.11 – F_c x tempo para o aço ABNT 1040 usinado a 525 m/min.

A variação da força de avanço de acordo com o tempo de corte para as velocidades de corte de 425, 475 e 525 m/min é mostrada nas figuras 4.12 a 4.14.

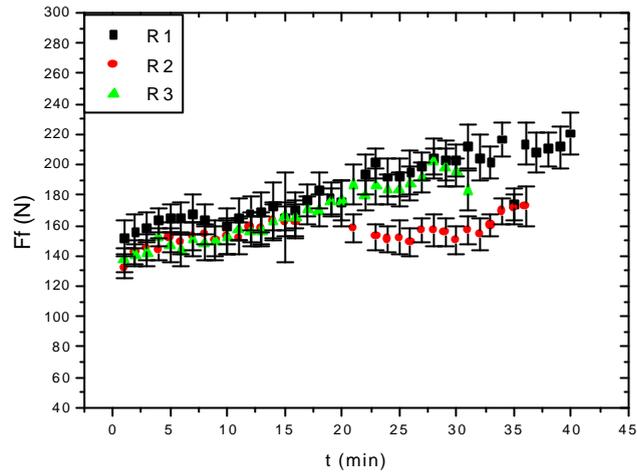


Figura 4.12 – F_f x tempo para o aço ABNT 1040 usinado a 425 m/min.

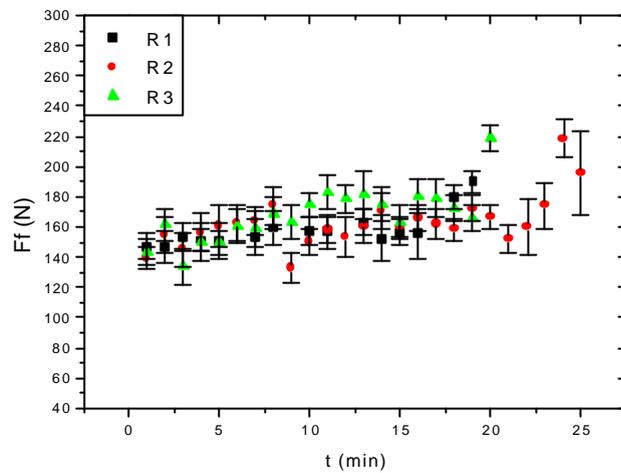


Figura 4.13 – F_f x tempo para o aço ABNT 1040 usinado a 475 m/min.

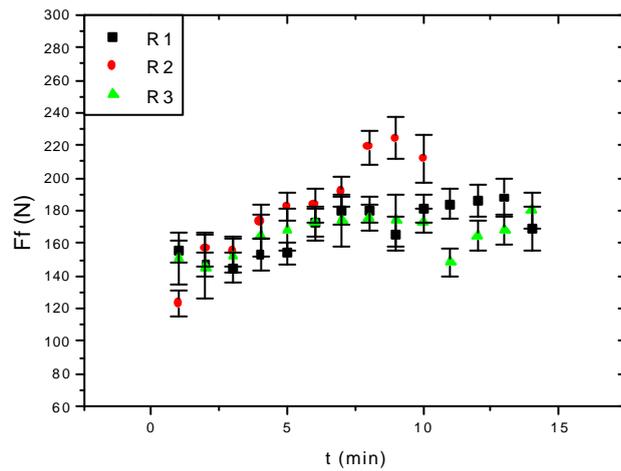


Figura 4.14 – F_f x tempo para o aço ABNT 1040 usinado a 525 m/min.

Nas figuras 4.15, 4.16 e 4.17 estão representadas as relações entre a razão F_f/F_c e o tempo de usinagem.

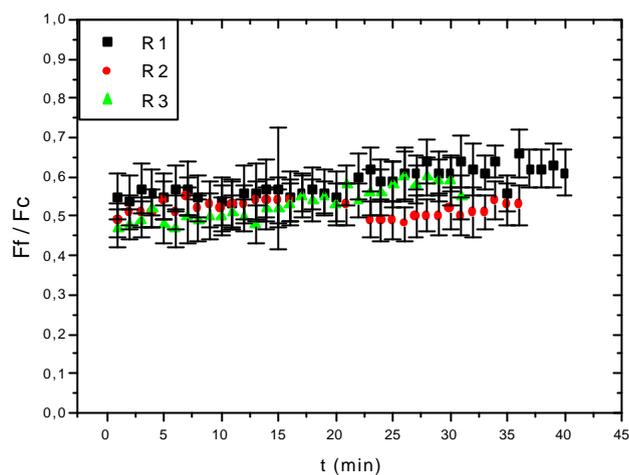


Figura 4.15 – F_f/F_c x tempo para o aço ABNT 1040 usinado a 425 m/min.

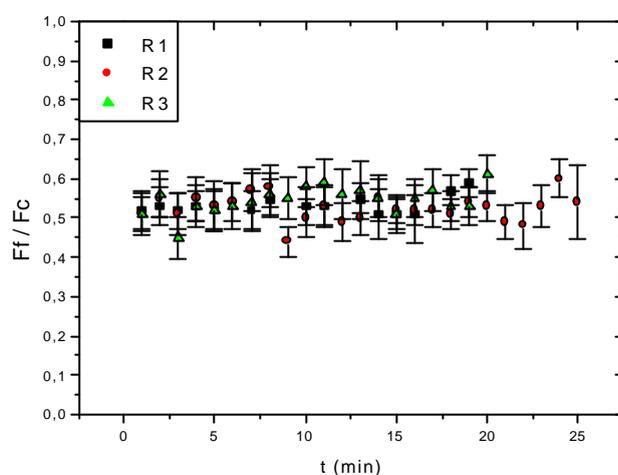


Figura 4.16 – F_f/F_c x tempo para o aço ABNT 1040 usinado a 475 m/min.

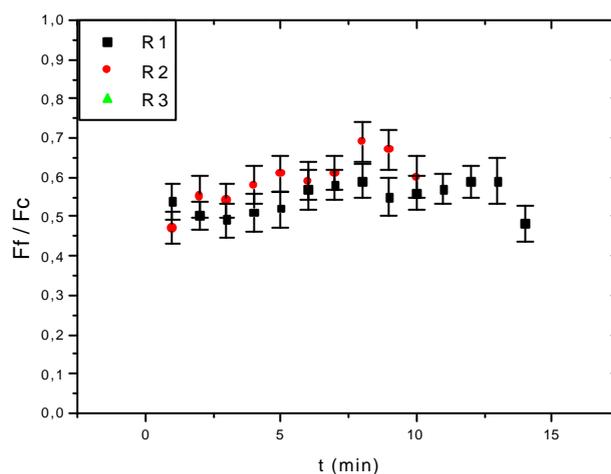


Figura 4.17 – F_f/F_c x tempo para o aço ABNT 1040 usinado a 525 m/min.

Os coeficientes de correlação referentes às figuras 4.9 a 4.17 são mostrados na Tabela 4.6. Dentre os resultados relativos às forças de usinagem, as correlações mais fortes com o tempo de corte são observadas para a força de corte, seguida pela força de avanço e, por fim, para a razão entre as forças de avanço e de corte. Não se observa relação clara entre os coeficientes de

correlação mostrados na Tabela 4.6 e a velocidade de corte, de modo que, esta, aparentemente, não influi na dispersão dos dados.

Tabela 4.6 – Correlação entre valores relativos às forças de usinagem e tempo de corte para o aço ABNT 1040.

| V_c (m/min) | 425 | 475 | 525 |
|----------------------|------|------|------|
| $F_c \times t$ | 0,80 | 0,86 | 0,84 |
| $F_f \times t$ | 0,73 | 0,63 | 0,56 |
| $F_f / F_c \times t$ | 0,53 | 0,63 | 0,40 |

As Figuras 4.18, 4.19 e 4.20 mostram a força de corte em função do tempo de usinagem, para o aço ABNT 1045 às velocidades de corte de 355, 445 e 535 m/min, respectivamente.

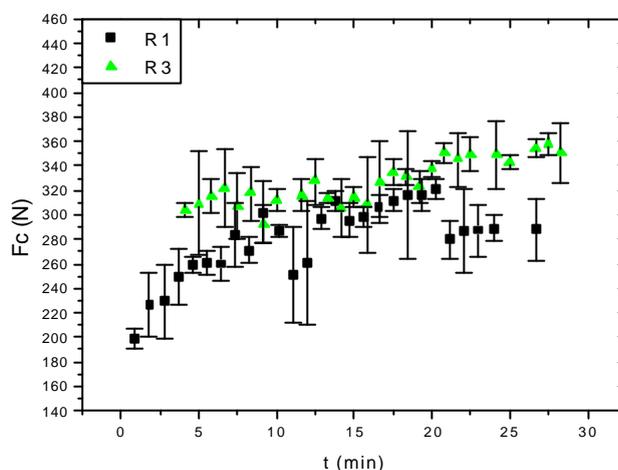


Figura 4.18 – F_c x tempo para o aço ABNT 1045 usinado a 355 m/min.

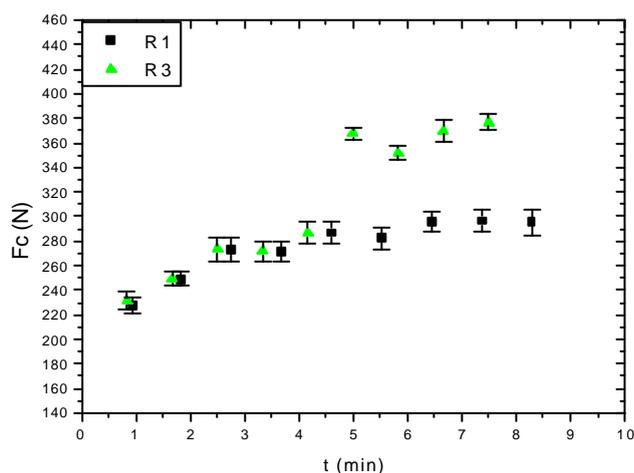


Figura 4.19 – F_c x tempo para o aço ABNT 1045 usinado a 445 m/min.

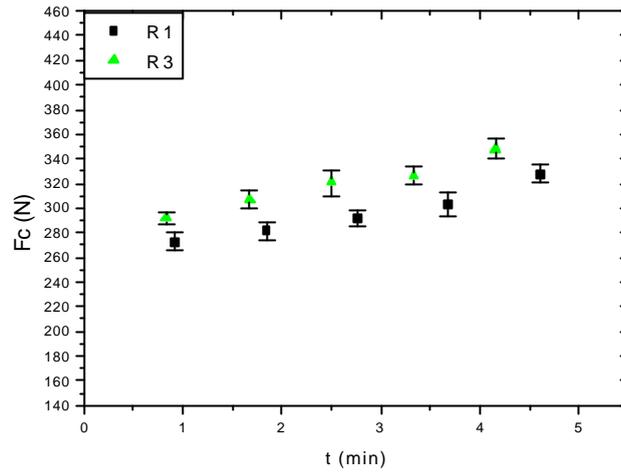


Figura 4.20 – F_c x tempo para o aço ABNT 1045 usinado a 535 m/min.

As Figuras 4.21, 4.22 e 4.23 mostram a variação da força de avanço em função do tempo de usinagem para o aço ABNT 1045 para as velocidades de corte de 355, 445 e 535m/min, respectivamente.

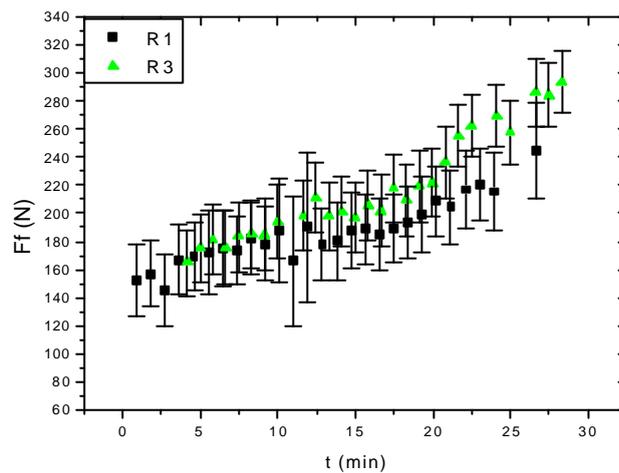


Figura 4.21 – F_f x tempo para o aço ABNT 1045 usinado a 355 m/min.

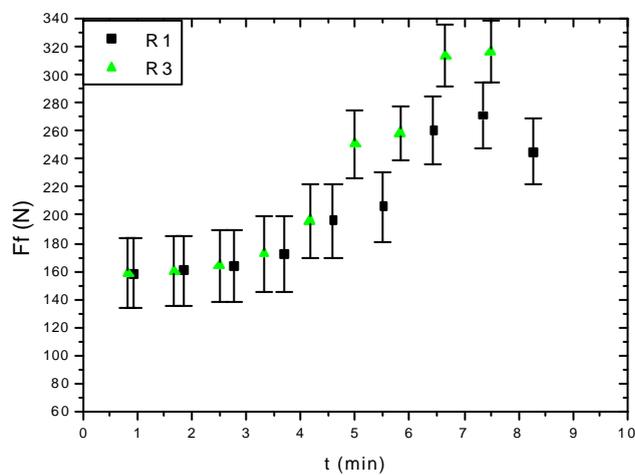


Figura 4.22 – F_f x tempo para o aço ABNT 1045 usinado a 445 m/min.

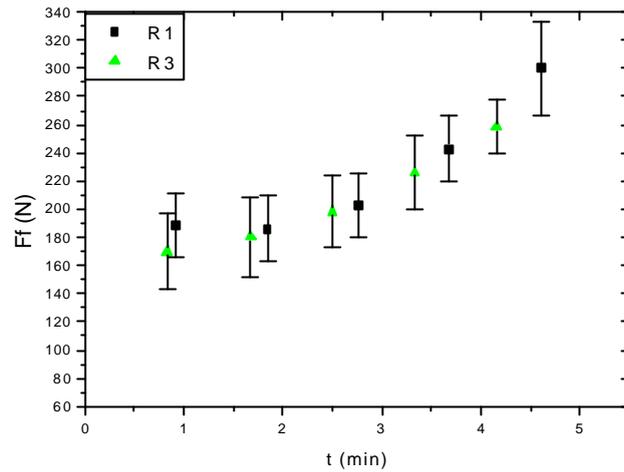


Figura 4.23 – F_f x tempo para o aço ABNT 1045 usinado a 535 m/min.

As Figuras 4.24, 4.25, e 4.26 mostram a variação da relação entre força de avanço e força de corte em função do tempo de usinagem para o aço ABNT 1045.

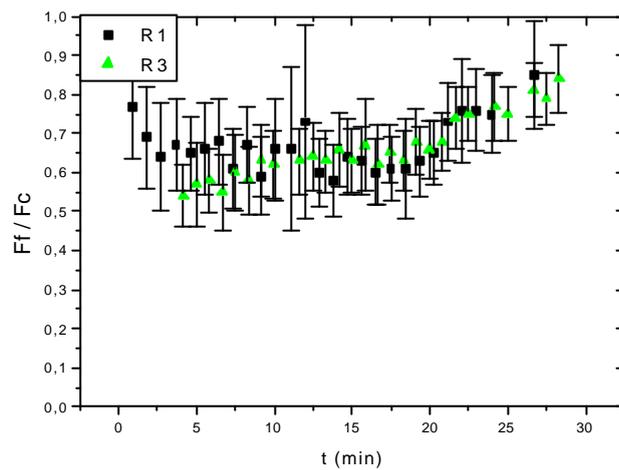


Figura 4.24 – F_f/F_c x tempo para o aço ABNT 1045 usinado a 355 m/min.

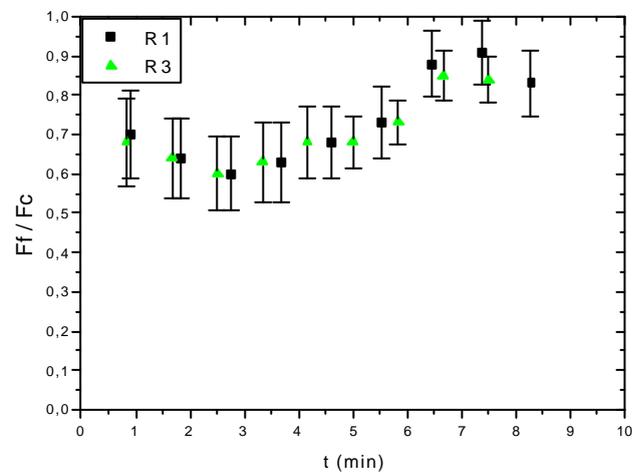


Figura 4.25 – F_f/F_c x tempo para o aço ABNT 1045 usinado a 445 m/min.

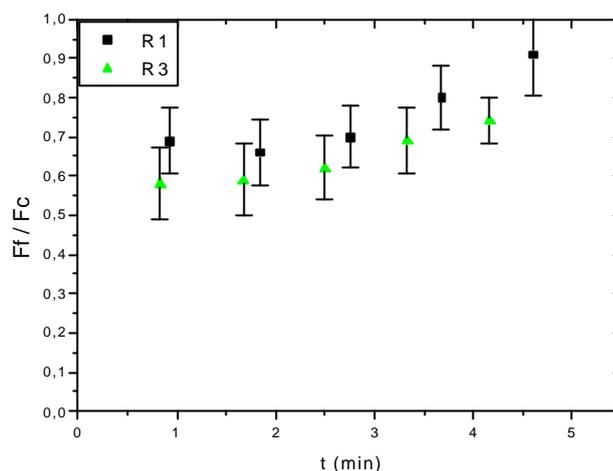


Figura 4.26 – F_f/F_c x tempo para o aço ABNT 1045 usinado a 535 m/min.

Os coeficientes de correlação referentes às Figuras 4.18 a 4.26 são apresentados na Tabela 4.7. As correlações mais fortes, para este aço, foram observadas para a relação entre a força de avanço e o tempo e usinagem. Da mesma forma que para o aço ABNT 1040, não se observa relação clara entre os coeficientes de correlação mostrados na Tabela 4.7 e a velocidade de corte

Tabela 4.7 – Correlação entre valores relativos às forças de usinagem e tempo de corte para o aço ABNT 1045.

| V_c (m/min) | 335 | 445 | 535 |
|----------------------|------|------|------|
| $F_c \times t$ | 0,67 | 0,79 | 0,79 |
| $F_f \times t$ | 0,88 | 0,88 | 0,93 |
| $F_f / F_c \times t$ | 0,62 | 0,83 | 0,77 |

4.1.3 Resultados de rugosidade em função do tempo de usinagem

Os resultados de rugosidade em função do tempo de usinagem para o aço ABNT 1040 são mostrados nas figuras 4.27, 4.28 e 4.29.

A análise das figuras 4.27, 4.28 e 4.29, mostra que a rugosidade aumenta com o tempo seguindo uma tendência definida, e que a dispersão dos dados aumenta significativamente com a velocidade de corte.

As figuras 4.28 e 4.29 apresentam maior dispersão dos resultados, que se devem principalmente a tendências diferentes seguidas em repetições diferentes.

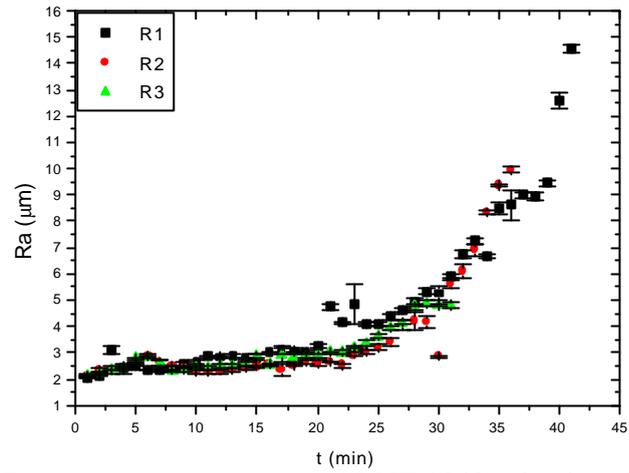


Figura 4.27 – Ra x tempo para o aço ABNT 1040 usinado a 425 m/min.

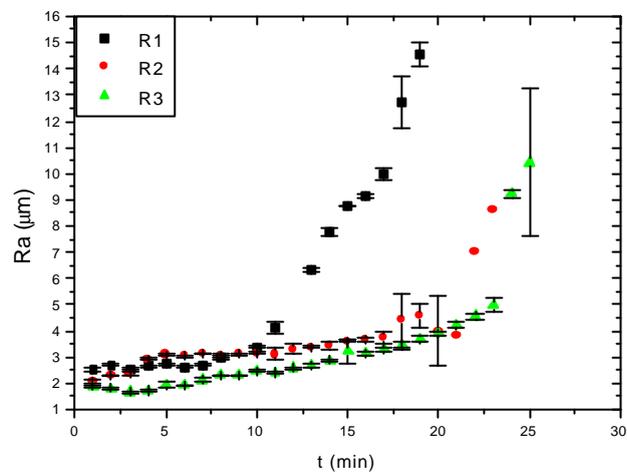


Figura 4.28 – Ra x tempo para o aço ABNT 1040 usinado a 475 m/min.

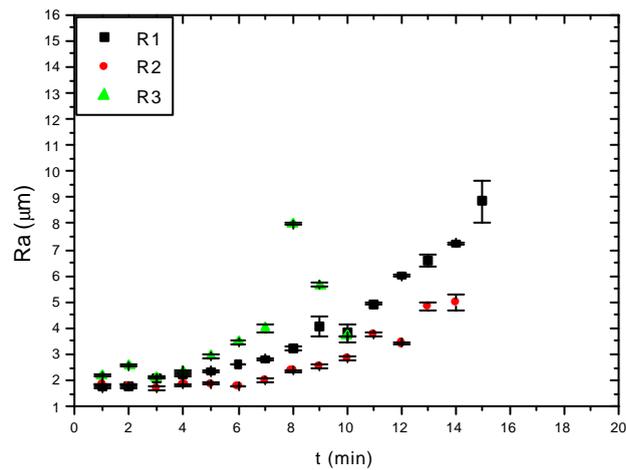


Figura 4.29 – Ra x tempo para o aço ABNT 1040 usinado a 525 m/min.

As figuras 4.30, 4.31 e 4.32 mostram os resultados de rugosidade em função do tempo de usinagem para o aço ABNT 1045.

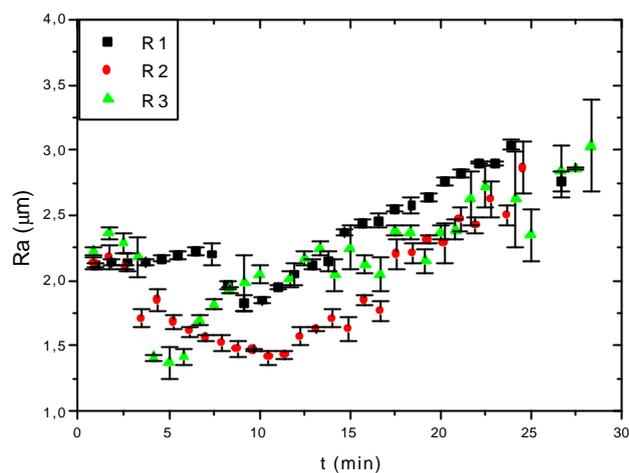


Figura 4.30 – Ra x tempo para o aço ABNT 1045 usinado a 355 m/min.

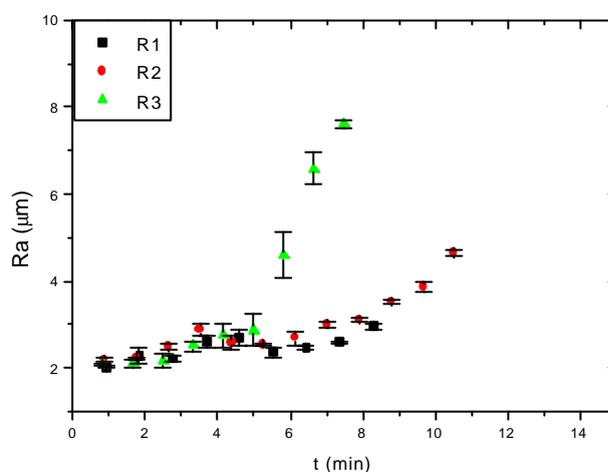


Figura 4.31 – Ra x tempo para o aço ABNT 1045 usinado a 445 m/min.

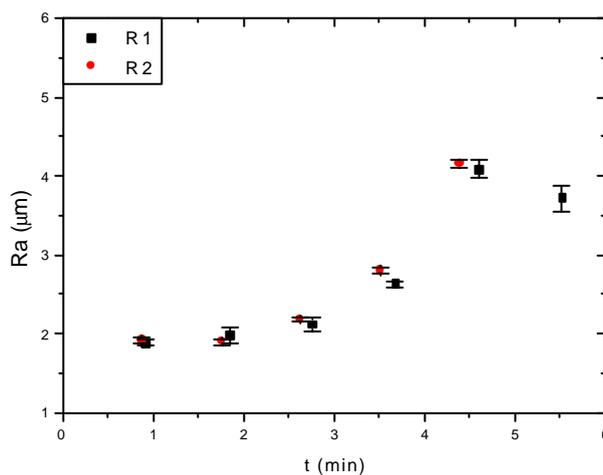


Figura 4.32 – Ra x tempo para o aço ABNT 1045 usinado a 535 m/min.

A dependência da rugosidade em relação ao tempo de corte para o aço ABNT 1045 não é tão clara quanto a observada para o aço ABNT 1040. Observou-se na Figura 4.30 que a rugosidade diminuiu nos primeiros minutos de corte para, a seguir, retomar o crescimento. Nas

figuras 4.31 e 4.32 o comportamento da rugosidade ao longo do tempo de usinagem é semelhante ao observado no aço ABNT 1040.

4.2 Resultados em função do desgaste de flanco máximo

4.2.1 Resultados para Forças de usinagem em função do desgaste de flanco máximo

Nas figuras 4.33 a 4.35 são apresentados os resultados das medidas de força de corte em função do desgaste de flanco máximo para o aço ABNT 1040 usinado às velocidades de corte de 425, 475 e 525 m/min.

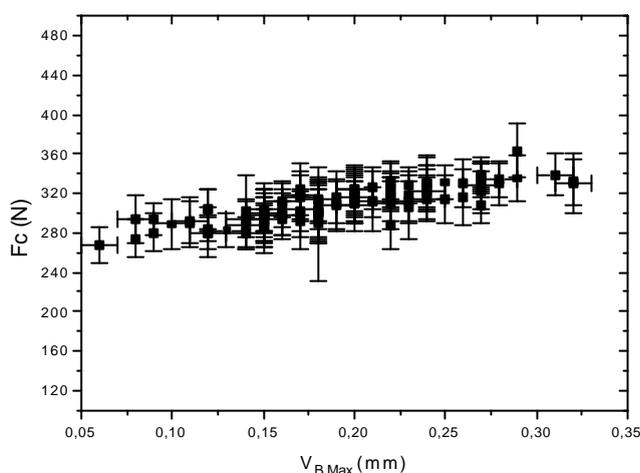


Figura 4.33 – $F_c \times V_{B \text{ Max}}$ para o aço ABNT 1040 usinado a 425 m/min.

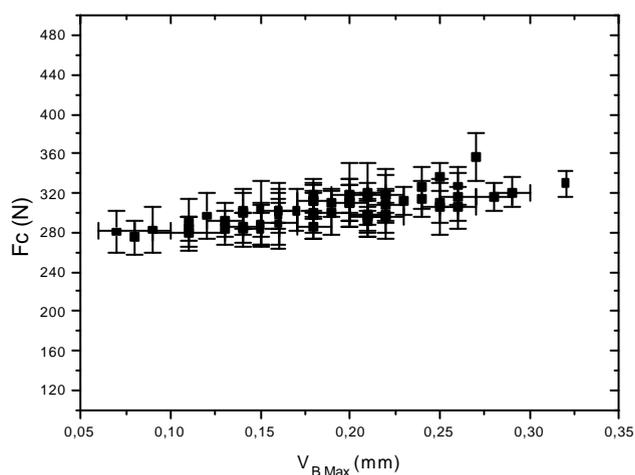


Figura 4.34 – $F_c \times V_{B \text{ Max}}$ para o aço ABNT 1040 usinado a 475 m/min.

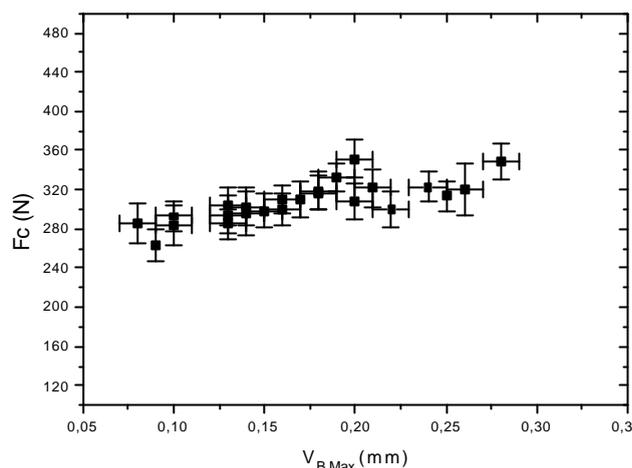


Figura 4.35 – $F_c \times V_{B \text{ Max}}$ para o aço ABNT 1040 usinado a 525 m/min.

Observa-se, nos resultados de força de corte em função do desgaste de flanco, que o crescimento da força de corte em relação ao desgaste de flanco máximo se dá de forma aproximadamente linear, com valores relativamente altos de correlação obtidos destas relações.

A Tabela 4.8 mostra os resultados da análise de correlação entre a força de corte e o desgaste de flanco máximo para o aço ABNT 1040.

Tabela 4.8 – Correlação entre F_c e $V_{B \text{ Max}}$ para o aço ABNT 1040.

| | | | |
|---------------|------|------|------|
| V_c (m/min) | 425 | 475 | 525 |
| Correlação | 0,85 | 0,79 | 0,78 |

As figuras 4.36, 4.37 e 4.38 mostram a relação entre a força de avanço e o desgaste de flanco máximo para o aço ABNT 1040.

Os resultados de $F_f \times V_{B \text{ Max}}$ mostram um grau de dependência semelhante ao observado nas figuras 4.33 a 4.35 para a força de corte. Os coeficientes de correlação estão na Tabela 4.9.

Em comparação com a força de corte, a força de avanço possui uma correlação mais fraca com o desgaste de flanco máximo na usinagem do aço ABNT 1040.

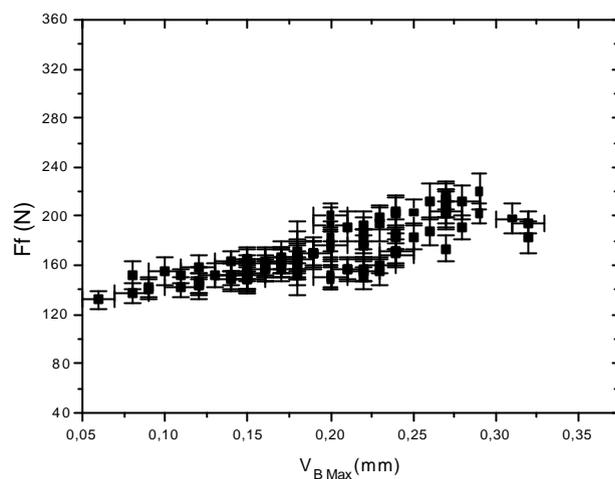


Figura 4.36 – $F_f \times V_{B \text{ Max}}$ para o aço ABNT 1040 usinado a 425 m/min.

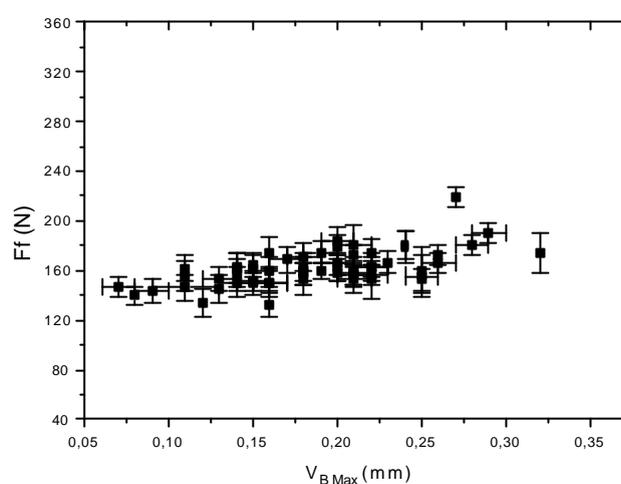


Figura 4.37 – $F_f \times V_{B \text{ Max}}$ para o aço ABNT 1040 usinado a 475 m/min.

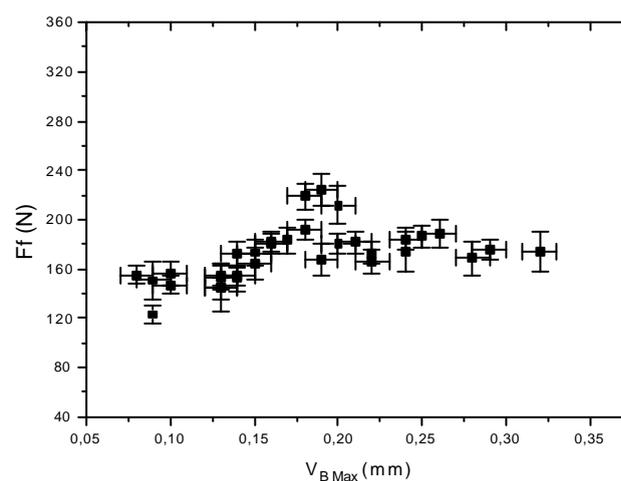


Figura 4.38 – $F_f \times V_{B \text{ Max}}$ para o aço ABNT 1040 usinado a 525 m/min.

Tabela 4.9 – Correlação entre F_f e $V_{B \text{ Max}}$ para o aço ABNT 1040.

| V_c (m/min) | 425 | 475 | 525 |
|---------------|------|------|------|
| Correlação | 0,82 | 0,68 | 0,60 |

A relação entre o desgaste de flanco máximo e a razão entre as forças de avanço e de corte é mostrada nas figuras 4.39, 4.40 e 4.41.

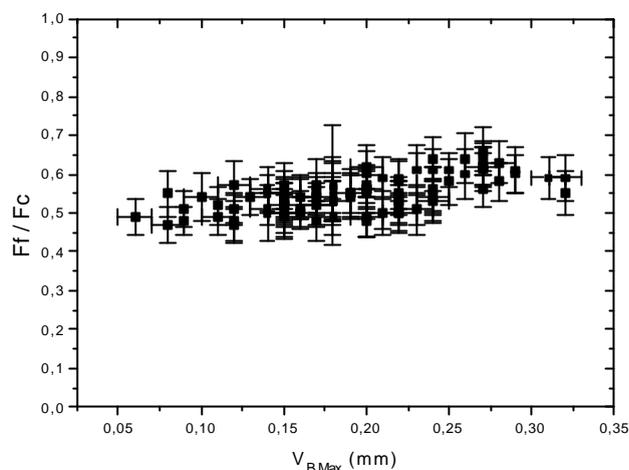


Figura 4.39 – $F_f/F_c \times V_{B\text{Max}}$ para o aço ABNT 1040 usinado a 425 m/min.

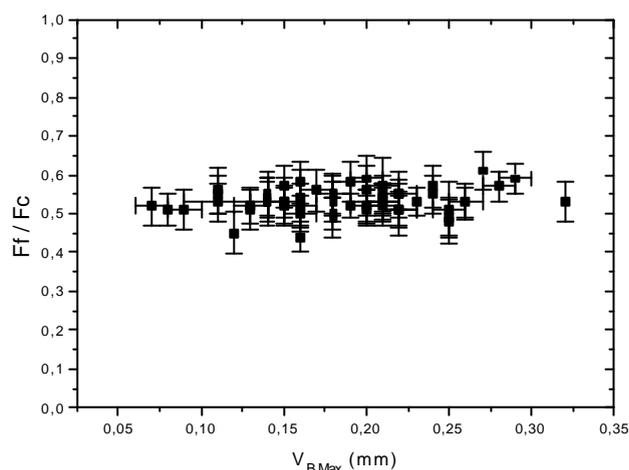


Figura 4.40 – $F_f/F_c \times V_{B\text{Max}}$ para o aço ABNT 1040 usinado a 475 m/min.

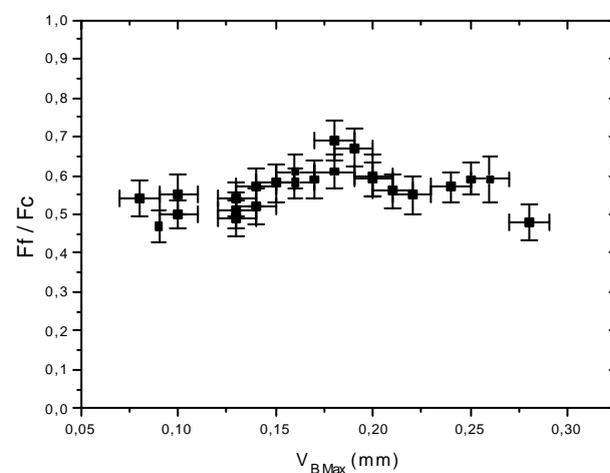


Figura 4.41 – $F_f/F_c \times V_{B\text{Max}}$ para o aço ABNT 1040 usinado a 525 m/min.

A análise da correlação entre F_f/F_c e $V_{B\ Max}$ (Tabela 4.10) revela que, apesar de apresentar um comportamento semelhante ao das relações das forças de corte e de avanço com o desgaste de flanco máximo, a razão entre as forças de corte e de avanço possui a menor correlação com o desgaste de flanco máximo dentre os parâmetros relacionados a forças de usinagem.

Tabela 4.10 – Correlação entre F_f/F_c e $V_{B\ Max}$ para o aço ABNT 1040.

| V_c (m/min) | 425 | 475 | 525 |
|---------------|------|------|------|
| Correlação | 0,86 | 0,31 | 0,37 |

As figuras 4.42, 4.43 e 4.44 mostram a relação entre força de corte e desgaste de flanco máximo para o aço ABNT 1045.

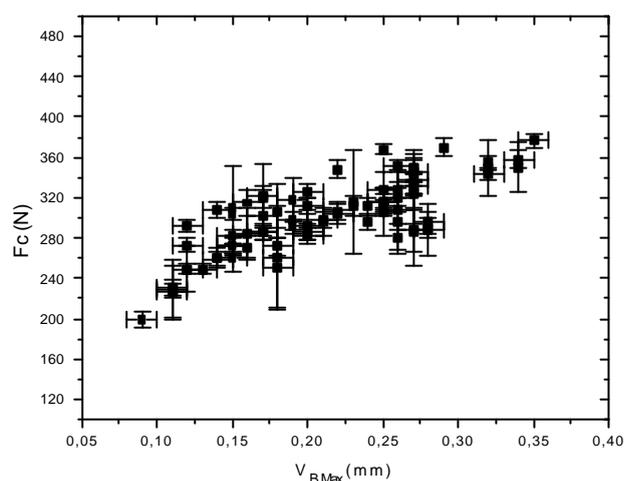


Figura 4.42 – F_c x $V_{B\ Max}$ para o aço ABNT 1045 usinado a 355 m/min.

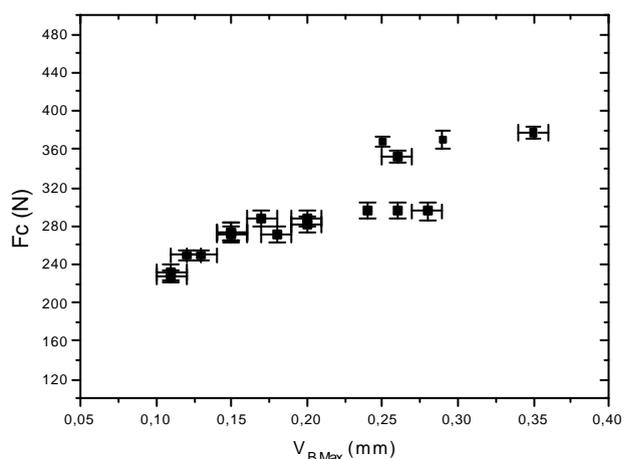


Figura 4.43 – F_c x $V_{B\ Max}$ para o aço ABNT 1045 usinado a 445 m/min.

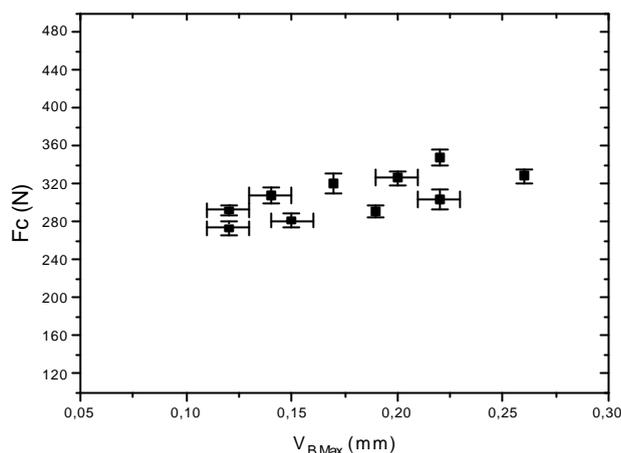


Figura 4.44 – $F_c \times V_{B \text{ Max}}$ para o aço ABNT 1045 usinado a 535 m/min.

A análise de correlação entre os resultados de força de corte em função do desgaste de flanco máximo para o aço ABNT 1045 (Tabela 4.11) mostra coeficientes de correlação de ordem semelhante aos observados para o aço ABNT 1040.

Tabela 4.11 – Correlação entre F_c e $V_{B \text{ Max}}$ para o aço ABNT 1045.

| V_c (m/min) | 425 | 475 | 525 |
|---------------|------|------|------|
| Correlação | 0,79 | 0,91 | 0,73 |

As figuras 4.45, 4.46 e 4.47 mostram a relação entre a força de avanço e o desgaste de flanco máximo para o aço ABNT 1045.

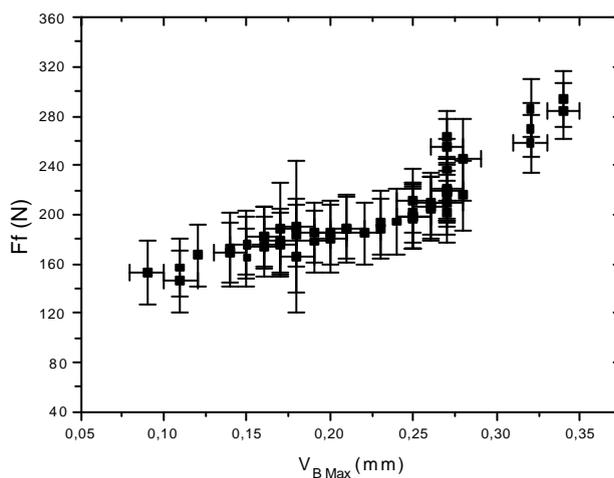


Figura 4.45 – $F_f \times V_{B \text{ Max}}$ para o aço ABNT 1045 usinado a 355 m/min.

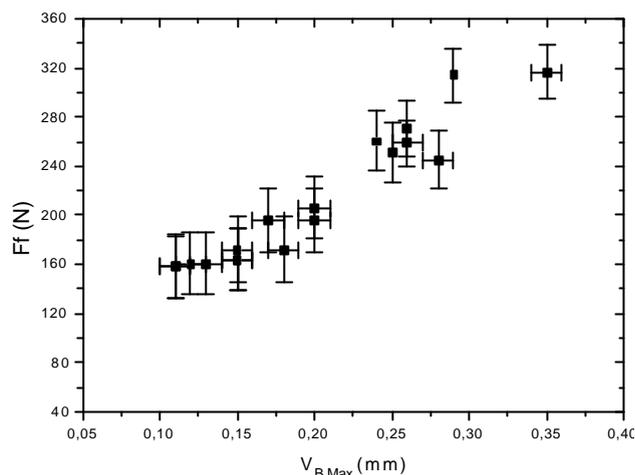


Figura 4.46 – $F_f \times V_{B\ Max}$ para o aço ABNT 1045 usinado a 445 m/min.

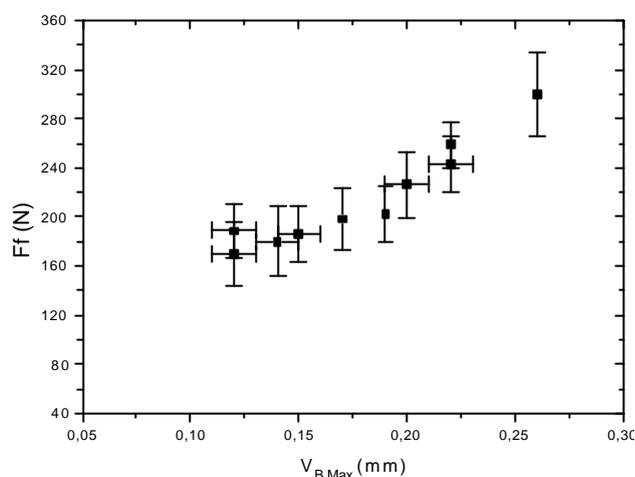


Figura 4.47 – $F_f \times V_{B\ Max}$ para o aço ABNT 1045 usinado a 535 m/min.

A correlação entre os resultados é apresentada na Tabela 4.12. Ao contrário do aço ABNT 1040, observa-se que para o aço ABNT 1045 a correlação entre o desgaste de flanco máximo e a força de avanço é mais forte do que a observada para a força de corte.

Tabela 4.12 – Correlação entre F_f e $V_{B\ Max}$ para o aço ABNT 1045.

| V_c (m/min) | 425 | 475 | 525 |
|---------------|------|------|------|
| Correlação | 0,90 | 0,96 | 0,93 |

Os gráficos relativos à relação entre F_f/F_c e desgaste de flanco máximo para o aço ABNT 1045 são apresentados nas figuras 4.48, 4.49 e 4.50.

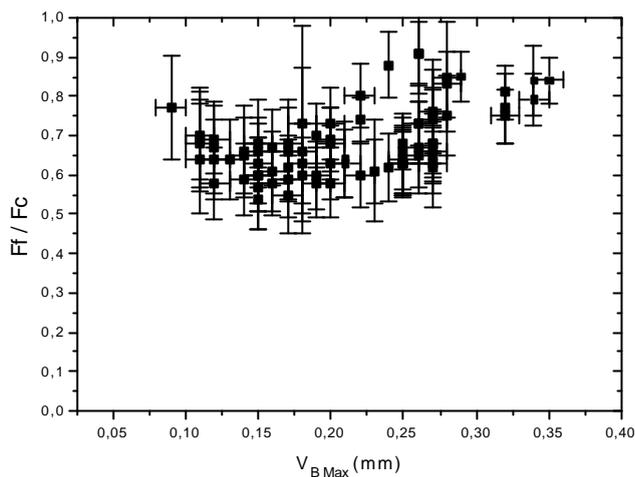


Figura 4.48 – F_f/F_c x $V_{B Max}$ para o aço ABNT 1045 usado a 355 m/min.

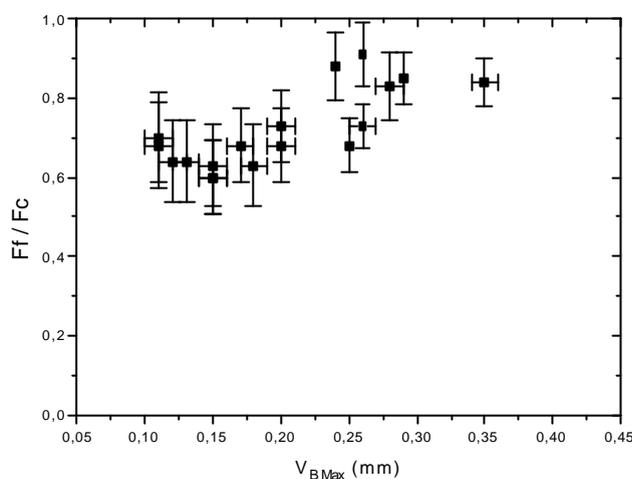


Figura 4.49 – F_f/F_c x $V_{B Max}$ para o aço ABNT 1045 usado a 445 m/min.

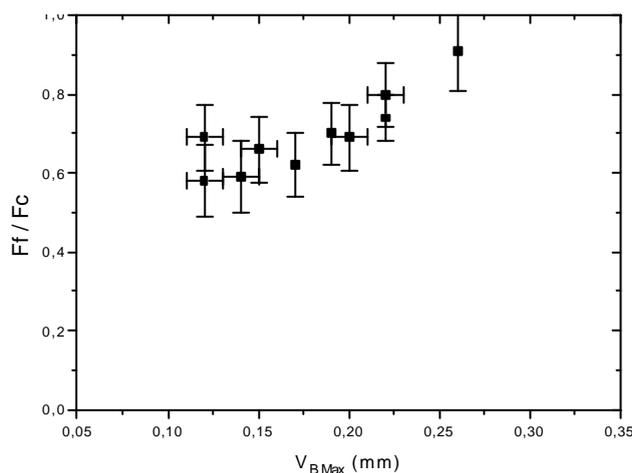


Figura 4.50 – F_f/F_c x $V_{B Max}$ para o aço ABNT 1045 usado a 535 m/min.

A análise da correlação entre F_f/F_c e $V_{B Max}$ (Tabela 4.13) revela que, do mesmo modo que para o aço ABNT 1040, a razão entre as forças de corte e de avanço possui a menor correlação com o desgaste de flanco máximo dos parâmetros relacionados a forças de usinagem.

Apenas à velocidade de corte de 535 m/min esta variável mostrou uma correlação com o desgaste de flanco máximo superior à força de corte.

Tabela 4.13 – Correlação entre F_f/F_c e $V_{B\ Max}$ para o aço ABNT 1045.

| V_c (m/min) | 425 | 475 | 525 |
|---------------|------|------|------|
| Correlação | 0,51 | 0,76 | 0,83 |

4.2.2 Resultados para rugosidade média em função do desgaste de flanco máximo

A relação entre a rugosidade média Ra e o desgaste de flanco máximo para o aço ABNT 1040 é mostrada nas figuras 4.51, 4.52 e 4.53.

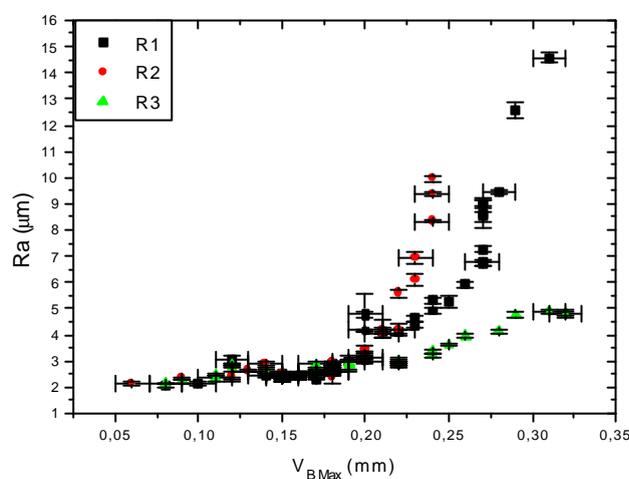


Figura 4.51 – Ra x $V_{B\ Max}$ para o aço ABNT 1040 usinado a 425 m/min.

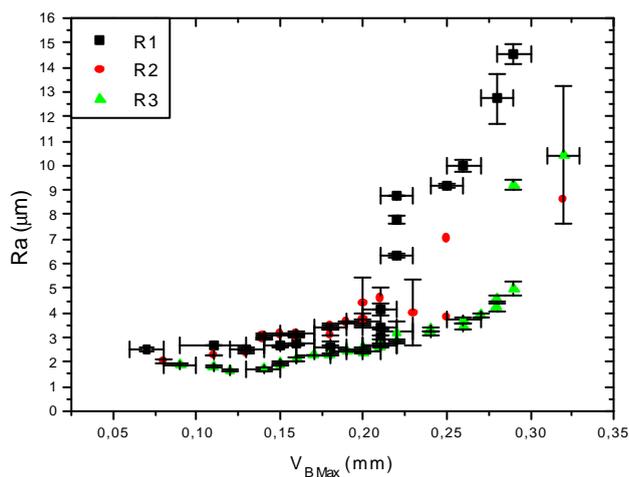


Figura 4.52 – Ra x $V_{B\ Max}$ para o aço ABNT 1040 usinado a 475 m/min.

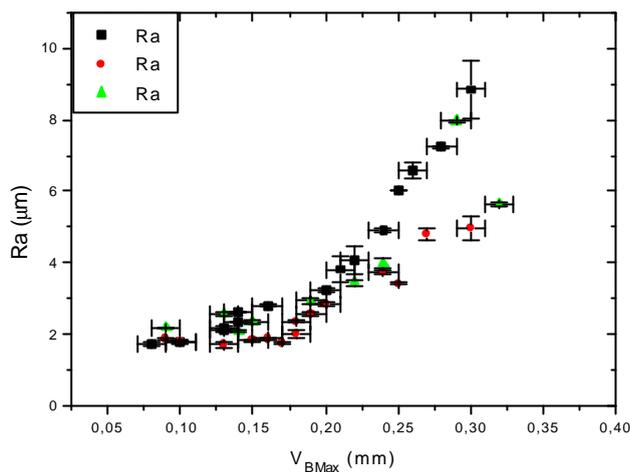


Figura 4.53 – Ra x $V_{B \text{ Max}}$ para o aço ABNT 1040 usinado a 525 m/min.

Os resultados de $V_{B \text{ Max}}$ x Ra para o aço ABNT 1045 são mostrados nas figuras 4.54, 4.55 e 4.56.

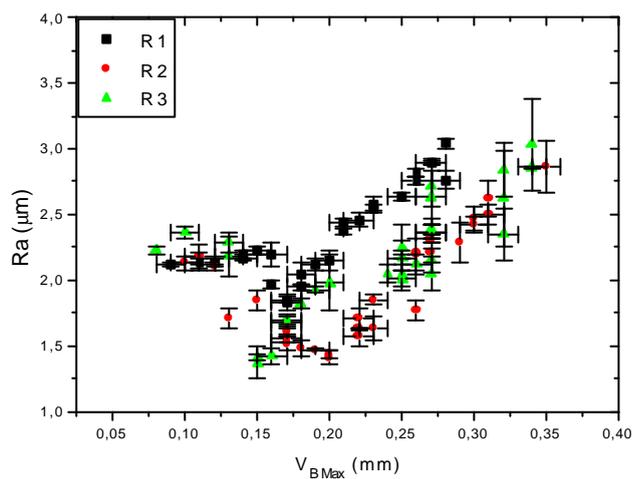


Figura 4.54 – Ra x $V_{B \text{ Max}}$ para o aço ABNT 1045 usinado a 355 m/min.

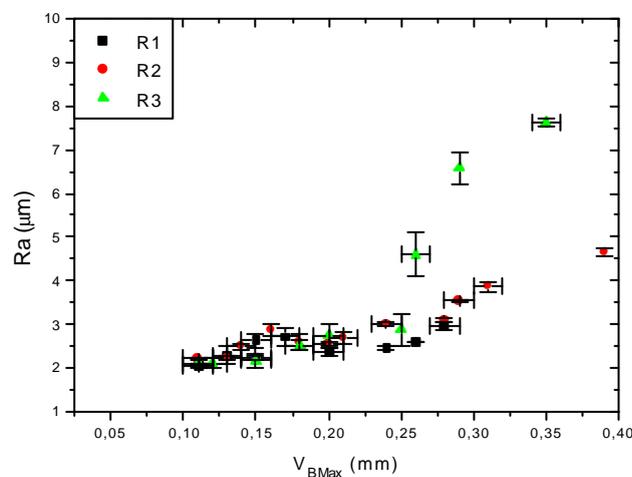


Figura 4.55 – Ra x $V_{B \text{ Max}}$ para o aço ABNT 1045 usinado a 445 m/min.

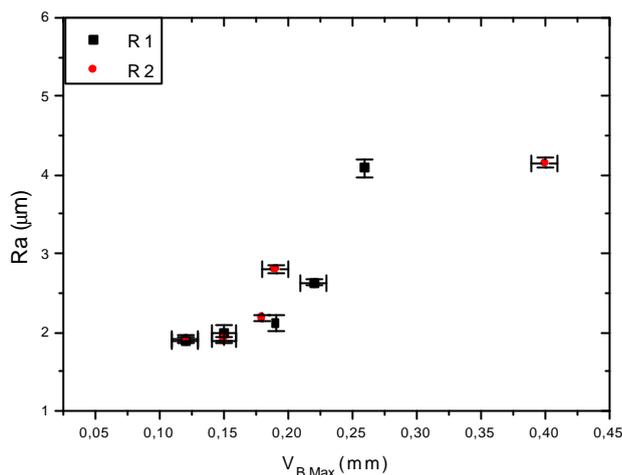


Figura 4.56 – Ra x $V_{B Max}$ para o aço ABNT 1045 usinado a 535 m/min.

A usinagem do aço ABNT 1045 a 355 m/min (Figura 4.54) mostrou uma relação da rugosidade média com o desgaste máximo de flanco diferente da observada nas demais velocidades de corte. Nesta velocidade de corte, Ra inicia próxima de $2\mu m$ diminuindo com a progressão de $V_{B Max}$ a valores próximos a $1,3\mu m$ e retomando, em seguida, o crescimento.

4.3 Resultados relativos à rugosidade

As figuras 4.57 e 4.58 mostram os valores de rugosidade média encontrados para os aços ABNT 1040 e 1045, respectivamente. Em ambas as figuras os resultados são apresentados através de gráficos tipo “box”, que engloba 50% dos resultados, excluindo do quadrado principal os 25% de dados de valor inferior e superior. As barras de erro englobam 80% dos dados, excluindo os 10% inferior e superior. Desse modo, tem-se uma visão da faixa de variação da rugosidade média durante a vida útil da ferramenta. Não se observa variação significativa dos valores de rugosidade média com a velocidade de corte, exceto para o aço ABNT 1045 usinado a 355 m/min, onde ocorre o fenômeno da queda da rugosidade no início do ensaio.

Em todas as velocidades de corte os valores de rugosidade média obtidos na usinagem do aço ABNT 1045 são menores que os obtidos na usinagem do aço ABNT 1040.

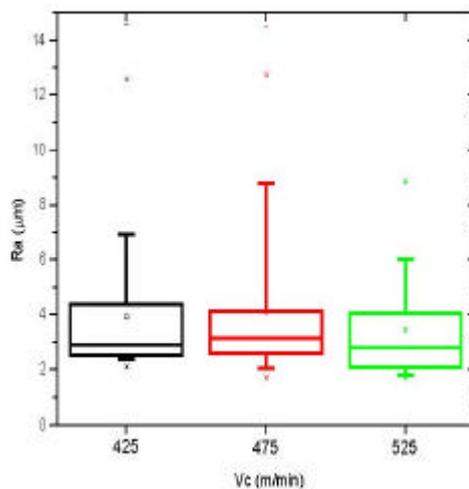


Figura 4.57 – Ra x V_c para o aço ABNT 1040.

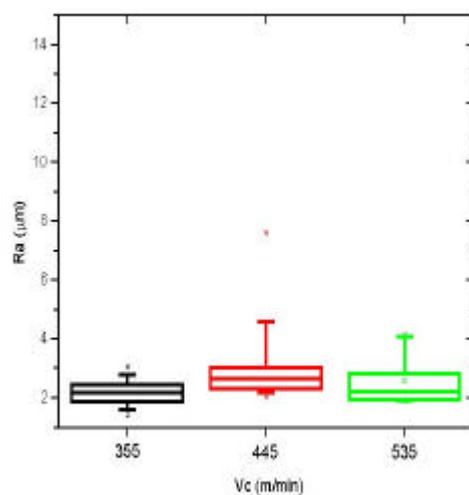


Figura 4.58 – Ra x V_c para o aço ABNT 1045.

4.3.1 Rugosidade em função das forças de usinagem

Nesta seção são apresentados os resultados de rugosidade em função das forças de usinagem. A fim de facilitar a análise dos resultados, tanto os valores de rugosidade média quanto os relativos às forças de usinagem serão apresentados sem barras de erro. Os valores de desvio padrão, bem como os gráficos obtidos para cada velocidade de corte separadamente, são apresentados em anexo.

As figuras 4.59, 4.60 e 4.61 mostram a relação da rugosidade média com as forças de corte, de avanço e a razão entre as forças de avanço e de corte para o aço ABNT 1040, nas velocidades de corte ensaiadas.

Não se observa, nas figuras 4.59-4.61, relação definida entre as variáveis rugosidade, forças de usinagem e velocidade de corte.

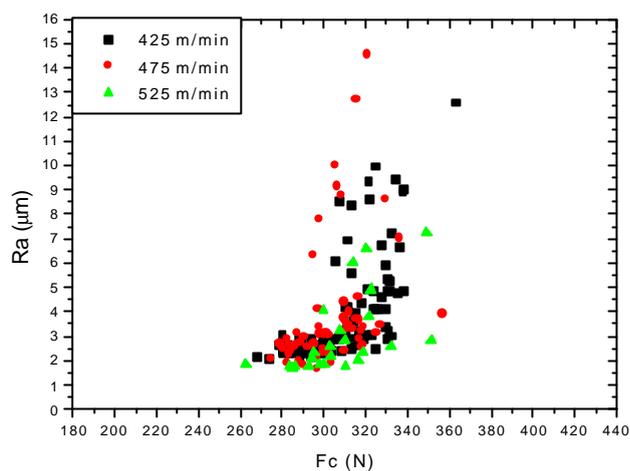


Figura 4.59 – Ra x F_c para o aço ABNT 1040.

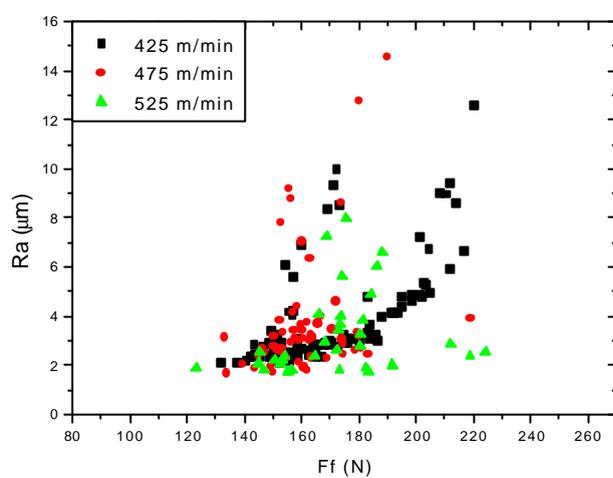


Figura 4.60 – Ra x F_f para o aço ABNT 1040.

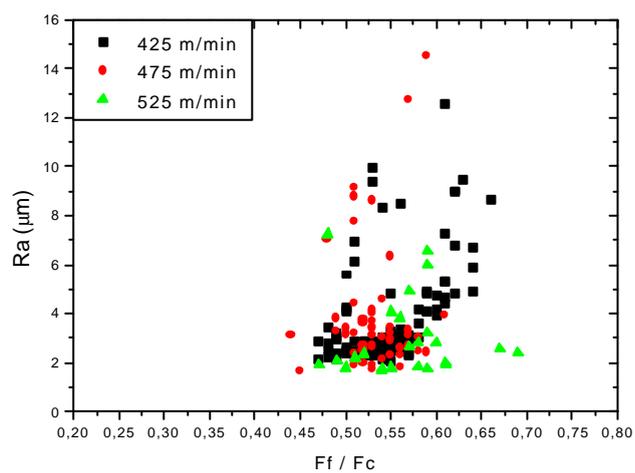


Figura 4.61 – Ra x F_f/F_c para o aço ABNT 1040.

Os resultados das relações Ra x F_c , Ra x F_f e Ra x F_f/F_c para o aço ABNT 1045 são mostrados nas figuras 4.62, 4.63 e 4.64.

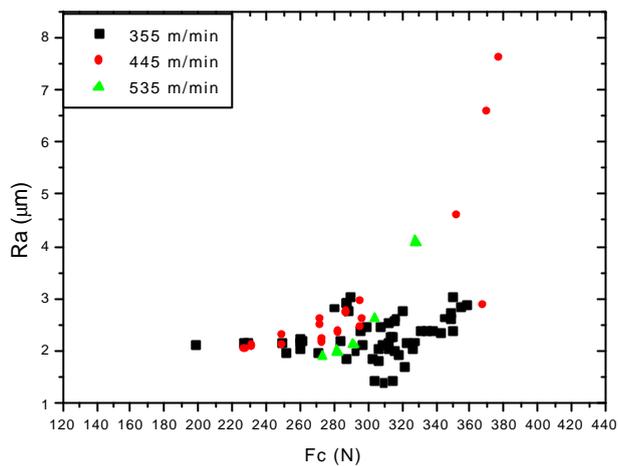


Figura 4.62 – Ra x F_c para o aço ABNT 1045.

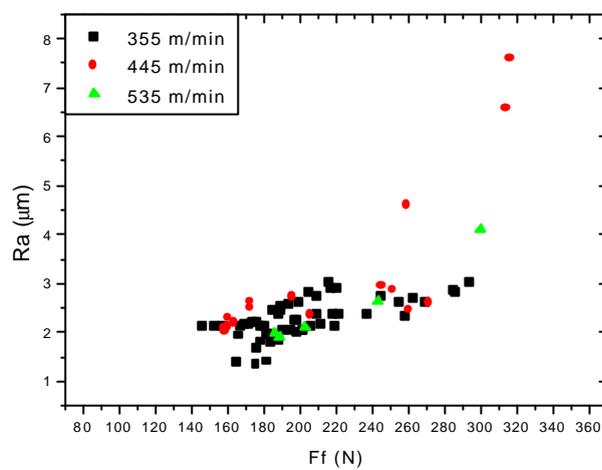


Figura 4.63 – Ra x F_f para o aço ABNT 1045.

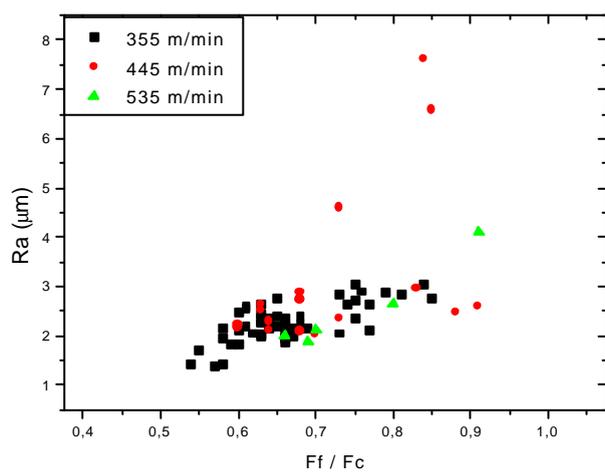


Figura 4.64 – Ra x F_f/F_c para o aço ABNT 1045.

5. DISCUSSÃO

5.1 Resultados em função do tempo de corte

A análise de correlação dos resultados de desgaste de flanco máximo em função do tempo de usinagem (Tabela 4.5) mostra coeficientes de correlação altos para ambos os aços, sugerindo um comportamento estável nas condições de corte usinadas. Os desvios padrão obtidos para a vida da ferramenta na usinagem do aço ABNT 1045 (Tabela 4.3) são sempre inferiores aos referentes ao aço ABNT 1040 (Tabela 4.1), o que confirma a maior estabilidade deste aço no que diz respeito à vida da ferramenta.

A análise das curvas de Taylor (figura 5.1) indica uma melhor usinabilidade no critério vida da ferramenta para o aço ABNT 1040 na faixa de velocidades de corte estudada, resultado esperado devido ao menor tamanho de grão e maior teor de carbono do aço 1045. Uma extrapolação das curvas indica um cruzamento em 790 m/min, quando, teoricamente, a vida da ferramenta na usinagem do aço 1045 seria igual à do aço 1040. Este dado, porém, é de pouca utilidade prática, uma vez que a esta velocidade de corte não seria possível usinar estes aços com insertos de metal duro.

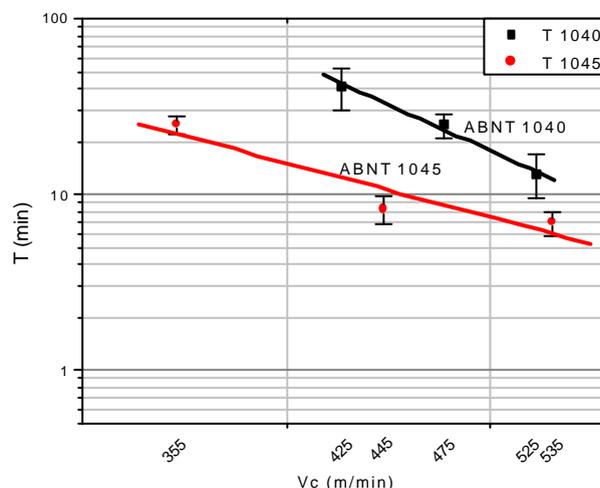


Figura 5.1 – Comparação das curvas de Taylor obtidas na usinagem dos aços ABNT 1040 e 1045 com ferramenta de metal duro revestida.

A análise da relação entre as forças de corte e avanço com o tempo de usinagem mostra um comportamento aproximadamente linear em ambos os casos. No caso do aço ABNT 1040, a força de corte (F_c) apresenta a melhor correlação com o tempo de corte, seguida pela força de avanço (F_f) e, por último, a razão entre as forças de avanço e de corte.

Diferente do aço ABNT 1040, a análise do aço ABNT 1045 mostra que a melhor correlação com o tempo de corte foi obtida para a força de avanço, seguida pela força de corte.

Em relação à rugosidade média, o aço ABNT 1040 segue uma tendência bastante definida ao longo do tempo. Para o aço ABNT 1045, a dispersão observada é maior do que na análise do aço ABNT 1040, em especial na usinagem à velocidade de corte de 355 m/min. Nas demais velocidades de corte, o comportamento é semelhante ao observado para o aço ABNT 1040.

Como mencionado na seção 4.1, os valores de rugosidade média para o aço ABNT 1045 usinado a 355 m/min iniciam próximos a $2\mu\text{m}$, decaindo nos primeiros minutos, até o momento (por volta de 10 min. de usinagem) em que retomam o crescimento, assumindo um comportamento mais próximo ao observado nas demais velocidades de corte. A causa mais provável para este fenômeno diz respeito à relação entre a rugosidade média e o raio de ponta de ferramenta, dada pela equação 5 (seção 2.1.7.1). Esta equação mostra que, à medida que se utiliza ferramentas de corte com raios de ponta maiores, ocorre a tendência de que a rugosidade média caia em valor.

Supõe-se que o efeito do desgaste da ponta da ferramenta provoque o aumento do raio, resultando em melhor acabamento superficial até um momento crítico ($V_{B \text{ Max}}$ entre 0,15 e 0,20mm), a partir do qual os efeitos negativos devidos ao aumento das forças de usinagem e vibrações prevaleceriam, fazendo com que a rugosidade volte a crescer, como observado na Figura 4.30. Este fenômeno foi observado por Chen, 1997, na usinagem de aços com ferramentas de CBN. O provável motivo para que este comportamento seja observado em apenas uma velocidade de corte de um dos materiais estudados é que, nas velocidades de corte superiores, o desgaste do raio de ponta de ferramenta tenha atingido o valor crítico de forma mais rápida, ocorrendo antes da primeira observação.

Ainda em relação à rugosidade média em função do tempo de usinagem, pode-se observar nas figuras 4.30 a 4.35 que as primeiras leituras de rugosidade média ocorrem muito próximas a $1,80\mu\text{m}$, que é o valor teórico calculado através da equação 5. A tabela 5.1 mostra os valores iniciais de rugosidade média observados nos ensaios, comparando-os com o valor teórico. Para ambos os aços observa-se um erro de previsão em torno de 15%, o que mostra que a equação 5 é útil para prever valores iniciais de rugosidade média. Porém, os valores de rugosidade média crescem de acordo com o tempo de corte, fenômeno não acompanhado pela equação 5, que não considera os efeitos decorrentes da variação da geometria da ferramenta ao longo do tempo de usinagem na rugosidade.

Tabela 5.1 – Comparação entre valores de rugosidade média experimentais e teóricos.

| Aço | Ra experimental (μm) | Ra teórico (μm) | Erro (%) |
|------|-----------------------------------|------------------------------|----------|
| 1040 | 2,06 | 1,80 | 14,44 |
| 1045 | 2,08 | | 15,56 |

5.2 Resultados em função do desgaste de flanco máximo

A análise dos resultados de forças de usinagem mostra que, para os aços ABNT 1040 e 1045, os melhores valores de correlação com o desgaste de flanco máximo são obtidos para as forças de corte e de avanço. A razão entre a força de avanço e a força de corte, usada por diversos autores [Yellowley e Lai, 1993; Choundhury e Kishore, 1999; Lee e Lee, 1999] como meio de relacionar as forças de usinagem com o desgaste de flanco reduzindo os erros na previsão de V_B em função de F_u , não mostrou vantagens em relação aos valores das componentes da força de usinagem, motivo pelo qual não será comentada nesta seção.

A Figura 5.2 mostra valores de força de corte plotados em função do desgaste de flanco máximo para o aço ABNT 1040. Estão representados, nessa figura, os dados provenientes de ensaios a 425, 475 e 525 m/min, bem como curvas obtidas por regressão linear para cada uma destas velocidades de corte.

Através de regressão linear para as relações entre força de corte e desgaste de flanco máximo para as velocidades de corte de 425, 475 e 525 m/min obtém-se equações que descrevem o comportamento da força de corte em função de $V_{B \text{ Max}}$ (equações 27, 28 e 29).

$$F_{c_{425}} = 259,18 + 262.V_{B \text{ Max}} \quad (27.)$$

$$F_{c_{475}} = 261,10 + 266.V_{B \text{ Max}} \quad (28.)$$

$$F_{c_{525}} = 258,43 + 288.V_{B \text{ Max}} \quad (29.)$$

A análise tanto do gráfico $V_{B \text{ Max}} \times F_c$ quanto das equações acima não revela uma dependência significativa da relação $F_c \times V_{B \text{ Max}}$ com a velocidade de corte, indicando a possibilidade de uma única equação descrever o comportamento das componentes da força de usinagem em função de $V_{B \text{ Max}}$ para qualquer velocidade de corte situada na faixa estudada.

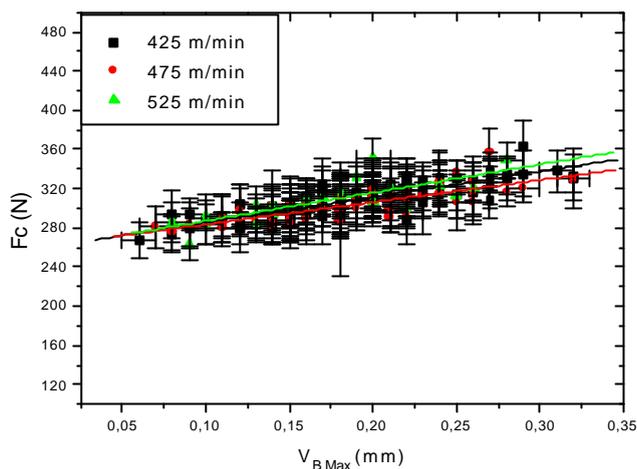


Figura 5.2 – Relação entre a força de corte e o desgaste de flanco máximo para o aço ABNT 1040.

A análise de correlação para a relação entre o desgaste de flanco máximo e a força de corte considerando os resultados relativos a todas as velocidades de corte no aço ABNT 1040 resulta em um coeficiente de correlação igual a 0,80. Este resultado sugere que a relação entre F_c e $V_{B\ Max}$ é independente da velocidade de corte empregada.

A figura 5.3 mostra a força de corte em função de $V_{B\ Max}$. Esta figura é semelhante à figura 5.2, porém sem distinções entre dados relativos a velocidades de corte diferentes. Realizando regressão linear para a os resultados de força e corte e desgaste de flanco máximo, obtém-se a equação 30, que descreve a força de corte em função de $V_{B\ Max}$ para a faixa de velocidades de corte empregada.

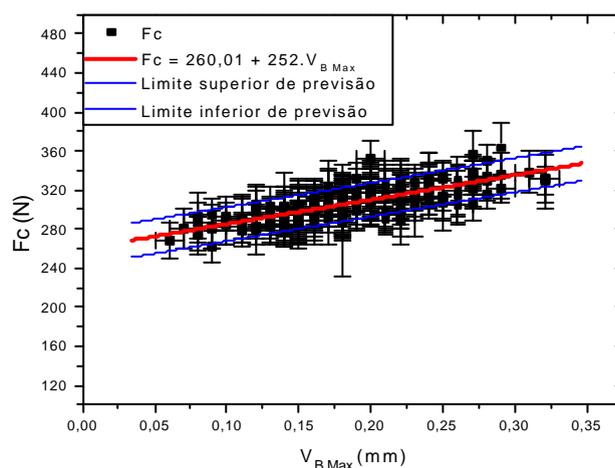


Figura 5.3 – Relação entre F_c e $V_{B\ Max}$ para o aço ABNT 1040 para todas as condições de corte.

$$F_{c_{1040}} = 260,01 + 252.V_{B\ Max} \quad (30.)$$

A equação 30 descreve a força de corte em função do desgaste de flanco máximo com um erro médio de 2,61%. Acima e abaixo da curva gerada por regressão linear estão representados os limites superior e inferior de previsão, entre os quais estão localizados 90% dos dados experimentais, representados pelas equações 31 e 32.

$$F_c_{1040\max} = 264,50 + 274.V_{B\ Max} \quad (31.)$$

$$F_c_{1040\min} = 255,53 + 229.V_{B\ Max} \quad (32.)$$

Analisando-se da mesma maneira a relação entre a força de avanço e o desgaste de flanco máximo (Figura 5.4), foram obtidas as equações 33, 34 e 35 para as velocidades de corte de 425, 475 e 525m/min, respectivamente.

$$F_f_{425} = 111,67 + 302.V_{B\ Max} \quad (33.)$$

$$F_f_{475} = 130,83 + 166.V_{B\ Max} \quad (34.)$$

$$F_f_{525} = 139,49 + 180.V_{B\ Max} \quad (35.)$$

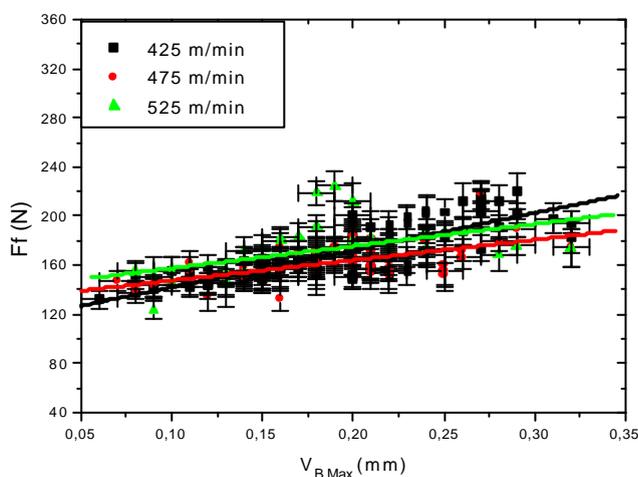


Figura 5.4 – Relação entre a força de avanço e o desgaste de flanco máximo para o aço ABNT 1040.

Do mesmo modo que para a força de corte, não se observa relação significativa entre as equações 33, 34 e 35 e a velocidade de corte para o intervalo observado. O coeficiente de correlação entre a força de avanço e o desgaste de flanco máximo para os dados obtidos a todas as velocidades de corte é $r=0,68936$. A equação 36 resulta em uma aproximação da força de avanço a partir de $V_{B\ Max}$, e apresenta um erro médio de 6,19%. A figura 5.5 mostra a curva representada pela equação 36, bem como os limites superior e inferior de previsão (equações 37 e 38).

$$Ff_{1040} = 122,58 + 239.V_{BMax} \quad (36.)$$

$$Ff_{1040\max} = 128,72 + 269.V_{BMax} \quad (37.)$$

$$Ff_{1040\min} = 116,83 + 209.V_{BMax} \quad (38.)$$

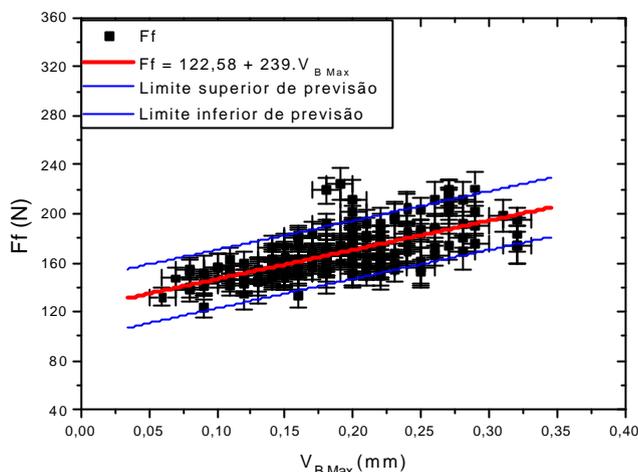


Figura 5.5 – Relação entre F_f e V_{BMax} para o aço ABNT 1040 para todas as condições de corte.

As equações 30 e 36 revelam certa semelhança entre o comportamento das forças de corte e avanço quando observadas em relação ao desgaste máximo de flanco. O fato dos coeficientes angulares das equações 36 e 30, possuírem valores bastante próximos sugere que estas forças se comportam de maneira semelhante durante a usinagem para o aço ABNT 1040.

As equações 39 a 41 descrevem o comportamento do desgaste de flanco máximo em função da força de corte para o aço ABNT 1045 usinado nas velocidades de corte de 355, 445 e 355 m/min, respectivamente. Os dados usados na regressão, bem como as equações, estão representados na figura 5.6.

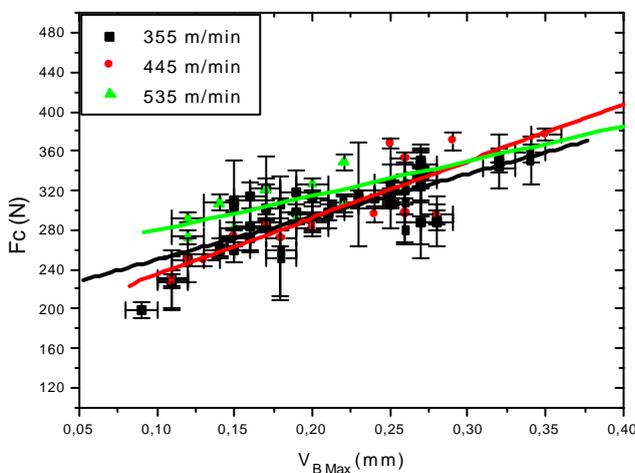


Figura 5.6 – Relação entre a força de corte e o desgaste de flanco máximo para o aço ABNT 1045.

$$Fc_{355} = 206,30 + 436.V_{B\text{Max}} \quad (39.)$$

$$Fc_{445} = 176,44 + 578.V_{B\text{Max}} \quad (40.)$$

$$Fc_{535} = 244,32 + 351.V_{B\text{Max}} \quad (41.)$$

As curvas observadas na Figura 5.6 apresentam coeficientes diferentes, apesar de se situarem próximas umas das outras no intervalo observado na Figura 5.6. Não se observa, porém, relação significativa das equações 39 a 41 com a velocidade de corte. A equação para a determinação da força de corte em função do desgaste de flanco máximo, independente da velocidade de corte, é representada pela equação 42, e plotada na figura 5.7. As equações 43 e 44 determinam os limites de previsão superior e inferior.

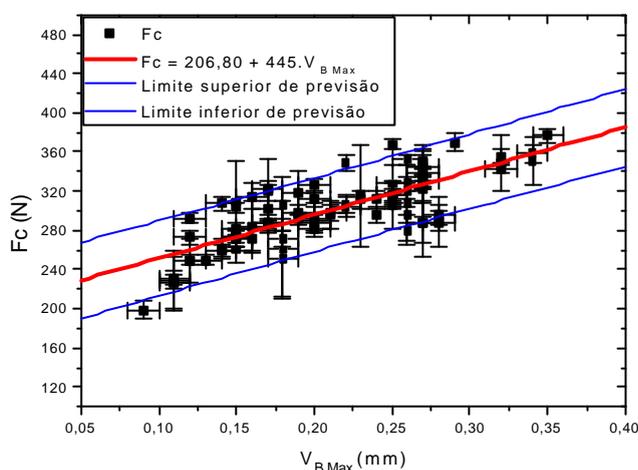


Figura 5.7 – Relação entre F_c e $V_{B\text{Max}}$ para o aço ABNT 1040 para todas as condições de corte.

$$Fc_{1045} = 206,80 + 445.V_{B\text{Max}} \quad (42.)$$

$$Fc_{1045\text{max}} = 221,22 + 510.V_{B\text{Max}} \quad (43.)$$

$$Fc_{1045\text{min}} = 192,34 + 380.V_{B\text{Max}} \quad (44.)$$

A equação 42 possui um coeficiente de correlação de 0,79, e permite a determinação de F_c com um erro médio de 5,79%.

A relação entre a força de avanço e o desgaste de flanco máximo é representada pelas equações 45, 46 e 47 para as velocidades de corte de 355, 445 e 535 m/min, respectivamente. A Figura 5.8 mostra os dados que originaram estas equações, bem como a representação gráfica destas.

$$Ff_{355} = 92,28 + 493.V_{B\ Max} \quad (45.)$$

$$Ff_{445} = 63,05 + 747.V_{B\ Max} \quad (46.)$$

$$Ff_{535} = 66,98 + 829.V_{B\ Max} \quad (47.)$$

Ao contrário do que se observa na usinagem do aço ABNT 1040, as equações que relacionam a força de avanço com o desgaste de flanco máximo apresentam coeficientes angulares significativamente diferentes. Apesar disso, a análise de correlação entre F_f e $V_{B\ Max}$ de forma independente da velocidade de corte (Figura 5.9) mostra um coeficiente de correlação forte ($r= 0,84$), e a equação para a determinação da força de avanço em função de $V_{B\ Max}$ desconsiderando uma possível influência da velocidade de corte (equação 48) retorna o valor do desgaste de flanco máximo com um erro médio de 7,92%, a despeito da correlação mais forte do que a observada para a força de corte. As equações 49 e 50 definem os limites superior e inferior de previsão.

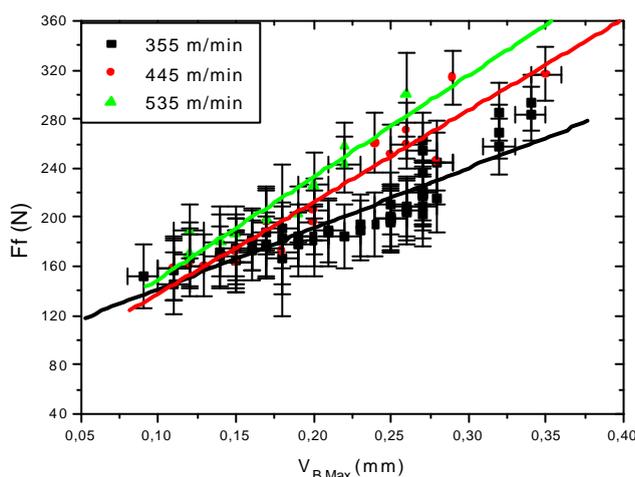


Figura 5.8 – Relação entre a força de avanço e o desgaste de flanco máximo para o aço ABNT 1045.

$$Ff_{1045} = 93,47 + 530.V_{B\ Max} \quad (48.)$$

$$Ff_{1045\max} = 107,62 + 594.V_{B\ Max} \quad (49.)$$

$$Ff_{1045\min} = 79,32 + 466.V_{B\ Max} \quad (50.)$$

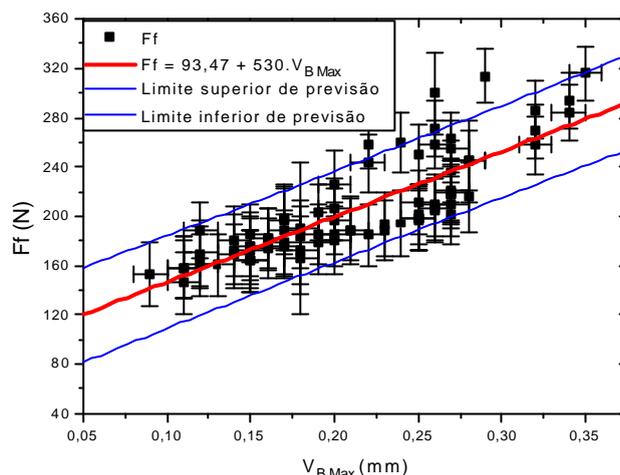


Figura 5.9 – Relação entre F_f e $V_{B\ Max}$ para o aço ABNT 1040 para todas as condições de corte.

A declividade de uma curva de força de usinagem em função do desgaste de flanco máximo indica o quanto esta força irá variar na usinagem com dada ferramenta de corte durante sua vida. A Tabela 5.2 mostra a o coeficiente angular das equações 30, 36, 42 e 48.

Tabela 5.2 – Declividade das equações F ($V_{B\ Max}$).

| Aço | ABNT 1040 | | ABNT 1045 | |
|-------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|
| Curva | $F_c \times V_{B\ Max}$ | $F_f \times V_{B\ Max}$ | $F_c \times V_{B\ Max}$ | $F_f \times V_{B\ Max}$ |
| Declividade | 251,60 | 238,90 | 445,05 | 529,83 |

A declividade das curvas que relacionam as forças de corte e avanço ao desgaste de flanco máximo mostra o valor da força requerida para o corte do material de acordo com o estado de afiação da ferramenta. Desse modo, as forças de usinagem cuja relação com o desgaste de flanco máximo apresente maior declividade possuem maior sensibilidade em relação ao desgaste de flanco, com valores de força de corte variando em uma escala mais ampla. A análise da Tabela 5.2 revela que, para a mesma faixa de desgaste de flanco máximo, ocorre maior variação das forças de usinagem para o aço ABNT 1045.

A comparação entre as curvas relativas às equações para determinação da força de corte consumida na usinagem para os aços ABNT 1040 e 1045 pode ser feita através da Figura 5.10. O paralelismo observado para as curvas relativas a um mesmo aço mostra que as forças de corte e avanço crescem de forma semelhante durante a vida da ferramenta na usinagem dos aços estudados.

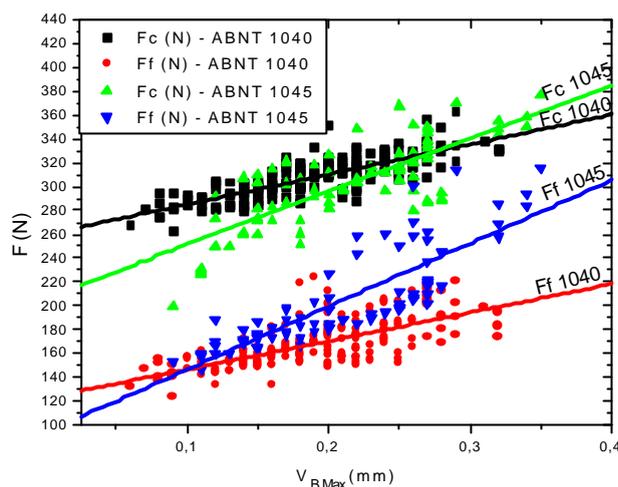


Figura 5.10 – Comparação entre as equações 30, 36, 42 e 48.

A declividade da equação que determina uma componente da força de usinagem em função do desgaste de flanco pode ser usada como um critério auxiliar de usinabilidade, pois ela mostra o quanto a força de corte ou de avanço irá variar na usinagem de um determinado material. A variação da força de corte pode ser associada tanto à potência consumida na usinagem de dado material quanto às tolerâncias da peça a ser usinada.

Uma aplicação prática para as relações entre forças de usinagem e desgaste de flanco máximo é a determinação indireta do desgaste deste, através do conhecimento das forças de corte. Realizou-se regressão linear para $V_{B\ Max}$ em função das forças de usinagem, obtendo-se as equações 51 e 52 para o aço ABNT 1040 e as equações 53 e 54 para o aço ABNT 1045. Os erros médios de previsão para as equações 51 a 54 são mostrados na Tabela 5.3.

$$V_{B\ Max\ 1040} = -0,60145 + 0,00257.Fc \quad (51.)$$

$$V_{B\ Max\ 1040} = -0,14523 + 0,00199.Ff \quad (52.)$$

$$V_{B\ Max\ 1045} = -0,20593 + 0,00139.Fc \quad (53.)$$

$$V_{B\ Max\ 1045} = -0,06136 + 0,00133.Ff \quad (54.)$$

Tabela 5.3 – Erro médio de previsão para as equações 51 a 54.

| Equação | Erro médio de previsão (%) |
|---------|----------------------------|
| 51 | 15,33 |
| 52 | 19,40 |
| 53 | 15,24 |
| 54 | 15,38 |

Os resultados para Ra x $V_{B \text{ Max}}$ obtidos na usinagem do aço ABNT 1040 apresentam comportamento bem definido, apesar de grande variação entre as curvas provenientes de ensaios diferentes. Não há, porém, efeito evidente da velocidade de corte nesta relação.

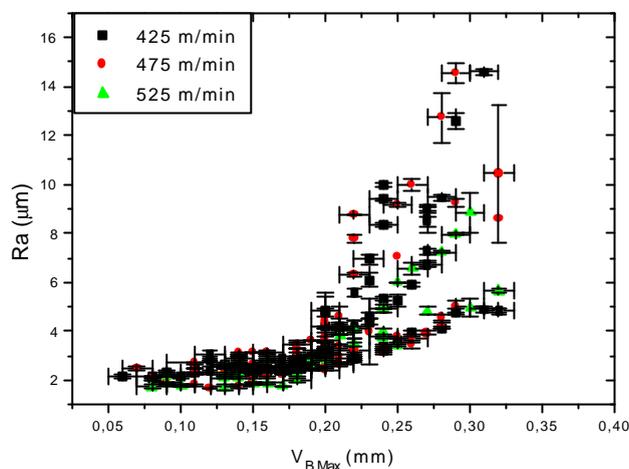


Figura 5.11 – Ra x $V_{B \text{ Max}}$ para o aço ABNT 1040.

A equação que melhor representa a relação entre $V_{B \text{ Max}}$ e Ra é a equação 55. Esta equação determina Ra a partir de $V_{B \text{ Max}}$ com um erro médio de 24,15%. Um erro médio desta ordem não é adequado para aplicações práticas, especialmente em uma aplicação na qual o erro aumenta de acordo com a variável independente.

$$Ra = 0,07 + 0,79.e^{\left(\frac{V_{B \text{ Max}}}{0,13}\right)} \quad (55.)$$

Desse modo, a melhor maneira de explicar a variação da rugosidade média com o desgaste de flanco máximo é a determinação de um envelope (figura 5.14) que represente o comportamento esperado da variável de resposta. O envelope que define a variação deve ter como limites superior e inferior equações que representem o comportamento do material, como a equação 55.

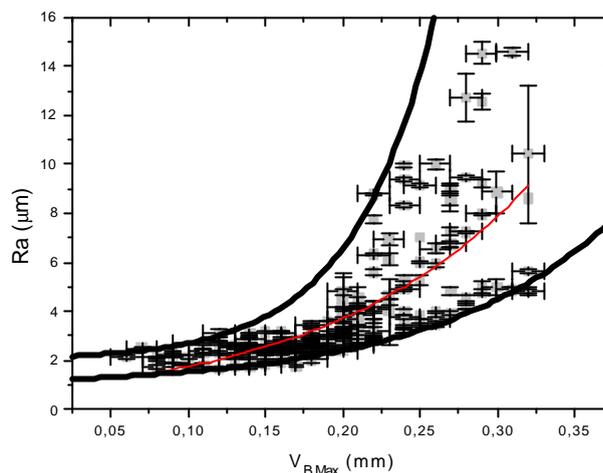


Figura 5.12 – Envelope que define Ra x $V_{B\ Max}$ para o aço ABNT 1040.

Os resultados de Ra em função de $V_{B\ Max}$ para o aço ABNT 1045 mostram comportamento semelhante ao observado na usinagem do aço ABNT 1040, exceto para a velocidade de corte de 355m/min, onde ocorre a queda dos valores de rugosidade nos primeiros minutos de usinagem.

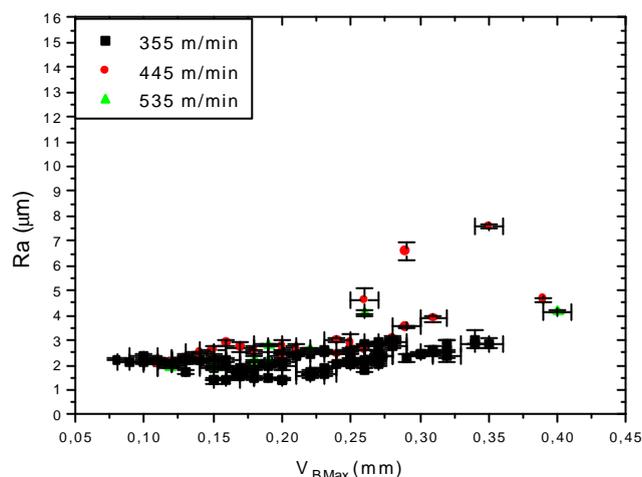


Figura 5.13 – Ra x $V_{B\ Max}$ para o aço ABNT 1045.

De forma análoga ao realizado para o aço ABNT 1040, a equação que melhor representa a relação entre $V_{B\ Max}$ e Ra para o aço ABNT 1045 é a equação 56, que determina Ra a partir de $V_{B\ Max}$ com um erro médio de 17,6%. O menor erro médio de provisão encontrado para este aço se deve à faixa de variação dos resultados de rugosidade média mais restrita observada na usinagem deste aço.

$$Ra = 1,71 + 0,08.e^{\left(\frac{V_{B\ Max}}{0,11}\right)} \quad (56.)$$

O envelope que representa o comportamento da rugosidade média em função do desgaste de flanco máximo para o aço ABNT 1045 é mostrado na Figura 5.14.

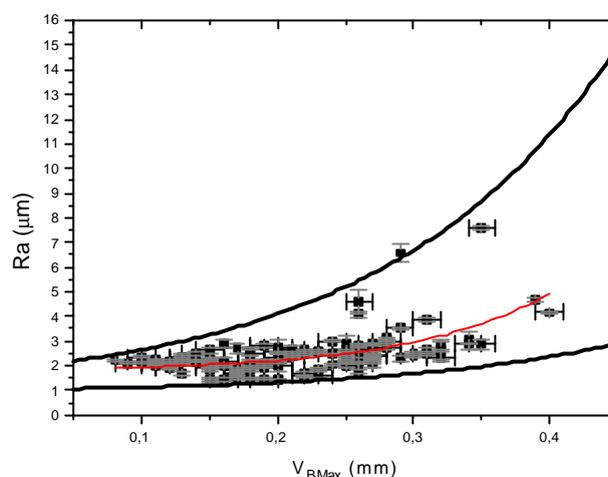


Figura 5.14 – Envelope que define $Ra \times V_{B\ Max}$ para o aço ABNT 1045.

5.3 Resultados de rugosidade média Ra

Os valores de rugosidade média (Ra) para a usinagem dos aços ABNT 1040 e 1045 não apresentaram dependência em relação à velocidade de corte, exceto para o aço ABNT 1045 que, à velocidade de corte de 355 m/min apresenta valores de Ra abaixo dos observados nas demais condições de corte. A Figura 5.15 apresenta os valores de rugosidade média obtidos, para os aços ABNT 1040 e 1045, em todas as condições de corte, em um diagrama do tipo “box”. Este diagrama apresenta, no “box”, a faixa de rugosidade que abrange 50% dos resultados, enquanto as barras de erro abrangem 80% dos resultados

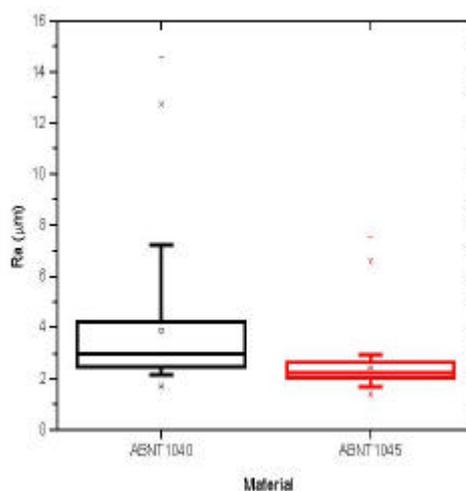


Figura 5.15 – *Boxplot* dos valores de rugosidade média obtidos na usinagem dos aços ABNT 1040 e 1045 para todas as velocidades de corte.

O intervalo que abrange 80% dos dados de rugosidade média é dado pela Tabela 5.4. Nota-se que no critério da rugosidade média, o aço que apresenta melhores propriedades é o ABNT 1045, cuja amplitude de dados é menor do que 1/3 do observado para o aço ABNT 1040 em uma faixa mais restrita de velocidades de corte.

Tabela 5.4 – Intervalo de variação de Ra para os aços ABNT 1040 e 1045.

| Ra (μm) | ABNT 1040 | ABNT 1045 |
|----------------------|-----------|-----------|
| 10% inferior | 2,14 | 1,63 |
| 10% superior | 7,26 | 3,00 |
| amplitude | 5,12 | 1,37 |

6. CONCLUSÕES

Conclui-se através dos resultados obtidos:

- O aço ABNT 1040 apresenta usinabilidade superior ao ABNT 1045 em relação à vida da ferramenta de corte na faixa de velocidades de corte estudada.
- A rugosidade média apresenta um comportamento bem definido ao longo do tempo para o aço ABNT 1040 em todas as condições de corte. Na usinagem do aço ABNT 1045, ocorre a redução da rugosidade média nos primeiros minutos de usinagem para os ensaios realizados à velocidade de corte mais baixa, com os demais resultados semelhantes ao observado para o aço ABNT 1040. Este fenômeno está provavelmente associado à alteração do raio de ponta da ferramenta, que ocorre de forma mais lenta a esta velocidade de corte.
- A equação para determinação de Ra através da geometria da ferramenta e do avanço constitui uma boa aproximação para a rugosidade no início da vida da ferramenta. Porém, esta equação não considera a deterioração da aresta de corte ao longo do tempo, e seu conseqüente prejuízo à rugosidade, sendo válida, então, apenas para o início da vida da ferramenta.
- As correlações entre as forças de usinagem e o desgaste de flanco máximo são fortes para ambos os aços. As equações que as relacionam podem aumentar o controle sobre os processos de torneamento, facilitando a avaliação do desgaste de flanco durante o processo de usinagem, com um erro médio relativamente baixo.
- O uso da razão entre as forças de avanço e de corte não apresenta vantagens em relação ao uso das componentes da força ativa para a determinação indireta do desgaste de flanco máximo.
- A relação entre $V_{B \text{ Max}}$ e Ra segue uma tendência exponencial, apesar da baixa repetibilidade mostrada para ensaios diferentes a mesma velocidade de corte. Observa-se que esta relação não possui dependência com a velocidade de corte de modo que um envelope definido por equações exponenciais de primeiro grau representa seu comportamento nas condições de corte estudadas.
- Mesmo em uma faixa mais ampla de condições de corte, o aço ABNT 1045 apresentou menor variação de rugosidade média do que o aço ABNT 1040, sendo esta três vezes maior. O melhor acabamento superficial obtido para o aço ABNT 1045 deve-se provavelmente à microestrutura mais refinada apresentada por este material.

- As componentes da força ativa apresentam um crescimento linear em relação ao desgaste de flanco máximo.
- A declividade da equação que relaciona a força de corte com o desgaste de flanco pode ser usada como um critério auxiliar para definir o material mais apropriado para determinada operação de usinagem. Aços com maior declividade para esta equação apresentam maior variação das forças de corte para a mesma faixa de desgaste de flanco máximo, o que pode resultar em maior demanda de potência e difícil controle de tolerâncias dimensionais, devido à maior deflexão do porta-ferramenta observada durante a usinagem.
- Não foi observada influência da velocidade de corte sobre a relação entre o desgaste de flanco e as componentes da força ativa. Desse modo, uma única equação pode representar o comportamento da relação do desgaste de flanco máximo com dada componente de força para a faixa de velocidades de corte estudada.

7. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

- Avaliação das relações entre $V_{B \text{ Max}}$, F_c , F_f e Ra em ensaios de usinabilidade para a determinação da equação de Taylor expandida, a fim de observar a variação das relações quando alterados parâmetros de corte como avanço e profundidade de corte;
- Análise das magnitudes de forças de usinagem, rugosidade média e suas relações com $V_{B \text{ Max}}$ na usinagem de diferentes materiais, com o intuito de construir um perfil das relações entre estas grandezas e a composição do material, como por exemplo a porcentagem de carbono presente no aço. Desse modo, pode-se mapear o comportamento em usinagem para uma determinada faixa de materiais.
- Aplicação dos temas sugeridos a outros processos de fabricação por usinagem, como fresamento e furação, buscando correlações entre fenômenos observados em processos diferentes.

8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ASME, 1952. “**Manual on Cutting the Metals**”, the American Society of Mechanical Engineers, USA.

AWF, 1949. “**Kurzausgabe der AWF-Blätter Nr 158**”, Ausschuss für Wirtschaftliche Fertigung, Berlin.

Boulger, F. W., Shaw, M. C., Johnson, H. E., 1949. “**Constant pressure Lathe Test for Measuring Machinability of Free Machining Steels**”, Transactions of ASME v. 66, pp 649-652.

Boulger, F. W., Moorhead, H, Gavey, T. M., 1951. “**Superior Machinability of MX Steel Explained**”, Iron Age 167, pp 90-95.

Boulger, F. W., 1990. “**Machinability of Steels**”, Metals Handbook Tenth Edition v.1, pp 591-602.

Chen, W., 1999. “**Cutting Forces and Surface Finish when Machining Medium Hardness Steel Using CBN Tools**”, International Journal of Machine Tools and Manufacture v.40, pp 455-466.

Choundhury, S. K., Kishore, K. K., 1999. “**Tool Wear Measurement in Turning Using Force Ratio**”, International Journal of Machine Tools and Manufacture v.40, pp 889-909.

Coromant, S., 1994. “**Modern Metal Cutting – a Practical Handbook**”, Tofters Tryckeri AB, Sweden.

Czaplici, L., 1962. “**Lúsinabilite et al Coupe des Metaux**”, Res. Soc. Roy. Belge Ingeniere 12, pp 708-736.

Danai, K., Ulsoy, A. G., 1987. “**A Dynamic State model for On-Line Tool Wear Estimation in Turning**”, Journal of Engineering for Industry v.109, pp 396-399.

Diniz, A. E., Marcondes, F. C., Coppini, N. L., 2000. “**Tecnologia da Usinagem dos Metais**”, Artliber, São Paulo.

Evangelista, N., 2001. “**Comparação entre o Ensaio de Usinabilidade de Curta Duração e o Ensaio de Usinabilidade de Longa Duração**”, Dissertação para a obtenção do título de mestre em engenharia metalúrgica, PPGEM/UFRGS.

Ferraresi, D., 1970. “**Fundamentos da usinagem dos metais**”, Editora Edgard Blücher, São Paulo.

Heiginbotham, W. B., Pandey, P. C., 1966. “**Taper Turning Tests Produce Reliable Tool Life Equation**”, Proc. 7th M.T.D.R. conf. P 515.

Henkin, A. Datsko, J., 1963. **“The Influence of Physical Properties on Machinability”**, Transactions of ASMA, Journal of Engineering for industry, pp 321-327.

ISO, 1993. **“Tool Life Testing with Single Point Turning”**, ISO 3685.

Kalpajian, S., 1985. **“Manufacturing Process for Engineering Materials”**. Addison-Wesley Publishing Company.

Kankaanpää, H., Pöntinen, H., Korhonen, A. S., 1987. **“Machinability of Calcium Treated Steels Using TiN Coated High Speed Steel Tools”**, Materials Science and Technology, v.3.

Kienzle, O., 1952. **“Die Bestimmung von Kräften und Leistungen an Spanenden Werkzeugen und Werkzeugmaschinen”**, VDI. Hannover, 94, pp 299-305.

Kraus, C. E., Weddel, R. R., 1937. **“Determining the Tool Life Cutting Speed Relationship by Facing Cuts”**, ASME Fall Meeting, USA.

Kronenberg, M., 1954. **“Grundzüge der Zerspanungslehre V. 1”**, Springer Verlag, Berlin.

Lee, J. H., Lee, S. J., **“One Step Ahead Prediction of Flank Wear Using Cutting Force”**, International Journal of Machine Tools and Manufacture v.39, pp 1747-1760.

Machado, A., da Silva, M. B., 1999. **“Usinagem dos Metais”**, Apostila, DEEME – UFU, Uberlândia.

Milan, J. C. G., 1999. **“Usinabilidade de Aços para Moldes de Plástico”**, Dissertação para a obtenção do título de mestre em engenharia mecânica, UFU.

Mills, B. Redford, A. H., 1983. **“Machinability of Engineering Materials”**, Applied Science Publishers, London.

Shaw, M. C., 1984. **“Metal Cutting Principles”**, Oxford University Press, Great Britain.

Singh, S. B., Chakrabarti, A. K., Chattopadhyay, A. B., 1996. **“A study of the Effect of Inclusion Content of the Machinability and Wear Characteristics of 0,24% Carbon Steels”**, Journal of Materials Processing Technology 66, pp90-96, India.

Stemmer, C.E., 1989. **“Ferramentas de Corte”**, 2ª edição, Editora da UFSC, Florianópolis.

Stemmer, C.E., 1995. **“Ferramentas de Corte I”**, 3ª edição, Editora da UFSC, Florianópolis.

Strafford, K. N., Audy, J., 1997. **“Indirect Monitoring of Machinability in Carbon Steels by Measurement of Cutting Forces”**, Journal of Materials Processing Tehnology 67, pp150-156.

Tönshoff, H. K., Cassel, C., 1993. **“Effects of Non-Metallic Inclusions in Quenched and Tempered Steel on the Wear Behavior of Cermet Cutting Tools”**, Journal of the Society of Tribologists and Lubrication Engineers, Vol. 49.

Trent, M. C., 1984. **“Metal cutting principles – 2nd edition”**, Butterworth-Heinemann, USA.

Trent, M. C., Wright, P. K., 2000. **“Metal cutting principles – 4th edition”**, Butterworth-Heinemann, USA.

Walker, J., 2000. **“Machining Fundamentals”**, GW Publisher, USA.

Yamane, Y., Hayashi, K., Narutaki, N., 1991. **“Free Cutting Cast Irons Based on Non-Metallic Inclusions”**, Second International Conference on the Behavior of Materials in Machining.

Yellowley, I. Lai, C. T., 1993. **“The Use of Force Ratios in the Tracking of Tool Wear in Turning”**, Transactions of ASME v.115, pp 370-372.

Zatlin, N. Field, M., 1950. **“Evaluation of Rolled Steels, Forging and Cast Irons”**, Machining Theory and Practice, USA.

9. ANEXO 1 – PLANILHAS DE RESULTADOS

Tabela 9.1 – Resultados relativos à primeira repetição do experimento para o aço ABNT 1040 usinado a 425 m/min.

| T (s) | $V_{B\ Max}$ (mm) | s | Ra (μm) | s | F_c (N) | s | F_f (N) | s | F_f/F_c | s |
|-------|-------------------|------|----------------------|------|-----------|-------|-----------|-------|-----------|------|
| 1,00 | 0,08 | 0,00 | 2,06 | 0,05 | 273,95 | 19,48 | 152,03 | 11,56 | 0,55 | 0,06 |
| 2,00 | 0,10 | 0,01 | 2,15 | 0,07 | 288,75 | 25,22 | 155,79 | 11,37 | 0,54 | 0,06 |
| 3,00 | 0,12 | 0,01 | 3,08 | 0,15 | 280,15 | 25,42 | 158,53 | 9,89 | 0,57 | 0,06 |
| 4,00 | 0,14 | 0,01 | 2,41 | 0,04 | 288,61 | 25,94 | 162,81 | 7,94 | 0,56 | 0,06 |
| 5,00 | 0,15 | 0,01 | 2,52 | 0,05 | 296,89 | 27,46 | 164,36 | 8,94 | 0,55 | 0,06 |
| 6,00 | 0,15 | 0,00 | 2,37 | 0,01 | 290,89 | 24,88 | 164,53 | 10,38 | 0,57 | 0,06 |
| 7,00 | 0,17 | 0,00 | 2,32 | 0,07 | 291,05 | 27,10 | 166,81 | 13,22 | 0,57 | 0,07 |
| 8,00 | 0,17 | 0,00 | 2,42 | 0,08 | 299,18 | 23,50 | 163,71 | 9,77 | 0,55 | 0,05 |
| 9,00 | 0,18 | 0,01 | 2,59 | 0,08 | -- | -- | -- | -- | -- | -- |
| 10,00 | 0,18 | 0,00 | 2,67 | 0,06 | 298,33 | 26,34 | 159,65 | 11,53 | 0,54 | 0,06 |
| 11,00 | 0,18 | 0,00 | 2,85 | 0,03 | 307,61 | 24,63 | 164,16 | 14,14 | 0,53 | 0,06 |
| 12,00 | 0,18 | 0,00 | 2,84 | 0,06 | 300,95 | 30,86 | 167,94 | 11,21 | 0,56 | 0,07 |
| 13,00 | 0,18 | 0,00 | 2,90 | 0,07 | 299,42 | 30,38 | 168,45 | 13,50 | 0,56 | 0,07 |
| 14,00 | 0,18 | 0,00 | 2,78 | 0,05 | 301,12 | 26,55 | 172,19 | 15,54 | 0,57 | 0,07 |
| 15,00 | 0,18 | 0,00 | 2,81 | 0,11 | 289,08 | 57,42 | 165,27 | 29,84 | 0,57 | 0,15 |
| 16,00 | 0,19 | 0,01 | 3,00 | 0,04 | 307,78 | 26,51 | 169,81 | 12,43 | 0,55 | 0,06 |
| 17,00 | 0,20 | 0,01 | 3,11 | 0,13 | 316,63 | 20,77 | 176,35 | 10,63 | 0,56 | 0,05 |
| 18,00 | 0,20 | 0,00 | 3,07 | 0,09 | 320,29 | 20,66 | 183,43 | 12,05 | 0,57 | 0,05 |
| 19,00 | 0,20 | 0,00 | 3,06 | 0,03 | 317,24 | 26,62 | 177,37 | 10,68 | 0,56 | 0,06 |
| 20,00 | 0,20 | 0,00 | 3,24 | 0,09 | 316,84 | 25,61 | 174,68 | 14,73 | 0,55 | 0,06 |
| 21,00 | 0,20 | 0,00 | 4,75 | 0,13 | -- | -- | -- | -- | -- | -- |
| 22,00 | 0,20 | 0,01 | 4,16 | 0,03 | 324,12 | 22,00 | 193,41 | 13,13 | 0,60 | 0,06 |
| 23,00 | 0,20 | 0,01 | 4,84 | 0,73 | 323,41 | 24,99 | 201,27 | 9,88 | 0,62 | 0,06 |
| 24,00 | 0,21 | 0,00 | 4,10 | 0,05 | 325,29 | 21,47 | 191,56 | 12,18 | 0,59 | 0,05 |
| 25,00 | 0,22 | 0,00 | 4,12 | 0,08 | 324,64 | 18,01 | 192,16 | 12,55 | 0,59 | 0,05 |
| 26,00 | 0,23 | 0,00 | 4,38 | 0,12 | 317,77 | 25,02 | 194,76 | 14,34 | 0,61 | 0,07 |
| 27,00 | 0,23 | 0,00 | 4,63 | 0,10 | 327,61 | 18,16 | 198,63 | 8,96 | 0,61 | 0,04 |
| 28,00 | 0,24 | 0,00 | 4,92 | 0,14 | 320,67 | 17,99 | 204,40 | 13,15 | 0,64 | 0,05 |
| 29,00 | 0,24 | 0,00 | 5,33 | 0,12 | 330,26 | 18,21 | 202,76 | 13,31 | 0,61 | 0,05 |
| 30,00 | 0,25 | 0,00 | 5,27 | 0,23 | 331,16 | 17,58 | 203,17 | 10,61 | 0,61 | 0,05 |
| 31,00 | 0,26 | 0,00 | 5,91 | 0,09 | 329,43 | 24,17 | 212,02 | 14,33 | 0,64 | 0,06 |
| 32,00 | 0,27 | 0,01 | 6,75 | 0,14 | 327,33 | 23,66 | 204,37 | 15,17 | 0,62 | 0,06 |
| 33,00 | 0,27 | 0,00 | 7,26 | 0,13 | 332,53 | 17,20 | 201,52 | 10,17 | 0,61 | 0,04 |
| 34,00 | 0,27 | 0,00 | 6,68 | 0,08 | 335,99 | 13,64 | 216,61 | 10,72 | 0,64 | 0,04 |
| 35,00 | 0,27 | 0,00 | 8,50 | 0,21 | 307,31 | 18,25 | 173,43 | 10,60 | 0,56 | 0,05 |
| 36,00 | 0,27 | 0,00 | 8,62 | 0,57 | 321,74 | 20,97 | 213,74 | 14,24 | 0,66 | 0,06 |
| 37,00 | 0,27 | 0,00 | 9,01 | 0,10 | 338,32 | 15,08 | 208,09 | 13,61 | 0,62 | 0,05 |
| 38,00 | 0,27 | 0,00 | 8,97 | 0,15 | 337,73 | 18,56 | 210,17 | 11,27 | 0,62 | 0,05 |
| 39,00 | 0,28 | 0,01 | 9,45 | 0,09 | 334,00 | 18,71 | 211,74 | 13,80 | 0,63 | 0,05 |
| 40,00 | 0,29 | 0,00 | 12,58 | 0,32 | 363,37 | 26,57 | 220,44 | 14,32 | 0,61 | 0,06 |
| 41,00 | 0,31 | 0,01 | 14,58 | 0,16 | -- | -- | -- | -- | -- | -- |

Tabela 9.2 – Resultados relativos à segunda repetição do experimento para o aço ABNT 1040 usinado a 425 m/min.

| T (s) | $V_{B \text{ Max}}$ (mm) | s | Ra (μm) | s | F_c (N) | s | F_f (N) | s | F_f/F_c | s |
|-------|--------------------------|------|----------------------|------|-----------|-------|-----------|-------|-----------|------|
| 1,00 | 0,06 | 0,01 | 2,13 | 0,08 | 267,85 | 18,64 | 131,92 | 7,32 | 0,49 | 0,04 |
| 2,00 | 0,09 | 0,00 | 2,35 | 0,05 | 280,08 | 19,14 | 141,94 | 8,09 | 0,51 | 0,05 |
| 3,00 | 0,12 | 0,00 | 2,35 | 0,02 | 283,20 | 12,59 | 145,40 | 8,35 | 0,51 | 0,04 |
| 4,00 | 0,12 | 0,00 | 2,40 | 0,19 | 280,38 | 16,39 | 143,92 | 7,00 | 0,51 | 0,04 |
| 5,00 | 0,13 | 0,01 | 2,63 | 0,04 | 282,63 | 17,56 | 152,09 | 9,50 | 0,54 | 0,05 |
| 6,00 | 0,14 | 0,01 | 2,89 | 0,07 | 293,88 | 18,99 | 148,43 | 7,46 | 0,51 | 0,04 |
| 7,00 | 0,14 | 0,01 | 2,63 | 0,10 | 278,89 | 16,16 | 152,76 | 9,37 | 0,55 | 0,05 |
| 8,00 | 0,15 | 0,01 | 2,51 | 0,02 | 293,82 | 13,23 | 154,10 | 7,14 | 0,52 | 0,03 |
| 9,00 | 0,15 | 0,00 | 2,43 | 0,01 | 284,92 | 19,61 | 150,22 | 12,61 | 0,53 | 0,06 |
| 10,00 | 0,15 | 0,00 | 2,31 | 0,09 | 294,01 | 22,49 | 153,15 | 12,05 | 0,52 | 0,06 |
| 11,00 | 0,15 | 0,00 | 2,29 | 0,08 | 284,71 | 25,41 | 151,27 | 10,40 | 0,53 | 0,06 |
| 12,00 | 0,15 | 0,00 | 2,32 | 0,10 | 300,07 | 20,55 | 158,52 | 10,08 | 0,53 | 0,05 |
| 13,00 | 0,16 | 0,00 | 2,36 | 0,07 | 294,31 | 17,19 | 158,19 | 10,70 | 0,54 | 0,05 |
| 14,00 | 0,16 | 0,00 | 2,42 | 0,05 | 299,01 | 20,97 | 162,77 | 11,70 | 0,54 | 0,05 |
| 15,00 | 0,16 | 0,01 | 2,47 | 0,02 | 298,31 | 25,41 | 162,38 | 10,24 | 0,54 | 0,06 |
| 16,00 | 0,17 | 0,01 | 2,56 | 0,05 | 303,06 | 20,62 | 162,43 | 11,35 | 0,54 | 0,05 |
| 17,00 | 0,18 | 0,00 | 2,37 | 0,24 | -- | -- | -- | -- | -- | -- |
| 18,00 | 0,18 | 0,00 | 2,51 | 0,04 | -- | -- | -- | -- | -- | -- |
| 19,00 | 0,18 | 0,00 | 2,66 | 0,08 | -- | -- | -- | -- | -- | -- |
| 20,00 | 0,18 | 0,00 | 2,60 | 0,09 | -- | -- | -- | -- | -- | -- |
| 21,00 | 0,18 | 0,00 | 2,64 | 0,01 | 300,08 | 24,31 | 158,29 | 8,87 | 0,53 | 0,05 |
| 22,00 | 0,18 | 0,00 | 2,53 | 0,07 | -- | -- | -- | -- | -- | -- |
| 23,00 | 0,18 | 0,00 | 2,93 | 0,07 | 313,06 | 23,45 | 152,52 | 8,46 | 0,49 | 0,05 |
| 24,00 | 0,20 | 0,01 | 3,01 | 0,08 | 308,88 | 26,83 | 150,81 | 8,91 | 0,49 | 0,05 |
| 25,00 | 0,20 | 0,00 | 3,21 | 0,11 | 310,44 | 21,43 | 151,79 | 11,24 | 0,49 | 0,05 |
| 26,00 | 0,20 | 0,00 | 3,42 | 0,13 | 310,80 | 21,31 | 149,01 | 8,92 | 0,48 | 0,04 |
| 27,00 | 0,21 | 0,01 | 4,07 | 0,19 | 311,80 | 30,15 | 156,64 | 7,90 | 0,50 | 0,05 |
| 28,00 | 0,21 | 0,00 | 4,22 | 0,32 | 311,05 | 14,49 | 156,82 | 10,18 | 0,50 | 0,04 |
| 29,00 | 0,22 | 0,01 | 4,17 | 0,24 | 310,39 | 25,94 | 155,78 | 9,04 | 0,50 | 0,05 |
| 30,00 | 0,22 | 0,00 | 2,86 | 0,05 | 288,07 | 23,99 | 150,09 | 8,67 | 0,52 | 0,05 |
| 31,00 | 0,22 | 0,00 | 5,60 | 0,15 | 313,24 | 22,15 | 157,01 | 9,51 | 0,50 | 0,05 |
| 32,00 | 0,23 | 0,00 | 6,10 | 0,25 | 305,44 | 32,93 | 154,41 | 10,20 | 0,51 | 0,06 |
| 33,00 | 0,23 | 0,01 | 6,93 | 0,23 | 311,05 | 21,96 | 160,07 | 6,79 | 0,51 | 0,04 |
| 34,00 | 0,24 | 0,01 | 8,34 | 0,07 | 313,42 | 21,94 | 169,05 | 8,91 | 0,54 | 0,05 |
| 35,00 | 0,24 | 0,01 | 9,37 | 0,06 | 321,41 | 27,18 | 171,04 | 9,99 | 0,53 | 0,05 |
| 36,00 | 0,24 | 0,00 | 9,96 | 0,10 | 325,00 | 18,79 | 172,12 | 13,12 | 0,53 | 0,05 |

Tabela 9.3 – Resultados relativos à terceira repetição do experimento para o aço ABNT 1040 usinado a 425 m/min.

| T (s) | $V_{B\ Max}$ (mm) | s | Ra (μm) | s | F_c (N) | s | F_f (N) | s | F_f/F_c | s |
|-------|-------------------|------|----------------------|------|-----------|-------|-----------|-------|-----------|------|
| 1,00 | 0,08 | 0,01 | 2,13 | 0,01 | 293,92 | 23,81 | 137,24 | 8,17 | 0,47 | 0,05 |
| 2,00 | 0,09 | 0,00 | 2,22 | 0,06 | 294,24 | 16,61 | 140,54 | 7,54 | 0,48 | 0,04 |
| 3,00 | 0,11 | 0,01 | 2,34 | 0,14 | 291,21 | 21,13 | 141,98 | 8,54 | 0,49 | 0,05 |
| 4,00 | 0,11 | 0,00 | 2,46 | 0,01 | 290,46 | 24,68 | 151,67 | 5,82 | 0,52 | 0,05 |
| 5,00 | 0,12 | 0,00 | 2,78 | 0,02 | 303,16 | 20,58 | 146,39 | 11,37 | 0,48 | 0,05 |
| 6,00 | 0,12 | 0,00 | 2,85 | 0,06 | 304,68 | 20,10 | 143,29 | 10,86 | 0,47 | 0,05 |
| 7,00 | 0,14 | 0,00 | 2,60 | 0,09 | 301,10 | 36,68 | 150,47 | 10,93 | 0,50 | 0,07 |
| 8,00 | 0,15 | 0,00 | 2,33 | 0,04 | 300,12 | 24,73 | 148,26 | 10,81 | 0,49 | 0,05 |
| 9,00 | 0,15 | 0,01 | 2,37 | 0,07 | 300,86 | 29,80 | 149,47 | 10,47 | 0,50 | 0,06 |
| 10,00 | 0,15 | 0,01 | 2,43 | 0,08 | 303,30 | 20,73 | 151,83 | 11,11 | 0,50 | 0,05 |
| 11,00 | 0,16 | 0,00 | 2,42 | 0,09 | 308,20 | 23,17 | 156,95 | 7,18 | 0,51 | 0,04 |
| 12,00 | 0,16 | 0,01 | 2,49 | 0,11 | 312,85 | 16,43 | 156,11 | 9,65 | 0,50 | 0,04 |
| 13,00 | 0,17 | 0,00 | 2,50 | 0,08 | 324,43 | 26,25 | 156,46 | 9,97 | 0,48 | 0,05 |
| 14,00 | 0,17 | 0,01 | 2,60 | 0,08 | 315,53 | 23,55 | 162,63 | 12,25 | 0,52 | 0,05 |
| 15,00 | 0,17 | 0,01 | 2,87 | 0,09 | 318,64 | 24,07 | 165,81 | 8,94 | 0,52 | 0,05 |
| 16,00 | 0,18 | 0,01 | 2,56 | 0,03 | 313,74 | 21,43 | 164,83 | 11,46 | 0,53 | 0,05 |
| 17,00 | 0,19 | 0,00 | 2,93 | 0,25 | 308,91 | 24,24 | 170,14 | 9,28 | 0,55 | 0,05 |
| 18,00 | 0,19 | 0,00 | 2,82 | 0,19 | 316,66 | 26,12 | 169,57 | 10,54 | 0,54 | 0,06 |
| 19,00 | 0,22 | 0,00 | 2,88 | 0,09 | 316,91 | 15,51 | 175,45 | 9,48 | 0,55 | 0,04 |
| 20,00 | 0,22 | 0,00 | 2,88 | 0,10 | 330,42 | 21,09 | 176,32 | 13,44 | 0,53 | 0,05 |
| 21,00 | 0,22 | 0,00 | 3,02 | 0,04 | 322,55 | 17,74 | 186,60 | 13,02 | 0,58 | 0,05 |
| 22,00 | 0,22 | 0,00 | 3,01 | 0,09 | 332,16 | 18,88 | 179,94 | 10,12 | 0,54 | 0,04 |
| 23,00 | 0,24 | 0,00 | 3,21 | 0,06 | 331,01 | 26,22 | 185,83 | 12,11 | 0,56 | 0,06 |
| 24,00 | 0,24 | 0,00 | 3,35 | 0,10 | 329,77 | 28,45 | 183,17 | 9,93 | 0,56 | 0,06 |
| 25,00 | 0,25 | 0,00 | 3,62 | 0,07 | 314,45 | 24,67 | 183,53 | 11,22 | 0,58 | 0,06 |
| 26,00 | 0,26 | 0,00 | 3,95 | 0,06 | 315,21 | 28,30 | 187,70 | 11,09 | 0,60 | 0,06 |
| 27,00 | 0,28 | 0,00 | 4,14 | 0,07 | 329,84 | 20,85 | 191,34 | 10,05 | 0,58 | 0,05 |
| 28,00 | 0,29 | 0,00 | 4,77 | 0,11 | 335,23 | 23,06 | 202,13 | 8,29 | 0,60 | 0,05 |
| 29,00 | 0,31 | 0,01 | 4,88 | 0,11 | 338,36 | 21,23 | 198,24 | 12,71 | 0,59 | 0,05 |
| 30,00 | 0,32 | 0,01 | 4,82 | 0,06 | 330,86 | 30,05 | 194,77 | 9,35 | 0,59 | 0,06 |
| 31,00 | 0,32 | 0,00 | 4,82 | 0,14 | 331,73 | 23,59 | 182,89 | 13,46 | 0,55 | 0,06 |

Tabela 9.4 – Resultados relativos à primeira repetição do experimento para o aço ABNT 1040 usinado a 475 m/min.

| T (s) | $V_{B\ Max}$ (mm) | s | Ra (μm) | s | F_c (N) | S | F_f (N) | s | F_f/F_c | s |
|-------|-------------------|------|----------------------|------|-----------|-------|-----------|-------|-----------|------|
| 1,00 | 0,07 | 0,01 | 2,49 | 0,07 | 280,60 | 20,49 | 146,97 | 8,63 | 0,52 | 0,05 |
| 2,00 | 0,11 | 0,02 | 2,68 | 0,03 | 279,14 | 17,33 | 146,64 | 10,31 | 0,53 | 0,05 |
| 3,00 | 0,13 | 0,01 | 2,54 | 0,06 | 292,47 | 17,75 | 153,11 | 9,59 | 0,52 | 0,05 |
| 4,00 | 0,15 | 0,01 | 2,64 | 0,02 | 283,63 | 15,51 | 151,56 | 7,80 | 0,53 | 0,04 |
| 5,00 | 0,16 | 0,01 | 2,73 | 0,05 | 288,71 | 20,46 | 150,29 | 12,04 | 0,52 | 0,06 |
| 6,00 | 0,18 | 0,01 | 2,61 | 0,05 | 286,63 | 13,99 | -- | -- | -- | -- |
| 7,00 | 0,21 | 0,01 | 2,68 | 0,03 | 295,59 | 16,19 | 153,09 | 11,69 | 0,52 | 0,05 |
| 8,00 | 0,21 | 0,00 | 2,97 | 0,07 | 290,64 | 15,62 | 159,31 | 11,12 | 0,55 | 0,05 |
| 9,00 | -- | -- | -- | -- | -- | -- | -- | -- | -- | -- |
| 10,00 | 0,21 | 0,01 | 3,39 | 0,06 | 297,74 | 21,96 | 157,30 | 9,12 | 0,53 | 0,05 |
| 11,00 | 0,21 | 0,01 | 4,12 | 0,23 | 297,47 | 16,78 | 157,03 | 10,99 | 0,53 | 0,05 |
| 12,00 | -- | -- | -- | -- | -- | -- | -- | -- | -- | -- |
| 13,00 | 0,22 | 0,01 | 6,32 | 0,06 | 295,07 | 14,72 | 163,06 | 8,34 | 0,55 | 0,04 |
| 14,00 | 0,22 | 0,00 | 7,77 | 0,15 | 297,73 | 24,84 | 152,62 | 14,85 | 0,51 | 0,07 |
| 15,00 | 0,22 | 0,01 | 8,78 | 0,01 | 308,21 | 16,53 | 156,40 | 8,43 | 0,51 | 0,04 |
| 16,00 | 0,25 | 0,01 | 9,15 | 0,08 | 306,49 | 28,61 | 155,55 | 16,31 | 0,51 | 0,07 |
| 17,00 | 0,26 | 0,01 | 10,00 | 0,24 | 305,70 | 21,43 | -- | -- | -- | -- |
| 18,00 | 0,28 | 0,01 | 12,73 | 1,01 | 315,76 | 14,34 | 180,06 | 8,35 | 0,57 | 0,04 |
| 19,00 | 0,29 | 0,01 | 14,54 | 0,44 | 320,79 | 14,70 | 189,85 | 7,79 | 0,59 | 0,04 |

Tabela 9.5 – Resultados relativos à segunda repetição do experimento para o aço ABNT 1040 usinado a 475 m/min.

| T (s) | $V_{B\ Max}$ (mm) | s | Ra (μm) | s | F_c (N) | s | F_f (N) | s | F_f/F_c | s |
|-------|-------------------|------|----------------------|------|-----------|-------|-----------|-------|-----------|------|
| 1,00 | 0,08 | 0,00 | 2,05 | 0,07 | 274,84 | 17,56 | 139,66 | 7,78 | 0,51 | 0,04 |
| 2,00 | 0,11 | 0,00 | 2,28 | 0,03 | 283,56 | 12,22 | 154,98 | 11,98 | 0,55 | 0,05 |
| 3,00 | 0,13 | 0,00 | 2,38 | 0,06 | 284,33 | 17,63 | 145,21 | 11,46 | 0,51 | 0,05 |
| 4,00 | 0,14 | 0,00 | 2,92 | 0,02 | 282,55 | 16,63 | 156,43 | 12,70 | 0,55 | 0,06 |
| 5,00 | 0,14 | 0,00 | 3,08 | 0,05 | 300,30 | 23,23 | 160,57 | 14,35 | 0,53 | 0,06 |
| 6,00 | 0,14 | 0,00 | 3,03 | 0,05 | 302,16 | 17,64 | 162,46 | 11,75 | 0,54 | 0,05 |
| 7,00 | 0,15 | 0,00 | 3,13 | 0,03 | 287,07 | 20,75 | 164,14 | 9,40 | 0,57 | 0,05 |
| 8,00 | 0,16 | 0,00 | 3,05 | 0,07 | 302,26 | 18,74 | 174,29 | 12,33 | 0,58 | 0,05 |
| 9,00 | 0,16 | 0,00 | 3,12 | 0,04 | 301,27 | 11,93 | 132,90 | 9,86 | 0,44 | 0,04 |
| 10,00 | 0,16 | 0,01 | 3,15 | 0,06 | 301,78 | 21,39 | 150,27 | 9,13 | 0,50 | 0,05 |
| 11,00 | 0,18 | 0,00 | 3,10 | 0,23 | 298,09 | 23,98 | 157,97 | 8,82 | 0,53 | 0,05 |
| 12,00 | 0,18 | 0,00 | 3,30 | 0,20 | 311,63 | 16,62 | 153,39 | 13,02 | 0,49 | 0,05 |
| 13,00 | 0,18 | 0,00 | 3,38 | 0,06 | 318,84 | 16,30 | 160,25 | 11,27 | 0,50 | 0,04 |
| 14,00 | 0,18 | 0,01 | 3,44 | 0,15 | 311,91 | 17,85 | 170,78 | 11,59 | 0,55 | 0,05 |
| 15,00 | 0,19 | 0,00 | 3,61 | 0,01 | 310,29 | 14,06 | 159,97 | 6,38 | 0,52 | 0,03 |
| 16,00 | 0,20 | 0,01 | 3,66 | 0,08 | 317,35 | 16,51 | 165,88 | 9,03 | 0,52 | 0,04 |
| 17,00 | 0,20 | 0,00 | 3,74 | 0,24 | 309,95 | 17,51 | 162,11 | 9,88 | 0,52 | 0,04 |
| 18,00 | 0,20 | 0,00 | 4,40 | 1,01 | 309,75 | 18,79 | 158,45 | 7,10 | 0,51 | 0,04 |
| 19,00 | 0,21 | 0,00 | 4,58 | 0,44 | 316,48 | 14,52 | 172,07 | 8,59 | 0,54 | 0,04 |
| 20,00 | 0,23 | 0,00 | 3,99 | 1,34 | 312,37 | 14,35 | 166,68 | 8,43 | 0,53 | 0,04 |
| 21,00 | 0,25 | 0,00 | 3,81 | -- | 310,71 | 20,36 | 152,45 | 9,27 | 0,49 | 0,04 |
| 22,00 | 0,25 | 0,00 | 7,02 | -- | 336,21 | 13,69 | 160,27 | 18,72 | 0,48 | 0,06 |
| 23,00 | 0,32 | 0,00 | 8,60 | -- | 329,41 | 13,80 | 174,07 | 15,39 | 0,53 | 0,05 |
| 24,00 | -- | -- | -- | -- | 366,36 | 20,67 | 218,45 | 12,71 | 0,60 | 0,05 |

Tabela 9.6 – Resultados relativos à terceira repetição do experimento para o aço ABNT 1040 usinado a 475 m/min.

| T (s) | $V_{B\ Max}$ (mm) | s | Ra (μm) | s | F_c (N) | s | F_f (N) | s | F_f/F_c | s |
|-------|-------------------|------|----------------------|------|-----------|-------|-----------|-------|-----------|------|
| 1,00 | 0,09 | 0,01 | 1,88 | 0,03 | 282,69 | 22,94 | 143,45 | 9,04 | 0,51 | 0,05 |
| 2,00 | 0,11 | 0,00 | 1,80 | 0,05 | 289,96 | 23,91 | 161,67 | 10,48 | 0,56 | 0,06 |
| 3,00 | 0,12 | 0,00 | 1,66 | 0,02 | 296,77 | 23,14 | 133,94 | 11,81 | 0,45 | 0,05 |
| 4,00 | 0,14 | 0,01 | 1,72 | 0,07 | 284,93 | 15,67 | 150,08 | 11,97 | 0,53 | 0,05 |
| 5,00 | 0,15 | 0,00 | 1,94 | 0,10 | 288,12 | 20,97 | 149,40 | 8,40 | 0,52 | 0,05 |
| 6,00 | 0,15 | 0,00 | 1,91 | 0,03 | 303,85 | 28,02 | 160,81 | 11,01 | 0,53 | 0,06 |
| 7,00 | 0,16 | 0,00 | 2,12 | 0,06 | 296,99 | 32,70 | 159,06 | 12,08 | 0,54 | 0,07 |
| 8,00 | 0,17 | 0,01 | 2,28 | 0,02 | 302,53 | 20,84 | 168,85 | 10,79 | 0,56 | 0,05 |
| 9,00 | 0,18 | 0,00 | 2,31 | 0,01 | 299,68 | 20,45 | 163,44 | 11,21 | 0,55 | 0,05 |
| 10,00 | 0,19 | 0,01 | 2,46 | 0,03 | 299,81 | 21,91 | 174,52 | 8,36 | 0,58 | 0,05 |
| 11,00 | 0,20 | 0,01 | 2,40 | 0,04 | 309,84 | 24,49 | 183,26 | 11,16 | 0,59 | 0,06 |
| 12,00 | 0,20 | 0,00 | 2,57 | 0,03 | 317,76 | 32,53 | 178,57 | 9,35 | 0,56 | 0,06 |
| 13,00 | 0,21 | 0,01 | 2,66 | 0,07 | 319,28 | 30,69 | 181,09 | 16,04 | 0,57 | 0,07 |
| 14,00 | 0,22 | 0,00 | 2,87 | 0,05 | 317,14 | 27,85 | 174,75 | 11,14 | 0,55 | 0,06 |
| 15,00 | 0,22 | 0,01 | 3,21 | 0,46 | 318,33 | 19,20 | 163,46 | 11,20 | 0,51 | 0,05 |
| 16,00 | 0,24 | 0,00 | 3,16 | 0,08 | 325,21 | 21,38 | 180,29 | 10,75 | 0,55 | 0,05 |
| 17,00 | 0,24 | 0,00 | 3,31 | 0,08 | 313,64 | 18,17 | 179,32 | 12,61 | 0,57 | 0,05 |
| 18,00 | 0,26 | 0,00 | 3,43 | 0,12 | 327,13 | 18,76 | 172,29 | 8,29 | 0,53 | 0,04 |
| 19,00 | 0,26 | 0,01 | 3,69 | 0,10 | 315,77 | 23,85 | 165,87 | 8,39 | 0,53 | 0,05 |
| 20,00 | 0,27 | 0,00 | 3,91 | 0,08 | 356,83 | 23,73 | 219,11 | 8,67 | 0,61 | 0,05 |
| 21,00 | 0,28 | 0,00 | 4,22 | 0,14 | -- | -- | -- | -- | -- | -- |
| 22,00 | 0,28 | 0,00 | 4,56 | 0,11 | -- | -- | -- | -- | -- | -- |
| 23,00 | 0,29 | 0,00 | 4,98 | 0,26 | -- | -- | -- | -- | -- | -- |
| 24,00 | 0,29 | 0,00 | 9,21 | 0,17 | -- | -- | -- | -- | -- | -- |
| 25,00 | 0,32 | 0,01 | 10,43 | 2,80 | -- | -- | -- | -- | -- | -- |

Tabela 9.7 – Resultados relativos à primeira repetição do experimento para o aço ABNT 1040 usinado a 525 m/min.

| T (s) | $V_{B\ Max}$ (mm) | s | Ra (μm) | s | F_c (N) | s | F_f (N) | s | F_f/F_c | s |
|-------|-------------------|------|----------------------|------|-----------|-------|-----------|-------|-----------|------|
| 1,00 | 0,08 | 0,01 | 1,73 | 0,06 | 286,07 | 20,25 | 154,97 | 7,18 | 0,54 | 0,05 |
| 2,00 | 0,10 | 0,01 | 1,79 | 0,03 | 292,84 | 15,15 | 146,80 | 7,21 | 0,50 | 0,04 |
| 3,00 | 0,13 | 0,01 | 2,09 | 0,03 | 294,38 | 19,40 | 144,76 | 8,99 | 0,49 | 0,04 |
| 4,00 | 0,13 | 0,01 | 2,19 | 0,06 | 303,52 | 19,65 | 153,38 | 9,91 | 0,51 | 0,05 |
| 5,00 | 0,14 | 0,01 | 2,35 | 0,02 | 295,42 | 22,69 | 153,89 | 6,67 | 0,52 | 0,05 |
| 6,00 | 0,14 | 0,01 | 2,62 | 0,01 | 303,01 | 19,95 | 172,16 | 10,21 | 0,57 | 0,05 |
| 7,00 | 0,16 | 0,01 | 2,81 | 0,05 | 310,15 | 15,22 | 180,39 | 8,57 | 0,58 | 0,04 |
| 8,00 | 0,20 | 0,01 | 3,23 | 0,06 | 307,63 | 18,31 | 180,44 | 7,80 | 0,59 | 0,04 |
| 9,00 | 0,22 | 0,01 | 4,07 | 0,38 | 299,86 | 18,67 | 165,81 | 9,94 | 0,55 | 0,05 |
| 10,00 | 0,21 | 0,01 | 3,82 | 0,35 | 321,73 | 18,94 | 181,35 | 8,72 | 0,56 | 0,04 |
| 11,00 | 0,24 | 0,01 | 4,92 | 0,04 | 322,38 | 15,34 | 184,04 | 9,07 | 0,57 | 0,04 |
| 12,00 | 0,25 | 0,00 | 6,01 | 0,01 | 313,84 | 14,95 | 186,23 | 9,43 | 0,59 | 0,04 |
| 13,00 | 0,26 | 0,01 | 6,57 | 0,23 | 320,28 | 25,67 | 188,00 | 11,34 | 0,59 | 0,06 |
| 14,00 | 0,28 | 0,01 | 7,24 | 0,04 | 349,17 | 17,88 | 168,60 | 13,56 | 0,48 | 0,05 |
| 15,00 | 0,30 | 0,01 | 8,85 | 0,83 | -- | -- | -- | -- | -- | -- |

Tabela 9.8 – Resultados relativos à segunda repetição do experimento para o aço ABNT 1040 usinado a 525 m/min.

| T (s) | $V_{B\ Max}$ (mm) | s | Ra (μm) | s | F_c (N) | s | F_f (N) | s | F_f/F_c | s |
|-------|-------------------|------|----------------------|------|-----------|-------|-----------|-------|-----------|------|
| 1,00 | 0,09 | 0,00 | 1,87 | 0,01 | 262,80 | 16,28 | 123,07 | 7,44 | 0,47 | 0,04 |
| 2,00 | 0,10 | 0,01 | 1,78 | 0,06 | 283,67 | 19,44 | 156,48 | 10,11 | 0,55 | 0,05 |
| 3,00 | 0,13 | 0,01 | 1,70 | 0,09 | 285,05 | 15,29 | 154,94 | 9,22 | 0,54 | 0,04 |
| 4,00 | 0,15 | 0,01 | 1,83 | 0,03 | 298,14 | 17,28 | 173,13 | 10,59 | 0,58 | 0,05 |
| 5,00 | 0,16 | 0,01 | 1,87 | 0,02 | 300,08 | 17,10 | 182,34 | 8,25 | 0,61 | 0,04 |
| 6,00 | 0,17 | 0,00 | 1,76 | 0,02 | 310,32 | 17,81 | 183,21 | 10,42 | 0,59 | 0,05 |
| 7,00 | 0,18 | 0,01 | 2,01 | 0,09 | 316,60 | 17,09 | 191,55 | 8,68 | 0,61 | 0,04 |
| 8,00 | 0,18 | 0,01 | 2,36 | 0,03 | 318,97 | 19,12 | 218,81 | 10,35 | 0,69 | 0,05 |
| 9,00 | 0,19 | 0,01 | 2,56 | 0,06 | 332,31 | 14,67 | 224,27 | 12,81 | 0,67 | 0,05 |
| 10,00 | 0,20 | 0,01 | 2,83 | 0,05 | 351,39 | 19,63 | 211,87 | 15,09 | 0,60 | 0,05 |
| 11,00 | 0,24 | 0,01 | 3,74 | 0,07 | -- | -- | -- | -- | -- | -- |
| 12,00 | 0,25 | 0,00 | 3,42 | 0,03 | -- | -- | -- | -- | -- | -- |
| 13,00 | 0,27 | 0,00 | 4,81 | 0,16 | -- | -- | -- | -- | -- | -- |
| 14,00 | 0,30 | 0,01 | 4,97 | 0,33 | -- | -- | -- | -- | -- | -- |

Tabela 9.9 – Resultados relativos à terceira repetição do experimento para o aço ABNT 1040 usinado a 525 m/min.*

| T (s) | $V_{B\ Max}$ (mm) | s | Ra (μm) | s | F_c (N) | s | F_f (N) | s | F_f/F_c | s |
|-------|-------------------|------|----------------------|------|-----------|----|-----------|-------|-----------|----|
| 1,00 | 0,09 | 0,01 | 2,18 | 0,02 | -- | -- | 150,58 | 15,77 | -- | -- |
| 2,00 | 0,13 | 0,01 | 2,56 | 0,05 | -- | -- | 145,35 | 19,39 | -- | -- |
| 3,00 | 0,14 | 0,00 | 2,09 | 0,03 | -- | -- | 152,49 | 10,65 | -- | -- |
| 4,00 | 0,15 | 0,01 | 2,35 | 0,06 | -- | -- | 164,50 | 12,40 | -- | -- |
| 5,00 | 0,19 | 0,01 | 2,93 | 0,07 | -- | -- | 168,15 | 12,83 | -- | -- |
| 6,00 | 0,22 | 0,00 | 3,45 | 0,08 | -- | -- | 173,01 | 8,48 | -- | -- |
| 7,00 | 0,24 | 0,00 | 3,99 | 0,12 | -- | -- | 173,66 | 15,87 | -- | -- |
| 8,00 | 0,29 | 0,01 | 7,97 | 0,03 | -- | -- | 175,60 | 7,44 | -- | -- |
| 9,00 | 0,32 | 0,01 | 5,64 | 0,07 | -- | -- | 174,00 | 15,57 | -- | -- |
| 10,00 | -- | -- | 3,70 | 0,01 | -- | -- | 173,33 | 7,29 | -- | -- |
| 11,00 | -- | -- | -- | -- | -- | -- | 148,22 | 8,68 | -- | -- |
| 12,00 | -- | -- | -- | -- | -- | -- | 164,52 | 8,76 | -- | -- |
| 13,00 | -- | -- | -- | -- | -- | -- | 168,12 | 8,82 | -- | -- |
| 14,00 | -- | -- | -- | -- | -- | -- | 180,19 | 10,82 | -- | -- |

Tabela 9.10 – Resultados relativos à primeira repetição do experimento para o aço ABNT 1045 usinado a 355 m/min.

| T (s) | $V_{B_{Max}}$ (mm) | s | Ra (μm) | s | F_c (N) | s | F_f (N) | s | F_f/F_c | s |
|-------|--------------------|------|----------------------|------|-----------|-------|-----------|-------|-----------|------|
| 0,92 | 0,09 | 0,01 | 2,12 | 0,02 | 198,91 | 8,35 | 152,47 | 25,69 | 0,77 | 0,13 |
| 1,84 | 0,11 | 0 | 2,14 | 0,02 | 226,76 | 25,78 | 156,95 | 23,73 | 0,69 | 0,13 |
| 2,76 | 0,11 | 0,01 | 2,14 | 0,07 | 229,16 | 30,27 | 145,77 | 25,46 | 0,64 | 0,14 |
| 3,68 | 0,12 | 0 | 2,14 | 0,03 | 249,26 | 22,92 | 166,81 | 24,98 | 0,67 | 0,12 |
| 4,6 | 0,14 | 0,01 | 2,17 | 0,02 | 259,46 | 6,66 | 168,85 | 24,33 | 0,65 | 0,10 |
| 5,52 | 0,14 | 0 | 2,19 | 0,03 | 260,8 | 9,92 | 171,89 | 30,11 | 0,66 | 0,12 |
| 6,44 | 0,15 | 0,01 | 2,23 | 0,03 | 260,03 | 13,78 | 175,52 | 27,11 | 0,68 | 0,11 |
| 7,36 | 0,16 | 0,01 | 2,2 | 0,09 | 283,63 | 25,84 | 173,38 | 24,06 | 0,61 | 0,10 |
| 8,28 | 0,16 | 0 | 1,97 | 0,03 | 270,79 | 10,67 | 181,71 | 25,45 | 0,67 | 0,10 |
| 9,2 | 0,17 | 0,01 | 1,83 | 0,06 | 302,14 | 24,8 | 178,28 | 26,09 | 0,59 | 0,10 |
| 10,12 | 0,17 | 0,01 | 1,85 | 0,02 | 286,93 | 5,28 | 187,99 | 37,01 | 0,66 | 0,13 |
| 11,04 | 0,18 | 0,01 | 1,95 | 0,02 | 251,38 | 39,52 | 166 | 46,07 | 0,66 | 0,21 |
| 11,96 | 0,18 | 0,01 | 2,05 | 0,09 | 260,31 | 50,73 | 190,37 | 53,11 | 0,73 | 0,25 |
| 12,88 | 0,19 | 0,01 | 2,12 | 0,04 | 297,25 | 8,5 | 178,06 | 25,46 | 0,6 | 0,09 |
| 13,81 | 0,2 | 0,01 | 2,15 | 0,08 | 311,84 | 8,17 | 180,53 | 27,82 | 0,58 | 0,09 |
| 14,73 | 0,21 | 0 | 2,37 | 0,02 | 295,78 | 13,92 | 188,1 | 27,36 | 0,64 | 0,10 |
| 15,65 | 0,21 | 0,01 | 2,44 | 0,03 | 298,63 | 8,19 | 188,75 | 25,11 | 0,63 | 0,09 |
| 16,57 | 0,22 | 0,01 | 2,46 | 0,06 | 307,11 | 8,46 | 184,6 | 25,43 | 0,6 | 0,08 |
| 17,49 | 0,23 | 0 | 2,55 | 0,02 | 311,72 | 9,11 | 188,95 | 24,29 | 0,61 | 0,08 |
| 18,41 | 0,23 | 0 | 2,58 | 0,06 | 315,92 | 52,03 | 193,48 | 25,81 | 0,61 | 0,13 |
| 19,33 | 0,25 | 0,01 | 2,63 | 0,03 | 316,17 | 13,53 | 198,58 | 27,01 | 0,63 | 0,09 |
| 20,25 | 0,26 | 0,01 | 2,76 | 0,03 | 320,61 | 8,32 | 208,99 | 25,06 | 0,65 | 0,08 |
| 21,17 | 0,26 | 0 | 2,82 | 0,03 | 279,76 | 15,31 | 204,31 | 26,08 | 0,73 | 0,10 |
| 22,09 | 0,27 | 0 | 2,9 | 0,01 | 286,98 | 34,71 | 217,08 | 27,58 | 0,76 | 0,13 |
| 23,01 | 0,27 | 0,01 | 2,9 | 0,02 | 287,59 | 21,28 | 219,99 | 25,6 | 0,76 | 0,11 |
| 23,93 | 0,28 | 0 | 3,04 | 0,04 | 289,26 | 10,04 | 215,68 | 28,1 | 0,75 | 0,10 |
| 26,69 | 0,28 | 0,01 | 2,76 | 0,07 | 287,95 | 25,56 | 244,77 | 33,51 | 0,85 | 0,14 |

Tabela 9.11 – Resultados relativos à segunda repetição do experimento para o aço ABNT 1045 usinado a 355 m/min.**

| T (s) | $V_{B \text{ Max}}$ (mm) | s | Ra (μm) | S | F_c (N) | s | F_f (N) | s | F_f/F_c | s |
|-------|--------------------------|------|----------------------|------|-----------|----|-----------|----|-----------|----|
| 0,88 | 0,1 | 0,01 | 2,13 | 0,05 | -- | -- | -- | -- | -- | -- |
| 1,76 | 0,11 | 0,01 | 2,18 | 0,09 | -- | -- | -- | -- | -- | -- |
| 2,63 | 0,12 | 0 | 2,1 | 0,02 | -- | -- | -- | -- | -- | -- |
| 3,51 | 0,13 | 0 | 1,71 | 0,07 | -- | -- | -- | -- | -- | -- |
| 4,39 | 0,15 | 0 | 1,85 | 0,08 | -- | -- | -- | -- | -- | -- |
| 5,27 | 0,17 | 0,01 | 1,68 | 0,05 | -- | -- | -- | -- | -- | -- |
| 6,15 | 0,17 | 0 | 1,61 | 0,04 | -- | -- | -- | -- | -- | -- |
| 7,02 | 0,17 | 0,01 | 1,56 | 0,03 | -- | -- | -- | -- | -- | -- |
| 7,9 | 0,17 | 0,01 | 1,52 | 0,06 | -- | -- | -- | -- | -- | -- |
| 8,78 | 0,18 | 0 | 1,48 | 0,06 | -- | -- | -- | -- | -- | -- |
| 9,66 | 0,19 | 0,01 | 1,47 | 0,01 | -- | -- | -- | -- | -- | -- |
| 10,53 | 0,2 | 0 | 1,41 | 0,05 | -- | -- | -- | -- | -- | -- |
| 11,41 | 0,2 | 0 | 1,43 | 0,03 | -- | -- | -- | -- | -- | -- |
| 12,29 | 0,22 | 0,01 | 1,57 | 0,07 | -- | -- | -- | -- | -- | -- |
| 13,17 | 0,22 | 0 | 1,63 | 0,01 | -- | -- | -- | -- | -- | -- |
| 14,05 | 0,22 | 0,01 | 1,71 | 0,07 | -- | -- | -- | -- | -- | -- |
| 14,92 | 0,23 | 0,01 | 1,63 | 0,09 | -- | -- | -- | -- | -- | -- |
| 15,8 | 0,23 | 0,01 | 1,85 | 0,04 | -- | -- | -- | -- | -- | -- |
| 16,68 | 0,26 | 0 | 1,77 | 0,08 | -- | -- | -- | -- | -- | -- |
| 17,56 | 0,26 | 0 | 2,2 | 0,12 | -- | -- | -- | -- | -- | -- |
| 18,44 | 0,27 | 0 | 2,21 | 0,07 | -- | -- | -- | -- | -- | -- |
| 19,31 | 0,27 | 0 | 2,31 | 0,03 | -- | -- | -- | -- | -- | -- |
| 20,19 | 0,29 | 0 | 2,29 | 0,15 | -- | -- | -- | -- | -- | -- |
| 21,07 | 0,3 | 0 | 2,47 | 0,09 | -- | -- | -- | -- | -- | -- |
| 21,95 | 0,3 | 0,01 | 2,42 | 0,06 | -- | -- | -- | -- | -- | -- |
| 22,82 | 0,31 | 0 | 2,62 | 0,14 | -- | -- | -- | -- | -- | -- |
| 23,7 | 0,31 | 0,01 | 2,5 | 0,07 | -- | -- | -- | -- | -- | -- |
| 24,58 | 0,35 | 0,01 | 2,86 | 0,2 | -- | -- | -- | -- | -- | -- |

Tabela 9.12 – Resultados relativos à terceira repetição do experimento para o aço ABNT 1045 usinado a 355 m/min.

| T (s) | V _{B Max} (mm) | S | Ra (μm) | s | F _c (N) | s | F _f (N) | s | F _f /F _c | s |
|-------|-------------------------|------|---------|------|--------------------|-------|--------------------|-------|--------------------------------|------|
| 0,83 | 0,08 | 0 | 2,23 | 0,03 | -- | -- | -- | -- | -- | -- |
| 1,67 | 0,1 | 0,01 | 2,36 | 0,04 | -- | -- | -- | -- | -- | -- |
| 2,5 | 0,13 | 0,01 | 2,29 | 0,08 | -- | -- | -- | -- | -- | -- |
| 3,33 | 0,13 | 0,01 | 2,18 | 0,15 | -- | -- | -- | -- | -- | -- |
| 4,16 | 0,15 | 0 | 1,41 | 0,02 | 303,6 | 5,56 | 165,04 | 23,38 | 0,54 | 0,08 |
| 5 | 0,15 | 0 | 1,37 | 0,12 | 309,17 | 42,27 | 175,13 | 23,56 | 0,57 | 0,11 |
| 5,83 | 0,16 | 0,01 | 1,42 | 0,06 | 314,88 | 13,71 | 181,57 | 24,57 | 0,58 | 0,08 |
| 6,66 | 0,17 | 0,01 | 1,7 | 0,04 | 321,52 | 32,06 | 175,56 | 25,83 | 0,55 | 0,10 |
| 7,49 | 0,18 | 0 | 1,82 | 0,04 | 306,62 | 26,95 | 183,37 | 24,84 | 0,6 | 0,10 |
| 8,33 | 0,19 | 0,01 | 1,93 | 0,02 | 317,64 | 22,17 | 185,07 | 24,78 | 0,58 | 0,09 |
| 9,16 | 0,2 | 0,01 | 1,98 | 0,21 | 292,63 | 15,31 | 184,85 | 25,54 | 0,63 | 0,09 |
| 9,99 | 0,24 | 0 | 2,05 | 0,07 | 311,54 | 9,08 | 194,17 | 26,08 | 0,62 | 0,09 |
| 10,82 | -- | -- | -- | -- | -- | -- | -- | -- | -- | -- |
| 11,66 | 0,25 | 0,01 | 2,01 | 0,06 | 315,95 | 12,81 | 198,35 | 25,38 | 0,63 | 0,08 |
| 12,49 | 0,25 | 0,01 | 2,17 | 0,05 | 327,54 | 18,71 | 211,09 | 25,3 | 0,64 | 0,09 |
| 13,32 | 0,25 | 0 | 2,25 | 0,05 | 313,78 | 4,11 | 197,77 | 24,66 | 0,63 | 0,08 |
| 14,15 | 0,25 | 0 | 2,04 | 0,12 | 305,68 | 23,31 | 201,3 | 24,76 | 0,66 | 0,10 |
| 14,99 | 0,25 | 0 | 2,25 | 0,17 | 314,21 | 8,54 | 196,6 | 24,73 | 0,63 | 0,08 |
| 15,82 | 0,26 | 0,01 | 2,12 | 0,07 | 307,98 | 39,68 | 206,01 | 25,04 | 0,67 | 0,12 |
| 16,65 | 0,27 | 0 | 2,05 | 0,13 | 326,81 | 33,42 | 201,86 | 25,45 | 0,62 | 0,10 |
| 17,48 | 0,27 | 0 | 2,38 | 0,04 | 334,77 | 10,44 | 218,03 | 23,78 | 0,65 | 0,07 |
| 18,32 | 0,27 | 0,01 | 2,37 | 0,06 | 330,98 | 6,56 | 209,04 | 25,76 | 0,63 | 0,08 |
| 19,15 | 0,27 | 0 | 2,15 | 0,09 | 323,1 | 12,8 | 219 | 26,05 | 0,68 | 0,09 |
| 19,98 | 0,27 | 0,01 | 2,37 | 0,06 | 337,65 | 6,44 | 221,68 | 24,65 | 0,66 | 0,07 |
| 20,81 | 0,27 | 0 | 2,39 | 0,08 | 350,24 | 7,62 | 236,42 | 25,38 | 0,68 | 0,07 |
| 21,65 | 0,27 | 0,01 | 2,63 | 0,21 | 345,36 | 22,06 | 254,84 | 21,92 | 0,74 | 0,08 |
| 22,48 | 0,27 | 0 | 2,72 | 0,16 | 348,96 | 13,77 | 262,45 | 21,92 | 0,75 | 0,07 |
| 23,31 | -- | -- | -- | -- | -- | -- | -- | -- | -- | -- |
| 24,14 | 0,32 | 0 | 2,62 | 0,37 | 348,86 | 27,74 | 269,14 | 21,82 | 0,77 | 0,09 |
| 24,98 | 0,32 | 0,01 | 2,35 | 0,2 | 343,34 | 5,49 | 257,6 | 23,09 | 0,75 | 0,07 |
| 25,81 | -- | -- | -- | -- | -- | -- | -- | -- | -- | -- |
| 26,64 | 0,32 | 0 | 2,84 | 0,2 | 354,87 | 7,41 | 285,92 | 23,5 | 0,81 | 0,07 |
| 27,47 | 0,34 | 0,01 | 2,86 | 0,01 | 358,22 | 9,05 | 284,17 | 22,56 | 0,79 | 0,07 |
| 28,31 | 0,34 | 0 | 3,03 | 0,35 | 350,45 | 24,4 | 293,81 | 22,58 | 0,84 | 0,09 |

Tabela 9.13 – Resultados relativos à primeira repetição do experimento para o aço ABNT 1045 usinado a 445 m/min.

| T (s) | V _{B Max} (mm) | s | Ra (μm) | s | F _c (N) | s | F _f (N) | s | F _f /F _c | s |
|-------|-------------------------|------|---------|-------|--------------------|-------|--------------------|-------|--------------------------------|------|
| 0,92 | 0,11 | 0,01 | 2,03 | 0,02 | 227,42 | 7,04 | 158,53 | 25,35 | 0,7 | 0,11 |
| 1,84 | 0,13 | 0,01 | 2,29 | 0,195 | 249,35 | 5,37 | 160,25 | 25,21 | 0,64 | 0,10 |
| 2,76 | 0,15 | 0,01 | 2,223 | 0,055 | 273,4 | 9,28 | 163,66 | 25,28 | 0,6 | 0,09 |
| 3,68 | 0,15 | 0,01 | 2,623 | 0,144 | 271,69 | 8,71 | 172,22 | 27,18 | 0,63 | 0,10 |
| 4,6 | 0,17 | 0,01 | 2,713 | 0,195 | 286,93 | 8,22 | 195,97 | 26,2 | 0,68 | 0,09 |
| 5,52 | 0,2 | 0,01 | 2,363 | 0,108 | 282,08 | 8,37 | 206,06 | 24,97 | 0,73 | 0,09 |
| 6,44 | 0,24 | 0 | 2,467 | 0,057 | 295,99 | 7,95 | 260,15 | 24,21 | 0,88 | 0,09 |
| 7,36 | 0,26 | 0 | 2,597 | 0,015 | 296,64 | 8,37 | 270,9 | 23,09 | 0,91 | 0,08 |
| 8,28 | 0,28 | 0,01 | 2,96 | 0,075 | 295,25 | 10,11 | 245,26 | 23,8 | 0,83 | 0,09 |

Tabela 9.14 – Resultados relativos à segunda repetição do experimento para o aço ABNT 1045 usinado a 445 m/min.**

| T (s) | $V_{B\ Max}$ (mm) | s | Ra (μm) | s | F_c (N) | s | F_f (N) | s | F_f/F_c | s |
|-------|-------------------|------|----------------------|-------|-----------|----|-----------|----|-----------|----|
| 0,88 | 0,11 | 0,01 | 2,21 | 0,036 | -- | -- | -- | -- | -- | -- |
| 1,76 | 0,13 | 0,01 | 2,23 | 0,035 | -- | -- | -- | -- | -- | -- |
| 2,63 | 0,14 | 0,01 | 2,49 | 0,056 | -- | -- | -- | -- | -- | -- |
| 3,51 | 0,16 | 0 | 2,877 | 0,142 | -- | -- | -- | -- | -- | -- |
| 4,39 | 0,18 | 0 | 2,583 | 0,176 | -- | -- | -- | -- | -- | -- |
| 5,27 | 0,2 | 0,01 | 2,543 | 0,042 | -- | -- | -- | -- | -- | -- |
| 6,15 | 0,21 | 0,01 | 2,687 | 0,152 | -- | -- | -- | -- | -- | -- |
| 7,02 | 0,24 | 0,01 | 3,007 | 0,061 | -- | -- | -- | -- | -- | -- |
| 7,9 | 0,28 | 0 | 3,103 | 0,04 | -- | -- | -- | -- | -- | -- |
| 8,78 | 0,29 | 0,01 | 3,533 | 0,04 | -- | -- | -- | -- | -- | -- |
| 9,66 | 0,31 | 0,01 | 3,867 | 0,116 | -- | -- | -- | -- | -- | -- |
| 10,53 | 0,39 | 0 | 4,65 | 0,08 | -- | -- | -- | -- | -- | -- |

Tabela 9.15 – Resultados relativos à terceira repetição do experimento para o aço ABNT 1045 usinado a 445 m/min.

| T (s) | $V_{B\ Max}$ (mm) | s | Ra (μm) | s | F_c (N) | s | F_f (N) | s | F_f/F_c | s |
|-------|-------------------|------|----------------------|-------|-----------|------|-----------|-------|-----------|------|
| 0,83 | 0,11 | 0,01 | 2,093 | 0,015 | 231,41 | 7,59 | 158,13 | 24,87 | 0,68 | 0,11 |
| 1,67 | 0,12 | 0,01 | 2,113 | 0,1 | 249,35 | 5,37 | 160,25 | 25,21 | 0,64 | 0,10 |
| 2,5 | 0,15 | 0,01 | 2,17 | 0,165 | 273,4 | 9,28 | 163,66 | 25,28 | 0,6 | 0,09 |
| 3,33 | 0,18 | 0,01 | 2,51 | 0,111 | 271,69 | 8,71 | 172,22 | 27,18 | 0,63 | 0,10 |
| 4,16 | 0,2 | 0,01 | 2,743 | 0,28 | 286,93 | 8,22 | 195,97 | 26,2 | 0,68 | 0,09 |
| 5 | 0,25 | 0 | 2,877 | 0,377 | 367,73 | 5,21 | 250,81 | 24,31 | 0,68 | 0,07 |
| 5,83 | 0,26 | 0,01 | 4,597 | 0,515 | 352,22 | 5,66 | 258,58 | 19,21 | 0,73 | 0,06 |
| 6,66 | 0,29 | 0 | 6,58 | 0,363 | 369,88 | 8,98 | 313,77 | 22,27 | 0,85 | 0,06 |
| 7,49 | 0,35 | 0,01 | 7,607 | 0,093 | 376,86 | 6,69 | 316,14 | 21,92 | 0,84 | 0,06 |

Tabela 9.16 – Resultados relativos à primeira repetição do experimento para o aço ABNT 1045 usinado a 535 m/min.

| T (s) | $V_{B\ Max}$ (mm) | s | Ra (μm) | s | F_c (N) | s | F_f (N) | s | F_f/F_c | s |
|-------|-------------------|------|----------------------|------|-----------|------|-----------|-------|-----------|------|
| 0,92 | 0,12 | 0,01 | 1,89 | 0,04 | 273,03 | 6,93 | 188,63 | 22,54 | 0,69 | 0,08 |
| 1,84 | 0,15 | 0,01 | 1,99 | 0,1 | 281,51 | 7,04 | 185,94 | 23,23 | 0,66 | 0,08 |
| 2,76 | 0,19 | 0 | 2,12 | 0,1 | 291,34 | 6,26 | 202,63 | 22,85 | 0,7 | 0,08 |
| 3,68 | 0,22 | 0,01 | 2,63 | 0,04 | 303,81 | 9,84 | 243,01 | 23,29 | 0,8 | 0,08 |
| 4,6 | 0,26 | 0 | 4,09 | 0,12 | 328,03 | 7,51 | 299,86 | 33,38 | 0,91 | 0,10 |
| 5,52 | 0,7 | 0 | 3,72 | 0,16 | -- | -- | -- | -- | -- | -- |

Tabela 9.17 – Resultados relativos à segunda repetição do experimento para o aço ABNT 1045 usinado a 535 m/min.**

| T (s) | $V_{B\ Max}$ (mm) | s | Ra (μm) | s | F_c (N) | s | F_f (N) | s | F_f/F_c | s |
|-------|-------------------|------|----------------------|------|-----------|----|-----------|----|-----------|----|
| 0,88 | 0,12 | 0,01 | 1,92 | 0,03 | -- | -- | -- | -- | -- | -- |
| 1,76 | 0,15 | 0,01 | 1,9 | 0,04 | -- | -- | -- | -- | -- | -- |
| 2,63 | 0,18 | 0 | 2,18 | 0,03 | -- | -- | -- | -- | -- | -- |
| 3,51 | 0,19 | 0,01 | 2,80333 | 0,05 | -- | -- | -- | -- | -- | -- |
| 4,39 | 0,4 | 0,01 | 4,15333 | 0,06 | -- | -- | -- | -- | -- | -- |

Tabela 9.18 – Resultados relativos à terceira repetição do experimento para o aço ABNT 1045 usinado a 535 m/min.***

| T (s) | $V_{B_{Max}}$ (mm) | s | Ra (μm) | s | F_c (N) | s | F_f (N) | s | F_f/F_c | s |
|-------|--------------------|------|----------------------|----|-----------|------|-----------|-------|-----------|------|
| 0,83 | 0,12 | 0,01 | -- | -- | 292,02 | 5,35 | 169,89 | 26,54 | 0,58 | 0,09 |
| 1,67 | 0,14 | 0,01 | -- | -- | 307,22 | 7,9 | 180,1 | 27,96 | 0,59 | 0,09 |
| 2,5 | 0,17 | 0 | -- | -- | 320,79 | 10,5 | 198,22 | 25,13 | 0,62 | 0,08 |
| 3,33 | 0,2 | 0,01 | -- | -- | 326,08 | 7,17 | 226,29 | 26,54 | 0,69 | 0,08 |
| 4,16 | 0,22 | 0 | -- | -- | 348,28 | 8,53 | 258,58 | 19,21 | 0,74 | 0,06 |

* Resultados de força de corte não disponíveis

** Resultados de força de corte e força de avanço não disponíveis

*** Resultados de rugosidade média não disponíveis

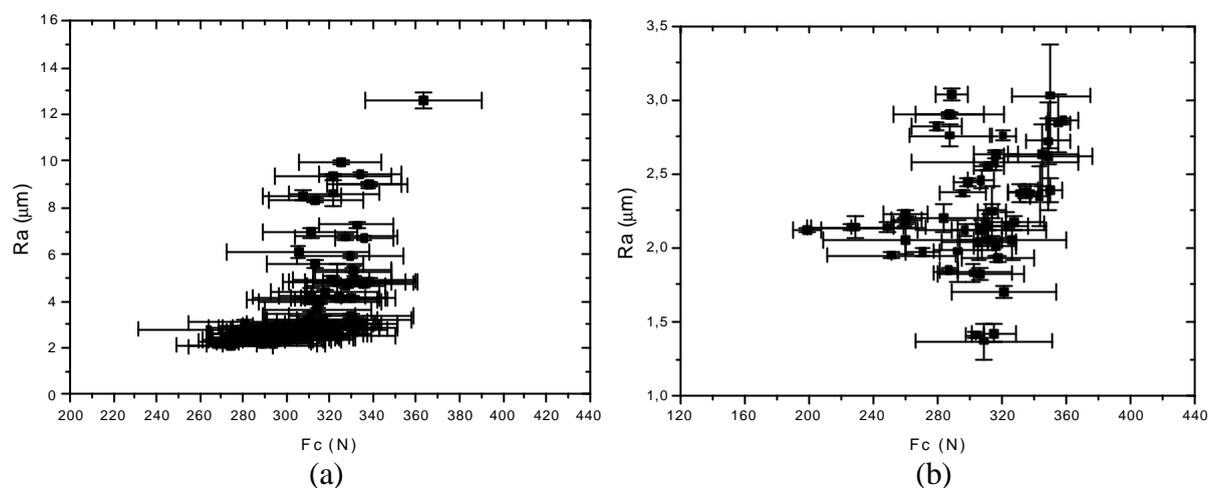
10. ANEXO 2 – RESULTADOS DE Ra EM FUNÇÃO DE F_c E F_f 

Figura 10.1 – Ra x F_c (a) para o aço ABNT 1040 usinado a 425 m/min; (b) para o aço ABNT 1045 usinado a 355 m/min.

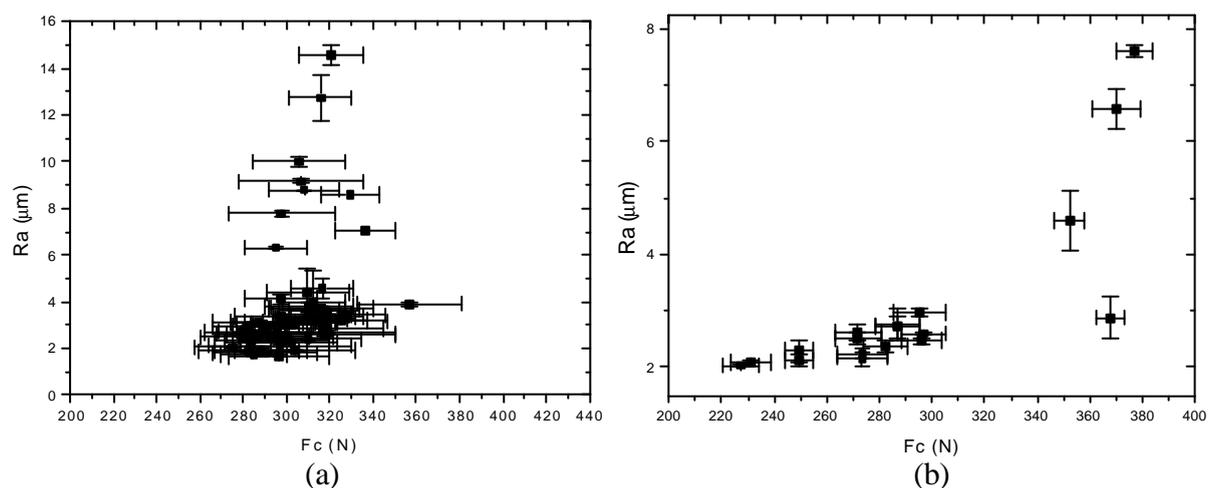


Figura 10.2 – Ra x F_c (a) para o aço ABNT 1040 usinado a 475 m/min; (b) para o aço ABNT 1045 usinado a 445 m/min.

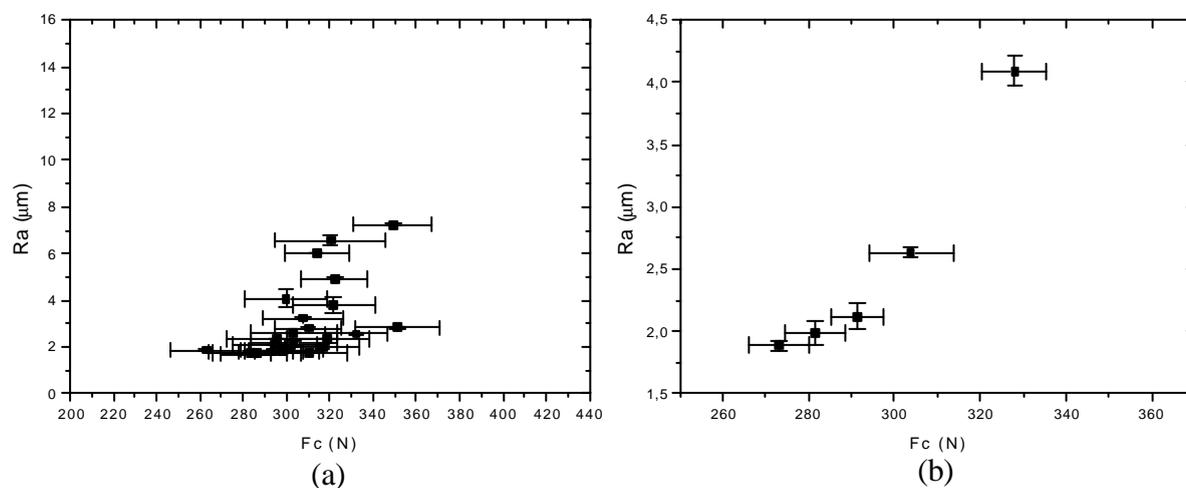


Figura 10.3 – Ra x F_c (a) para o aço ABNT 1040 usinado a 525 m/min; (b) para o aço ABNT 1045 usinado a 535 m/min.

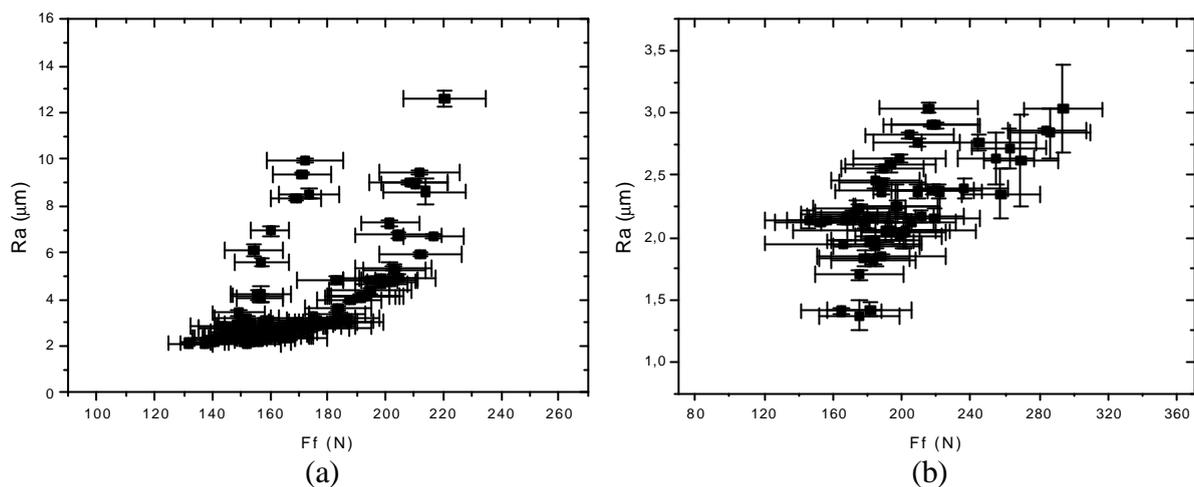


Figura 10.4 – $Ra \times F_f$ (a) para o aço ABNT 1040 usinado a 425 m/min; (b) para o aço ABNT 1045 usinado a 355 m/min.

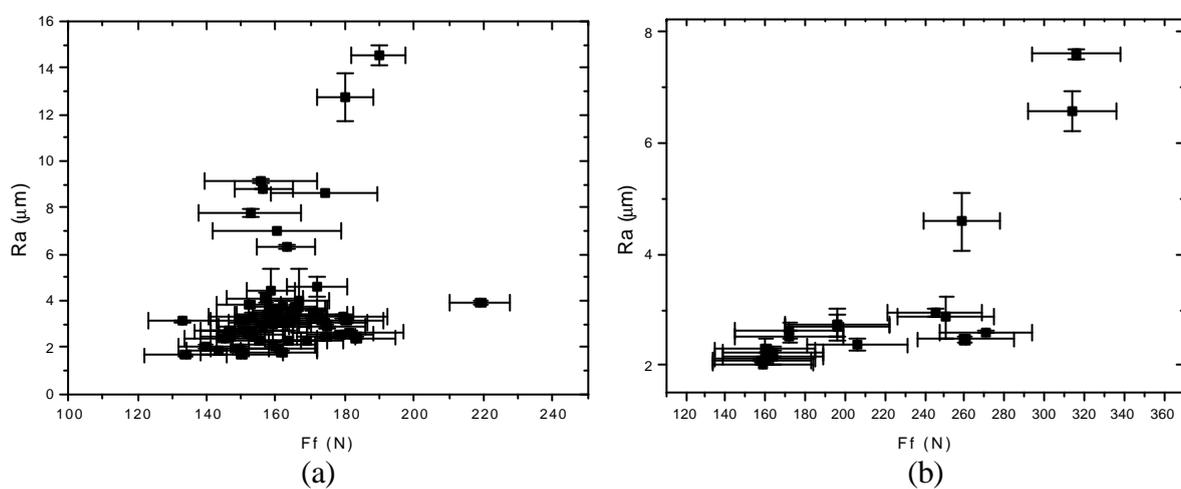


Figura 10.5 – $Ra \times F_f$ (a) para o aço ABNT 1040 usinado a 475 m/min; (b) para o aço ABNT 1045 usinado a 445 m/min.

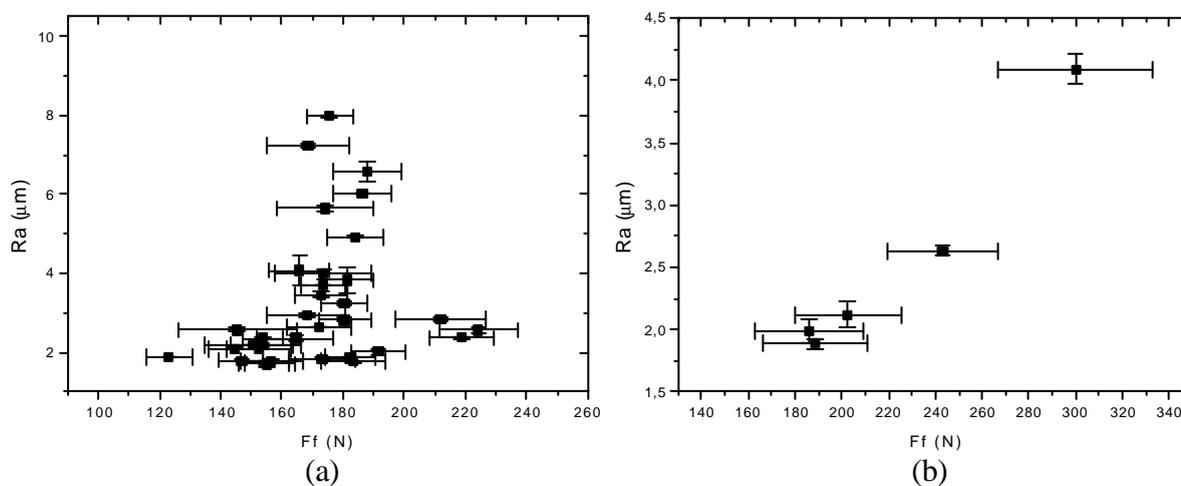


Figura 10.6 – $Ra \times F_f$ (a) para o aço ABNT 1040 usinado a 525 m/min; (b) para o aço ABNT 1045 usinado a 535 m/min.