

Teoria da Usinagem dos Materiais

Blucher

Álison Rocha Machado

Universidade Federal de Uberlândia – UFU

Alexandre Mendes Abrão

Universidade Federal de Minas Gerais – UFMG

Reginaldo Teixeira Coelho

Universidade de São Paulo – USP

Márcio Bacci da Silva

Universidade Federal de Uberlândia – UFU

Teoria da Usinagem dos Materiais

2.^a edição revista

Teoria da usinagem dos materiais

© 2011 Álisson Rocha Machado
Alexandre Mendes Abrão
Reginaldo Teixeira Coelho
Márcio Bacci da Silva

1ª reimpressão – 2012

Editora Edgard Blücher Ltda.

Foto da capa: Prof. Alexandre Mendes Abrão

Blucher

Rua Pedroso Alvarenga, 1245, 4º andar
04531-012 – São Paulo – SP – Brasil
Tel 55 11 3078-5366

contato@blucher.com.br

www.blucher.com.br

Segundo Novo Acordo Ortográfico, conforme 5. ed.
do *Vocabulário Ortográfico da Língua Portuguesa*,
Academia Brasileira de Letras, março de 2009.

É proibida a reprodução total ou parcial por quaisquer
meios, sem autorização escrita da Editora.

Todos os direitos reservados pela Editora
Edgard Blücher Ltda.

FICHA CATALOGRÁFICA

Teoria da usinagem dos materiais / Álisson Rocha
Machado... [et al.]. – 2. ed. – São Paulo:
Blucher, 2011.

Outros autores: Alexandre Mendes Abrão,
Reginaldo Teixeira Coelho, Márcio Bacci da Silva
Bibliografia.

ISBN 978-85-212-0606-4

1. Materiais – Usinagem. I. Machado, Álisson
Rocha. II. Abrão, Alexandre Mendes. III. Coelho,
Reginaldo Teixeira. IV. Silva, Márcio Bacci da.

11-05294

CDD-670

Índices para catálogo sistemático:

1. Materiais: Usinagem: Teoria: Tecnologia 670
2. Usinagem dos materiais: Teoria: Tecnologia 670

Simbologia usada

- a_e = penetração de trabalho (mm)
 a_f = penetração de avanço (mm)
 a_p = profundidade ou largura de usinagem (mm)
 A = área da seção transversal de corte, área aparente entre duas superfícies em contato (mm^2)
 A = fator de forma da fonte de calor, Equação (5.28)
 A_1 = fração de energia de deformação transformada em calor, Equação (5.15)
 A_R = área de contato real entre duas superfícies em contato (mm^2)
 b = largura de corte (mm)
 b_d = largura atuante do dressador (mm)
 C = custos (R\$); constante par ferramenta-peça – Equação (5.1)
 B_1 = proporção de calor que flui do plano de cisalhamento para a peça, Equação (5.15)
 B_2 = proporção de calor que flui da interface cavaco-ferramenta para o cavaco
 c = calor específico dos materiais (J/kg.K)
 d = diâmetro da peça (mm)
 d_s = diâmetro do rebolo (mm)
 d_w = diâmetro da peça sendo retificada (mm)
 D_c = diâmetro do cortador em fresamento (mm)
 e_n = extensão da parte plana do quebra-cavacos tipo II – cratera (mm)
 f = avanço (mm/rev)
 f_c = avanço de corte (mm)
 f_e = avanço efetivo (mm)
 f_z = avanço por dente (mm/dente)
 F = força tangencial sobre uma superfície em atrito (N)
 F_{ap} = força de apoio (N)
 F_c = força de corte (N)
 F_f = força de avanço (N)
 F_p = força passiva, ou de profundidade (N)
 F_n = força de compressão (N)

- F_N = projeção da força principal de corte sobre a superfície de saída da ferramenta na sua direção normal (N)
- F_{NZ} = projeção da força principal de corte sobre o plano de cisalhamento na sua direção normal (N)
- F_T = projeção da força principal de corte sobre a superfície de saída da ferramenta na sua direção tangencial (N)
- F_{TR} = força ativa (N)
- F_U = força resultante de usinagem (N)
- F_Z = projeção da força principal de corte sobre o plano de cisalhamento na sua direção tangencial (N)
- G = razão entre o volume de material usinado, Z_w , e o de rebolo consumido, Z_s
- h = espessura de corte (mm)
- h' = espessura do cavaco (mm)
- h_{eq} = espessura de corte equivalente em retificação (mm)
- h_m = espessura média de corte no fresamento (mm)
- I = corrente elétrica (A)
- I_{ef} = corrente eficaz (A)
- k = constante na Equação (3.20), condutividade térmica do material (W/m.K)
- k_s = pressão específica de corte (N/mm^2)
- k_{sl} = pressão específica de corte proporcional à espessura de corte ($N/mm^2 \cdot mm^{(1-2)}$)
- K = constante da Equação de Taylor
- l' = comprimento do traço do plano de cisalhamento sobre o plano de trabalho (mm)
- l_c = comprimento de contato ferramenta-cavaco sobre a superfície de saída, comprimento de contato rebolo-peça (mm)
- l_f = distância entre a aresta de corte e o centro do raio de curvatura do cavaco (mm)
- l_n = extensão do quebra-cavacos posição (mm)
- l_{st} = comprimento de contato dentro da zona de aderência na interface cavaco-ferramenta (mm)
- L = parâmetro de velocidade para a Equação (5.31)
- L_f = percurso de avanço (mm)
- L_c = percurso de corte (mm)
- L_e = percurso efetivo (mm)
- n = rotação da peça, ou ferramenta (rpm); característica do par ferramenta-peça, Equação (5.1)
- n_t = número de trocas de arestas de corte
- N = força normal sobre uma superfície em atrito (N)
- P = potência de retificação (W)
- P_{ap} = potência aparente (V.A)

- P_{at} = potência ativa (W)
 P_C = potência de corte (kW)
 P_f = potência de avanço (kW)
 P_{mC} = potência do motor de acionamento do eixo árvore (kW)
 P_{mf} = potência de acionamento do sistema de avanço (kW)
 P_{rt} = potência reativa (V.A)
 q = energia específica na forma de calor (W/m^2)
 Q = energia na forma de calor (W)
 r_ϵ = raio de ponta da ferramenta (mm)
 r_c = raio de curvatura do cavaco (mm)
 r_h = raio de cunha da ferramenta (mm)
 R = proporção de calor que flui da fonte do corpo semi-infinito, resistência elétrica (Ω)
 R_c = grau de recalque
 s = altura do quebra-cavacos postiço (mm)
 S = área do cavaco indeformado, ou da seção de corte (mm^2)
 S_d = passo de dressagem (mm/rev)
 S_R = relação entre a variação de resistência elétrica e a variação de comprimento
 S_Z = área do plano de cisalhamento (mm^2)
 t = tempo (s), altura do quebra-cavacos postiço (mm)
 T = tempo de vida de uma aresta de corte (min)
 T_o = temperatura ambiente ($^\circ C$)
 T_Z = temperatura devido ao cisalhamento ($^\circ C$)
 U_d = grau de recobrimento na dressagem de rebolos
 v_0 = velocidade de mínimo custo (m/min)
 v_c = velocidade de corte (m/min)
 v_{cav} = velocidade de saída do cavaco (m/min)
 v_e = velocidade efetiva (m/min)
 v_f = velocidade de avanço (mm/min)
 v_{maxp} = velocidade de máxima produção (m/min)
 v_s = velocidade do rebolo em retificação (m/s)
 v_w = velocidade da peça sendo retificada (mm/s)
 v_z = velocidade de cisalhamento (m/min)
 V = tensão elétrica (V)
 V_{ef} = tensão eficaz (V)
 $V_g, V_b, e V_p$ = volumes de abrasivos, ligantes e de poros, respectivamente (%)
 W = trabalho mecânico (W)
 z = número de aresta de corte da ferramenta
 Z = número de peças em um lote

- Z_s = volume de rebolo consumido (mm^3)
 Z_T = número de peças usinadas com uma aresta de corte no tempo de vida T
 Z_w = volume de material retificado (mm^3)
 $(1-z)$ = expoente da Equação de Kienzle
 α = difusividade térmica igual a $k/c\rho$ (m^2/s)
 α_o = ângulo de folga da ferramenta
 β_o = ângulo de cunha da ferramenta; razão entre as forças tangencial e normal sobre a superfície de saída da ferramenta
 β' = ângulo de atrito médio sobre a superfície de saída da ferramenta, sob ação do cavaco
 β_z = coeficiente de atrito interno sobre o plano de cisalhamento
 χ_r = ângulo de posição da ferramenta
 ΔY = espessura da lamela de cavaco (mm)
 ΔS = deformação por cisalhamento (mm)
 ε = deformação verdadeira
 ε_o = grau de deformação no cisalhamento
 ε_r = ângulo de ponta da ferramenta
 φ = ângulo da direção de avanço
 ϕ = ângulo de cisalhamento
 γ_o = ângulo de saída da ferramenta
 μ = coeficiente de atrito para o caso governado pelo modelo de Coulomb
 ρ = ângulo entre a força de usinagem F_U e a componente F_N ; densidade (kg/m^3); resistividade elétrica (Ω)
 σ_1 = tensão normal limite para transição entre o atrito seco de Coulomb e o atrito de cisalhamento do material mais fraco sem zona de transição (N/mm^2)
 σ_2 = tensão normal limite para transição entre o atrito seco de Coulomb e o atrito de cisalhamento do material mais fraco com zona de transição (N/mm^2)
 σ_c = tensão de compressão sobre a superfície de saída da ferramenta (N/mm^2)
 σ_{fav} = tensão normal média que atua na superfície de saída da ferramenta (N/mm^2)
 σ_z = tensão normal sobre ao plano de cisalhamento (N/mm^2)
 τ_{st} = tensão de cisalhamento limite para a proporcionalidade entre atrito seco e de cisalhamento (N/mm^2)
 τ_z = tensão de cisalhamento sobre o plano de cisalhamento (N/mm^2)
 ν = coeficiente de Poisson
 η = ângulo da direção efetiva de corte
 Θ = temperatura (K, $^\circ\text{C}$)
 λ_s = ângulo de inclinação da ferramenta

1	INTRODUÇÃO À TEORIA DA USINAGEM DOS MATERIAIS	15
1.1	Principais operações de usinagem	19
1.2	Grandezas físicas no processo de corte	27
1.2.1	Movimentos	27
1.2.2	Direções dos movimentos	28
1.2.3	Percursos da ferramenta na peça.....	30
1.2.4	Velocidades	30
1.2.5	Conceitos auxiliares	31
1.2.6	Grandezas de corte	33
1.2.7	Grandezas relativas ao cavaco	35
	Referências bibliográficas	37
2	GEOMETRIA DA FERRAMENTA DE CORTE.....	39
2.1	Definições	39
2.2	Sistemas de referência.....	42
2.2.1	Planos do sistema de referência da ferramenta.....	42
2.2.2	Ângulos do sistema de referência da ferramenta	48
2.3	Funções e influência dos principais ângulos da cunha cortante	53
2.4	Outros atributos da cunha cortante	54
	Referências bibliográficas	55
3	FORMAÇÃO DE CAVACOS.....	57
3.1	Corte ortogonal.	59
3.2	Relações cinemáticas e geométricas no corte ortogonal.....	61
3.3	Tipos de cavacos.....	66
3.3.1	Cavacos contínuos.....	67
3.3.2	Cavacos descontínuos	68

3.3.3	Cavacos segmentados	69
3.4	Formas de cavaco.....	71
3.5	Controle do cavaco.....	73
3.5.1	Quebra-cavacos postiço	75
3.5.2	Quebra-cavacos integral, tipo I: anteparo.....	75
3.5.3	Quebra-cavacos integral, tipo II: cratera.....	76
3.6	Interface ferramenta/cavaco.....	79
3.6.1	Atrito no corte de metais	81
3.6.2	Zona de aderência	85
3.6.3	Zona de escorregamento.....	87
3.6.4	Aresta postiça de corte (APC)	87
3.6.5	Influência das diferentes condições da interface nas variáveis do processo.....	88
	Referências bibliográficas	91
4	FORÇA E POTÊNCIA DE USINAGEM.....	93
4.1	Força de usinagem no corte oblíquo (tridimensional).....	93
4.2	Força de usinagem no corte ortogonal (bidimensional)	95
4.2.1	Tensões no plano de cisalhamento secundário.....	98
4.3	Determinação teórica do ângulo de cisalhamento.....	99
4.3.1	Teoria de Ernst e Merchant	99
4.3.2	Teoria de Lee e Shaffer	101
4.4	Determinação teórica da força de corte.....	106
4.4.1	Determinação teórica da pressão específica de corte no torneamento.	109
4.4.2	Determinação teórica da pressão específica de corte no fresamento.....	112
4.5	Determinação experimental da força de usinagem (métodos de medição)	114
4.5.1	Princípio de medição por extensômetros (<i>strain gauges</i>)	115
4.5.2	Princípio de medição por cristais piezoelétricos	120
4.6	Potência de usinagem	121
4.7	Medição de potência em usinagem	123
	Referências bibliográficas	127

5	TEMPERATURA NO PROCESSO DE USINAGEM	129
5.1	Temperatura na formação de cavacos: Modelo de Trigger E. Chao....	140
5.2	Temperatura na formação de cavacos: Modelo de Loewen e Shaw....	144
5.2.1	Temperatura no plano de cisalhamento (T_z).....	152
5.2.2	Temperatura na interface ferramenta/cavaco (T_p):.....	154
5.3	Temperatura na formação de cavacos: FEM (Método dos elementos finitos).....	159
5.4	Temperatura na formação de cavacos: estimativas experimentais ..	160
5.4.1	Termopares inseridos na ferramenta.	161
5.4.2	Termopar ferramenta/peça	164
5.4.3	Radiação infravermelha.	166
5.4.4	Vernizes termossensíveis.	167
5.4.5	Propriedades metalográficas.	168
5.4.6	Sais com diferentes temperaturas de fusão.....	170
5.4.7	Filmes depositados por PVD.....	171
	Referências bibliográficas	172
6	FLUIDOS DE CORTE	175
6.1	Funções dos fluidos de corte	176
6.2	Classificação dos fluidos de corte.....	179
6.2.1	Óleos	180
6.2.2	Emulsões.....	180
6.2.3	Soluções.....	181
6.3	Aditivos	182
6.4	Considerações a respeito da utilização de fluidos de corte	183
6.5	Direções de aplicação do fluido de corte	185
6.6	Métodos de aplicação dos fluidos de corte	186
6.7	Seleção do fluido de corte.....	188
6.7.1	Recomendações quanto ao material da peça.....	188
6.7.2	Recomendações quanto ao material da ferramenta	190
6.7.3	Recomendações quanto à operação de usinagem	191
	Referências bibliográficas	192
7	MATERIAIS PARA FERRAMENTAS DE CORTE.....	195
7.1	Aços-carbono e aços ligados.....	196
7.2	Aços rápidos	198

7.2.1	Aço rápido revestido	206
7.2.2	Aço rápido produzido pela metalurgia do pó.....	207
7.3	Ligas fundidas.....	208
7.4	Metal duro.....	211
7.4.1	Fabricação do metal duro	216
7.4.2	Metal duro revestido	219
7.5	Cermets.....	225
7.6	Cerâmicas	227
7.6.1	Cerâmica à base de Al_2O_3	230
7.6.2	Cerâmica à base de Si_3N_4	233
7.7	Diamante e nitreto cúbico de boro.....	235
7.8	Seleção de materiais para ferramentas de usinagem	241
	Referências bibliográficas	246
8	AVARIAS, DESGASTES E MECANISMOS DE DESGASTE	
	DAS FERRAMENTAS DE CORTE	251
8.1	Avárias nas ferramentas de corte.....	253
8.1.1	Avaria de origem térmica.....	254
8.1.2	Avárias de origem mecânica	262
8.2	Desgaste nas ferramentas de corte.....	266
8.3	Mecanismos de desgaste.....	271
8.3.1	Deformação plástica superficial por cisalhamento a altas temperaturas (Figura 8.19)	272
8.3.2	Deformação plástica da aresta de corte sob altas tensões de compressão (Figura 8.19).....	274
8.3.3	Difusão (Figura 8.19).....	276
8.3.4	Aderência e arrastamento: attrition (Figura 8.19).....	278
8.3.5	Abrasão (Figura 8.19).....	280
8.3.6	Desgaste de entalhe (Figura 8.19).....	282
8.4	Curva de vida das ferramentas	287
	Referências bibliográficas	293
9	INTEGRIDADE SUPERFICIAL.....	297
9.1	Rugosidade	299
9.1.1	Parâmetros para a quantificação da rugosidade.....	301

9.1.2	Cálculo da rugosidade no processo de torneamento.....	305
9.1.3	Cálculo da rugosidade para a operação de fresamento.....	306
9.1.4	Efeitos de alguns parâmetros de usinagem na rugosidade...	307
9.1.5	Medição da rugosidade	311
9.2	Alterações subsuperficiais	313
9.2.1	Alterações de natureza mecânica.....	313
9.2.2	Alterações de natureza metalúrgica.....	314
9.3	Avaliação da integridade superficial.....	314
9.3.1	Tensão residual.....	315
9.3.2	Fadiga.....	319
9.4	Influência dos parâmetros e da operação de usinagem sobre a integridade superficial.....	320
	Referências bibliográficas	323
10	CONDIÇÕES ECONÔMICAS DE CORTE	327
10.1	Cálculo da velocidade de máxima produção (V_{mxp}).....	328
10.2	Cálculo da velocidade econômica de corte (V_o).....	333
10.3	Intervalo de máxima eficiência (I_{mef}).....	338
	Referências bibliográficas	339
11	USINAGEM POR ABRASÃO	341
11.1	Grandezas físicas das operações de retificação	344
11.2	Rebolo	347
11.3	Mecanismo de corte na retificação	353
11.4	Dressagem	355
11.5	Forças e potência de retificação.....	358
11.6	Temperatura de retificação.....	360
11.7	Fluidos de corte.....	363
11.8	Operações especiais de retificação.....	364
11.8.1	Retificação <i>creep feed</i>	364
11.8.2	Retificação sem centros (<i>centerless</i>)	365
	Referências bibliográficas	367
12	ASPECTOS TECNOLÓGICOS E RECOMENDAÇÕES.....	369
12.1	Aços-carbono e ligados	372
12.2	Aços inoxidáveis	374
12.3	Ferro fundido (FoFo)	377

12.4 Ligas termorresistentes e superligas (HSTR, do inglês High Strength Thermal Resistant Superalloys).....	380
12.5 Compósitos	383
12.6 Materiais endurecidos	383
12.7 Efeitos de diversos elementos de liga na usinagem	385
Referências bibliográficas	387
APÊNDICE A1 – Valores dos coeficientes da equação de Kienzle para o Torneamento dos principais materiais metálicos (catálogo Sandvik, 2002.8)	389
APÊNDICE A2 – Valores dos coeficientes da equação de Kienzle para o Fresamento dos principais materiais metálicos (catálogo Sandvik 2002.2)	393

Até meados do século XVIII, o principal material utilizado para peças, em engenharia, era a madeira, salvo raras exceções, a qual era usinada com ferramentas de aço-carbono. Com a Revolução Industrial, novos e mais resistentes materiais apareceram, impulsionando o desenvolvimento dos aços-liga como ferramentas de corte. Mais tarde, a utilização da água e do vapor como fontes de energia impulsionaram a indústria metal-mecânica, já no final do século XVIII e início do século XIX, propiciando assim o aparecimento de máquinas-ferramentas responsáveis pela fabricação de outras variedades de máquinas e instrumentos em substituição ao trabalho humano em diversas atividades. A primeira contribuição relevante foi apresentada por John Wilkinson, em 1774 (McGEOUGH, 1988), ao construir uma máquina para mandrilar cilindros de máquinas a vapor, os quais antes eram usinados com equipamentos originalmente projetados para mandrilar canhões e que, portanto, não eram capazes de assegurar a exatidão exigida.

Os materiais a princípio utilizados na fabricação de máquinas a vapor eram o ferro fundido, o latão e o bronze, facilmente usinados com as ferramentas de aço-carbono temperado disponíveis na época. Ainda assim, eram necessários 27,5 dias de trabalho para mandrilar um dos cilindros de uma máquina de grande porte (TRENT, 1985).

Em 1797, Henry Maudslay desenvolveu o primeiro torno com avanço automático, permitindo a produção de roscas com passo definido. Após a mandriladora e o torno surgiu a plainadora e, em 1860, a retificadora. A primeira fresadora universal, desenvolvida por J. R. Brown, surgiu em 1862 e foi utilizada inicialmente para a produção de canais em brocas helicoidais. Outro desenvolvimento importante ocorreu em 1896, quando F. W. Fellows desenvolveu uma máquina capaz de produzir praticamente qualquer tipo de engrenagem.

Já no século XX surgiram produtos feitos de materiais mais duráveis e, conseqüentemente, mais difíceis de serem usinados. O advento das ferramentas de aço rápido, e mais tarde de carboneto de tungstênio, permitiu a usinagem de aços e de outros materiais metálicos com produtividade crescente, também fa-

vorecida pelos avanços tecnológicos no campo das máquinas-ferramentas, como o desenvolvimento de máquinas automáticas e, mais tarde, de máquinas comandadas numericamente (CN). Por fim, a partir da década de 1940, os processos não convencionais de usinagem passaram a ganhar importância pela capacidade de produzir peças de geometria complexa em materiais de difícil usinabilidade, garantindo assim acabamento de elevada qualidade e tolerâncias estreitas.

Segundo Kalpakjian (1995), em países industrializados, a atividade manufatureira responde por 20% a 30% do Produto Interno Bruto e serve de indicativo confiável do padrão de vida da população do país. Em um contexto mais amplo, a manufatura pode ser entendida como o processo de transformação de matérias-primas em produtos acabados, seguindo planos bem organizados em todos os aspectos. Dessa forma, os mais diversos bens de consumo são produzidos, desde um simples parafuso até uma aeronave comercial de grande porte (aproximadamente seis milhões de peças), passando pelo automóvel (cerca de quinze mil peças). Já o termo *fabricação* é empregado de forma mais restrita, limitando-se aos processos nele envolvidos.

Para se ter uma ideia dos fatores relacionados à atividade manufatureira, Kalpakjian (1995) usa o exemplo da produção de um simples artigo: o clipe. Primeiro ele deve ser projetado para atender ao seu requisito funcional: manter juntas várias folhas de papel. Para tanto, deve exercer força suficiente a fim de evitar o deslizamento de uma folha sobre a outra. Geralmente, é feito de arame de aço, embora hoje se encontrem no mercado cliques de plástico. O comprimento do arame necessário à sua fabricação é cortado e então dobrado várias vezes, para dar forma final ao produto. Por sua vez, o arame é feito por um processo de trefilação a frio, no qual a seção transversal de uma barra é reduzida ao passar por uma matriz (ou feira), a qual também confere algumas propriedades mecânicas ao material, como resistência mecânica e dureza. A barra, por sua vez, é obtida por processos como trefilação e extrusão de um lingote fundido. Portanto, a fabricação de um simples clipe envolve projeto, seleção de material adequado e de um método de fabricação para atender aos requisitos de funcionalidade do produto. As escolhas são feitas não somente com base em requisitos técnicos, mas também com base em considerações econômicas, visando minimizar os custos de produção para que o produto possa ser competitivo no mercado.

Nos processos de fabricação, geralmente haverá mais de um método que poderá ser empregado para produzir um determinado componente. A seleção de um método em particular vai depender de um grande número de fatores. Além disso, na maioria das vezes, o produto final é resultado de muitos processos

diferentes. Na seleção de processos, segundo Kalpakjian (1995), os seguintes fatores devem ser considerados:

- Tipo do material e suas propriedades.
- Propriedades finais desejadas.
- Tamanho, forma e complexidade do componente.
- Tolerâncias e acabamento superficial exigidos.
- Processo subsequente envolvido.
- Projeto e custo de ferramental; efeito do material na vida da ferramenta ou matriz.
- Sucata gerada e seu valor.
- Disponibilidade do equipamento e experiências operacionais.
- Tempo necessário para iniciar a produção.
- Número de partes requeridas e taxa de produção desejada.
- Custo total do processamento.

O engenheiro responsável deve ter, portanto, amplos conhecimentos dos processos e dos materiais envolvidos. É evidente que a fabricação de um produto, seja ele um clipe, uma lâmpada, uma calculadora ou um automóvel, além de conhecimentos de projeto, materiais e processos, requer também grande interação entre os diversos departamentos da empresa. Quanto mais complexo o produto, maior a necessidade de comunicação entre eles.

A Figura 1.1 mostra uma classificação dos processos de fabricação (FERRARESI, 1977), na qual se destaca a usinagem, objeto principal tratado neste livro. Outras maneiras de classificação também são encontradas na literatura, pode-se encontrar uma classificação mais ampla como processos de adição de material, remoção e sem alteração de massa. Outra por exemplo, divide em processos primários, secundário e de montagem. Ao observar essa figura, a seguinte definição de usinagem pode ser extraída: *processo de fabricação com remoção de cavaco*. Uma definição mais abrangente é a seguinte: *operação que ao conferir à peça forma, dimensões e acabamento, produz cavaco*. E por cavaco entende-se: *porção de material da peça retirada pela ferramenta e caracterizada por apresentar forma geométrica irregular*.

A usinagem é reconhecidamente o processo de fabricação mais popular do mundo, transformando em cavacos algo em torno de 10% de toda a produção de metais e empregando dezenas de milhões de pessoas (TRENT, 1985).

Apesar dessa popularidade, trata-se de um processo bastante imprevisível e a definição paradoxal que se segue relata com exatidão toda a sistemática que o envolve: *processo complexo e simples ao mesmo tempo, no qual se produzem peças removendo-se o excesso de material na forma de cavacos*. É um processo complexo devido às dificuldades em determinar as imprevisíveis condições ideais de corte. E simples porque, uma vez determinadas essas condições, o cavaco se forma corretamente, dispensando qualquer tipo de intervenção do operador. As condições ideais de corte são as capazes de produzir peças dentro de especificações de forma, tamanho e acabamento ao menor custo possível.

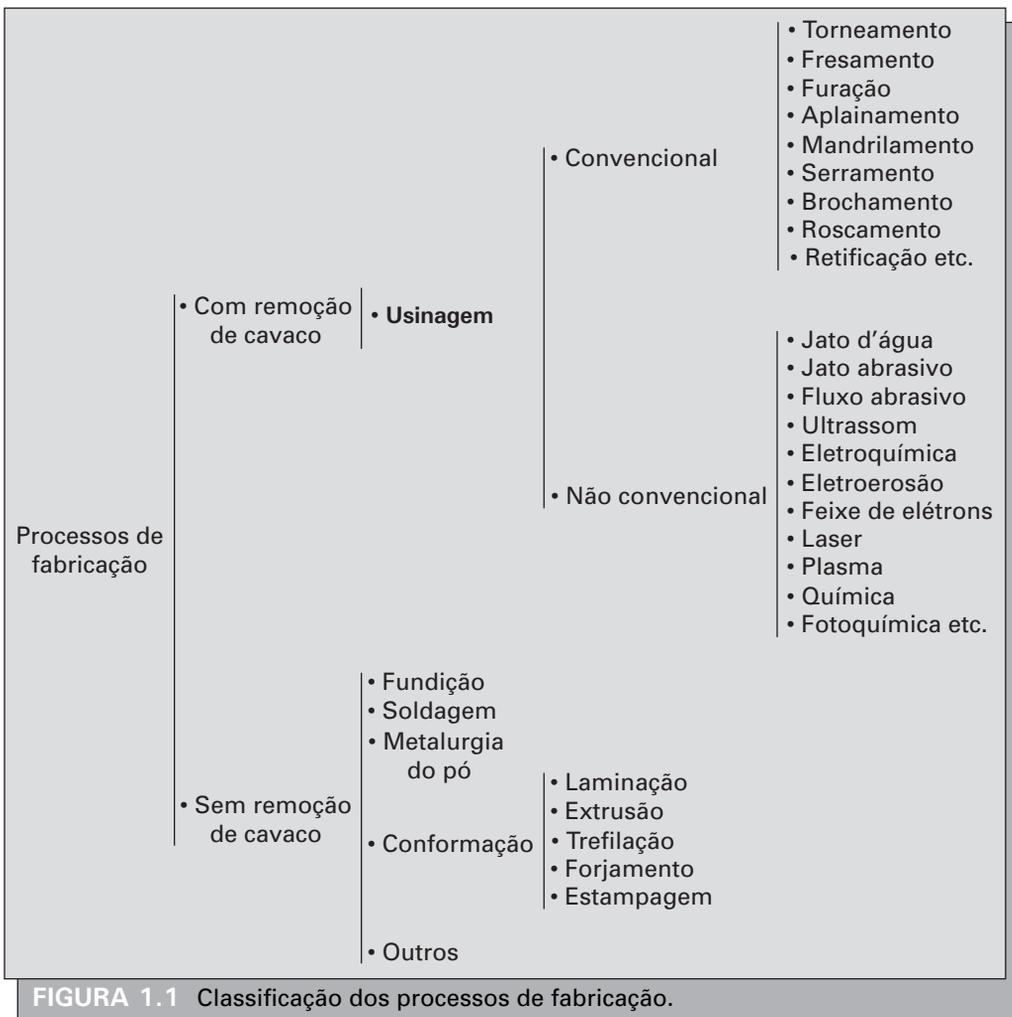


FIGURA 1.1 Classificação dos processos de fabricação.

A usinagem tem ainda a peculiaridade de ser um processo essencialmente prático e que envolve um elevado número de variáveis. Shaw (1984) afirma que é praticamente impossível prever o desempenho no corte dos metais. Entretanto, isso não significa que estudos detalhados dos processos de usinagem não têm valor. Cada ponto fundamental que é detalhadamente estudado e interpretado de maneira adequada contribui para o entendimento do processo, o procedimento mais próximo da capacidade de prever seu comportamento.

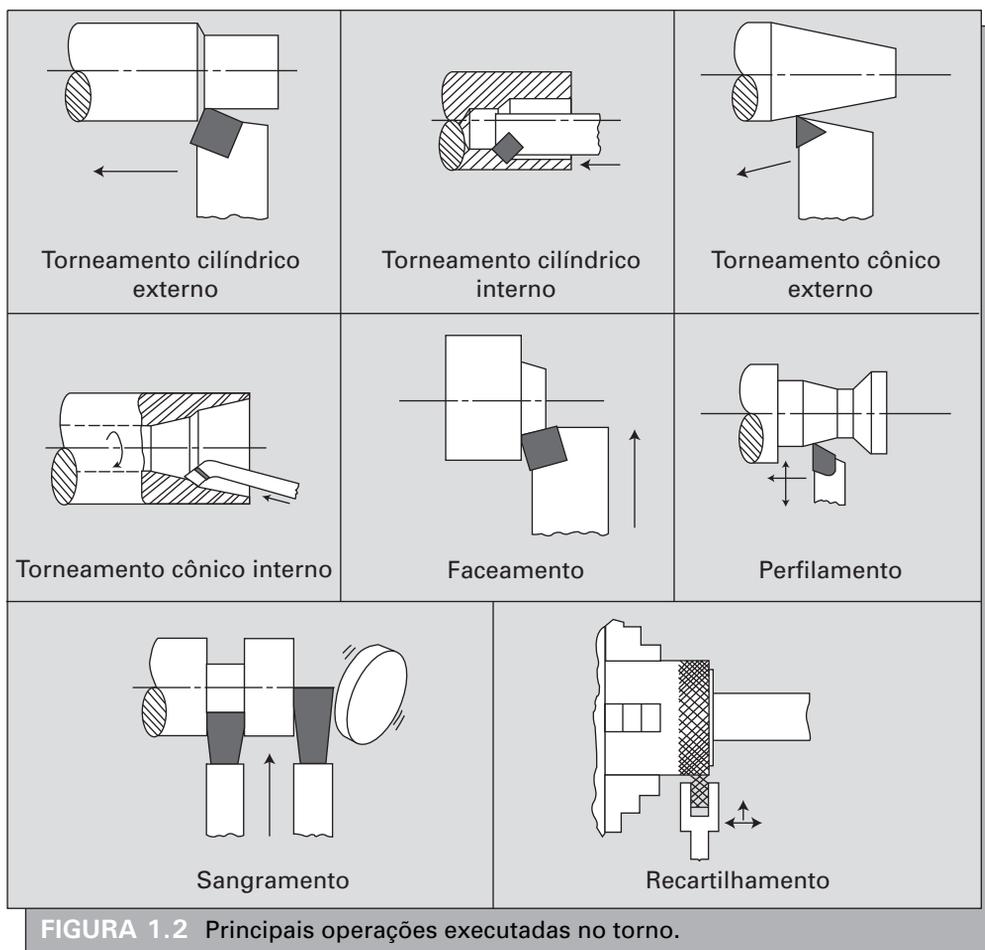
De acordo com Black (1995), a imprevisibilidade da usinagem se deve ao fato de esse ser o único processo de deformação plástica cuja única restrição é oferecida pela ferramenta de corte. Além disso, a usinagem envolve altas deformações combinadas com altas taxas de deformação. A variedade de opções para os parâmetros de entrada do processo resulta em infinitas combinações e há apenas três maneiras de lidar com tal complexidade: por meio da experiência adquirida por sucessivas tentativas e erros ao longo dos anos, além de comparações com situações análogas; por meio da experimentação, que é onerosa, demorada e restrita a uma determinada situação, não podendo ser generalizada; e por intermédio de modelos teóricos, que vão desde modelos matemáticos simplistas até sofisticados modelos numéricos. Em geral, nenhuma dessas abordagens é capaz de, sozinha, encontrar soluções satisfatórias, sendo recomendada a combinação de duas delas, ou mesmo das três abordagens.

1.1 PRINCIPAIS OPERAÇÕES DE USINAGEM

A seguir, as principais operações de usinagem convencional executadas com ferramentas de geometria definida são apresentadas e agrupadas de acordo com a máquina-ferramenta empregada. As operações de usinagem por abrasão, ou seja, realizadas com ferramenta sem geometria definida, serão tratadas posteriormente. É importante salientar que todas as operações apresentadas a seguir podem ser subdivididas em desbaste e acabamento. No desbaste, a principal preocupação é garantir elevada taxa de remoção de material, sendo, portanto, limitado pela potência da máquina-ferramenta. No acabamento, quando o sobremetal deixado pela operação de desbaste é removido, a qualidade final do componente é prioritária.

A Figura 1.2 mostra as principais operações realizadas no torno. Nesses casos, a peça gira em torno de seu eixo enquanto a ferramenta de corte realiza os movimentos de avanço longitudinal e/ou transversal. Essas operações são:

- Torneamento cilíndrico externo.
- Torneamento cilíndrico interno.
- Torneamento cônico externo.
- Torneamento cônico interno.
- Faceamento.
- Perfilamento.
- Sangramento.
- Recartilhamento.



As operações realizadas na furadeira são apresentadas na Figura 1.3. Aqui, a ferramenta gira e realiza o movimento de avanço, que pode ser manual ou automático. Normalmente, a qualidade de trabalho produzida pela operação de furação é inferior a IT11. Caso seja exigida uma qualidade superior, o alargamento deve ser executado.

- Furação.
- Furação com pré-furo.
- Furação escalonada.
- Furação de centro.
- Alargamento cilíndrico.
- Alargamento cônico.
- Rebaixamento.
- Ferramenta para trepanação.
- Furação profunda com broca canhão.

A operação de fresamento é reconhecida pela versatilidade na produção de geometrias diversas, além de garantir elevadas taxas de remoção de material, visto que a ferramenta (fresa) possui múltiplas arestas de corte. Nesse grupo de operações, a ferramenta gira enquanto a peça, presa à mesa, é responsável pelos movimentos de avanço longitudinal e transversal (Figura 1.4). Em situações especiais, a peça pode ficar estática enquanto a ferramenta realiza todos os movimentos.

- Fresamento tangencial (concordante ou discordante).
- Fresamento tangencial de canais ou de perfis.
- Fresamento de topo.
- Fresamento frontal.
- Fresamento com fresa de topo esférica.
- Fresamento de cavidades.

Além disso, o fresamento é o principal responsável pela fabricação de engrenagens. A Figura 1.5 ilustra os seguintes exemplos:

- Fresamento de engrenagens de dentes retos com fresa de perfil.
- Fresamento de engrenagens pelo processo Fellows.
- Fresamento de engrenagens cônicas helicoidais.
- Fresamento de engrenagens com par de fresas.
- Fresamento de engrenagens com fresa caracol.



FIGURA 1.3 Principais operações executadas na furadeira.



FIGURA 1.4 Principais operações executadas na fresadora.

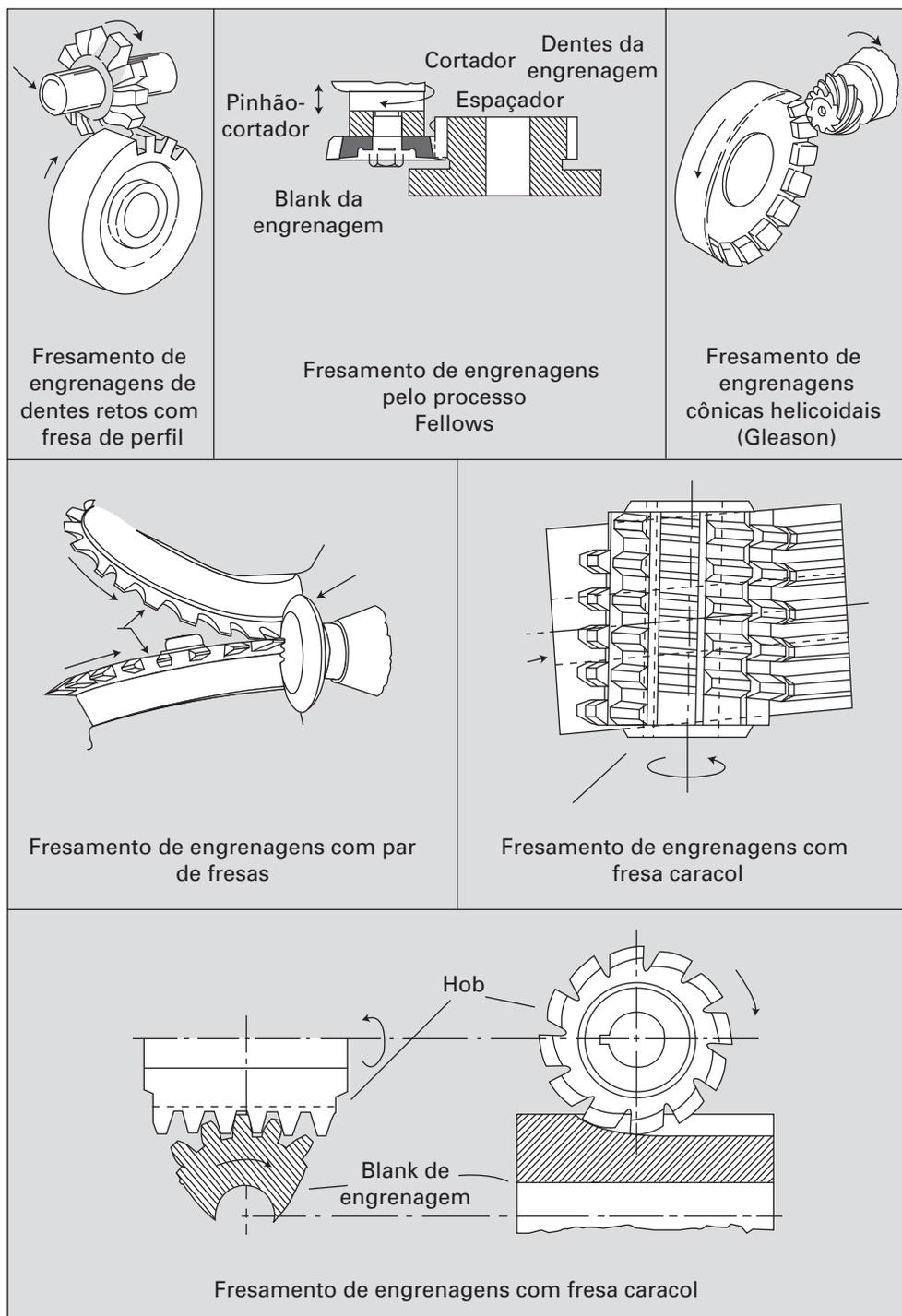
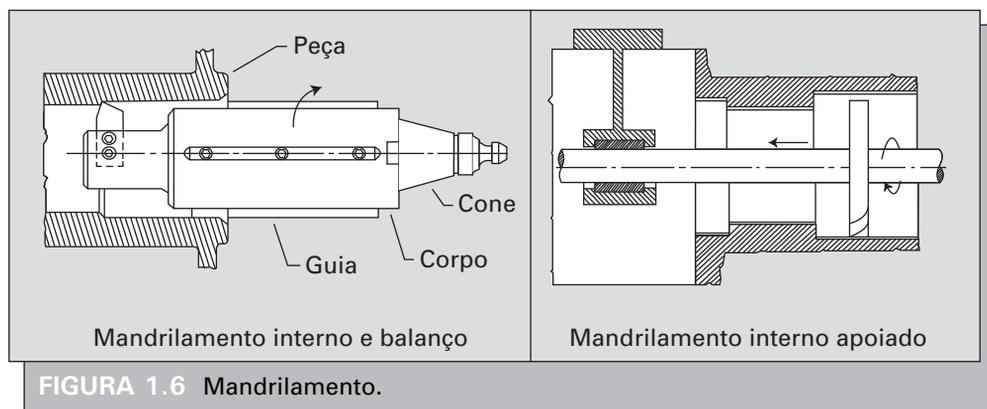


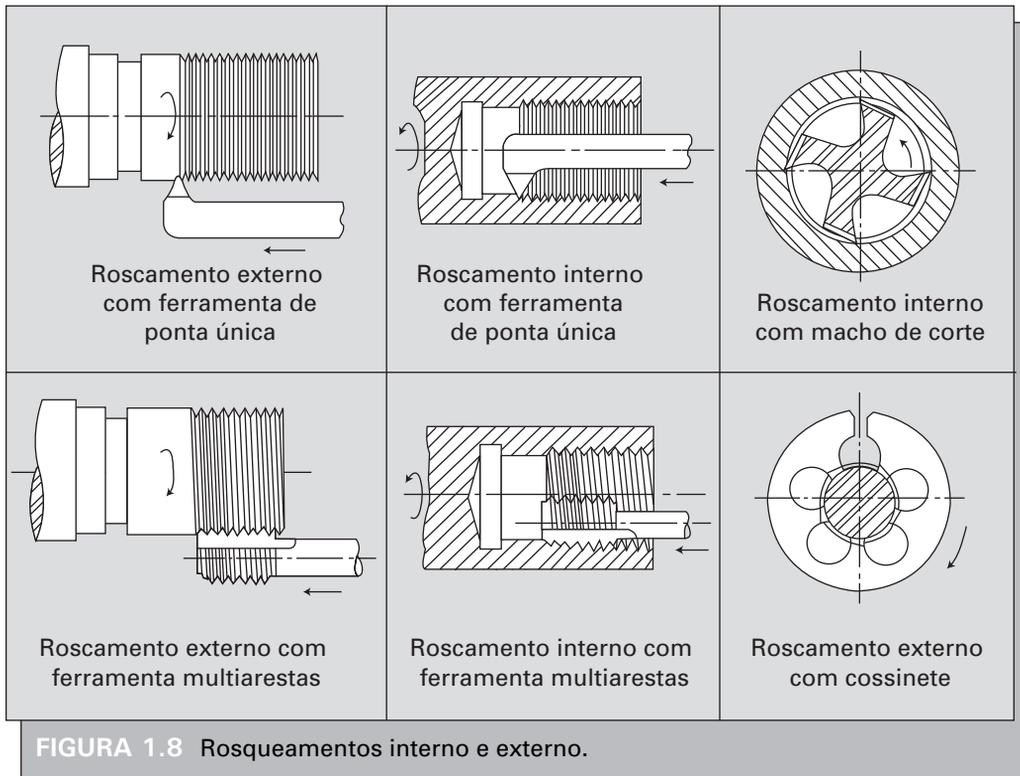
FIGURA 1.5 Exemplos de fresamento de engrenagens.

O mandrilamento é realizado em um equipamento específico (mandriladora), similar a uma fresadora de grande porte. Nessa operação, utilizada principalmente no acabamento interno de furos cilíndricos e com perfis especiais, a ferramenta é dotada dos movimentos de corte e avanço, enquanto a peça permanece estática (Figura 1.6). É particularmente interessante para a usinagem de peças de grandes dimensões e assimétricas.



O brochamento é comumente empregado quando se deseja produzir furos com formas diferentes da cilíndrica. A ferramenta (brocha) é tracionada e a passagem de dentes sucessivos provoca a mudança de forma de um furo inicial, para o perfil desejado. Elevada qualidade dimensional e geométrica pode ser conseguida em componentes produzidos em massa. Formas externas também podem ser produzidas por meio dessa operação. A Figura 1.7 ilustra as operações de brochamento interno e externo, bem como dá exemplos de peças produzidas através dessa operação.

A abertura de roscas é uma operação bastante diversificada e que pode ser realizada com o uso de dispositivos manuais ou por meio de máquinas-ferramentas (tornos, fresadoras, rosqueadeiras etc.), dependendo principalmente da taxa de produção esperada, mas também das dimensões da rosca. Roscas externas podem ser produzidas por cossinetes (conhecidos como tarraxas) ou por ferramentas de perfil único ou múltiplo (Figura 1.8). Já roscas internas podem ser produzidas utilizando machos ou ferramentas de perfil único ou múltiplo. A Figura 1.8 ilustra os seguintes exemplos:



1.2 GRANDEZAS FÍSICAS NO PROCESSO DE CORTE

O princípio usado em toda máquina-ferramenta para obter a superfície desejada é providenciar um movimento relativo apropriado entre a peça e a ferramenta, escolhida adequadamente. Assim, para o estudo da usinagem, é necessária a definição das grandezas físicas no processo de corte. A norma *NBR 6162 – Movimentos e Relações Geométricas na Usinagem dos Metais: Terminologia* trata justamente desses conceitos (ABNT, 1989). A seguir são apresentadas algumas definições básicas extraídas dessa norma.

Os conceitos se referem a um ponto genérico da aresta cortante (gume), dito “ponto de referência”. Nas ferramentas de barra, esse ponto é fixado na parte da aresta cortante próxima à ponta da ferramenta.

1.2.1 Movimentos

Os movimentos nas operações de usinagem são movimentos relativos entre a peça e a aresta cortante e a peça considerada estacionária. Podem-se

distinguir dois tipos de movimentos: os que causam diretamente a saída de cavaco e os que não tomam parte diretamente na sua retirada.

Movimentos que causam diretamente a saída do cavaco:

- *Movimento de corte*: realizado entre a peça e a aresta de corte, o qual, na ausência de movimento de avanço, produz somente uma única retirada de cavaco.
- *Movimento de avanço*: realizado entre a peça e a aresta de corte, o qual, com o movimento de corte, provoca a retirada contínua de cavaco.
- *Movimento efetivo*: resultante dos movimentos de corte e avanço, realizados ao mesmo tempo.

Movimentos que não causam diretamente a formação do cavaco:

- *Movimento de aproximação*: realizado entre a peça e a aresta de corte, por meio do qual ambas se aproximam antes da usinagem.
- *Movimento de ajuste*: realizado entre a peça e a aresta de corte para determinar a espessura de material a ser retirado.
- *Movimento de correção*: realizado entre a peça e a aresta de corte para compensar o desgaste da ferramenta, ou outra variação (térmica, por exemplo).
- *Movimento de recuo*: realizado entre a peça e a aresta de corte com o qual a ferramenta, após a usinagem, é afastada da peça.

1.2.2 Direções dos movimentos

Devem-se distinguir as direções dos movimentos que causam diretamente a retirada de cavaco:

- *Direção de corte*: direção instantânea do movimento de corte.
- *Direção de avanço*: direção instantânea do movimento de avanço.
- *Direção efetiva*: direção instantânea do movimento efetivo de corte.

Definições análogas são válidas para os movimentos que não causam diretamente a retirada de cavaco. As Figuras 1.9, 1.10 e 1.11 ilustram essas direções para o torneamento, a furação e o fresamento tangencial discordante, respectivamente.

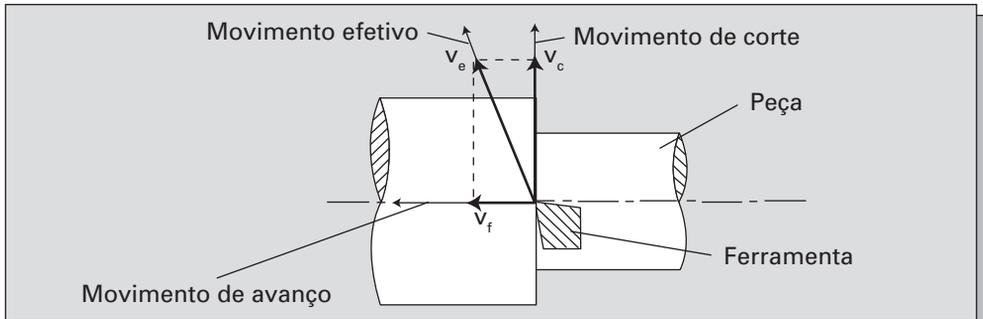


FIGURA 1.9 Direção dos movimentos de corte, de avanço e efetivo no torneamento.

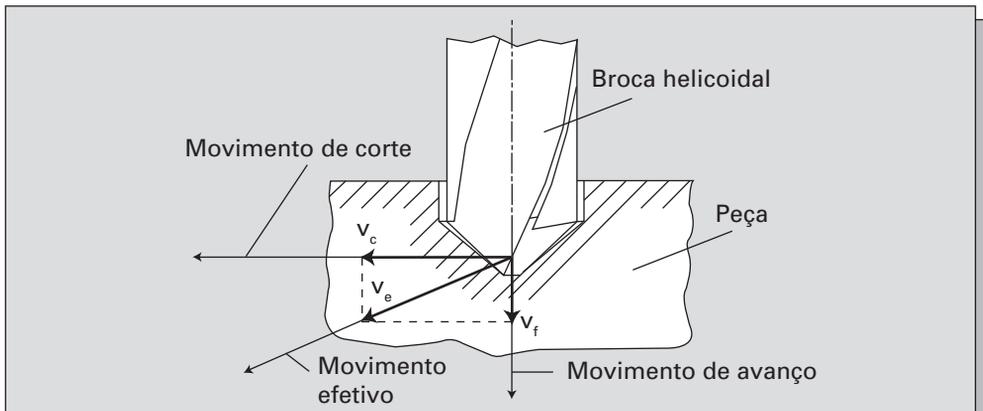


FIGURA 1.10 Direção dos movimentos de corte, de avanço e efetivo na furação.

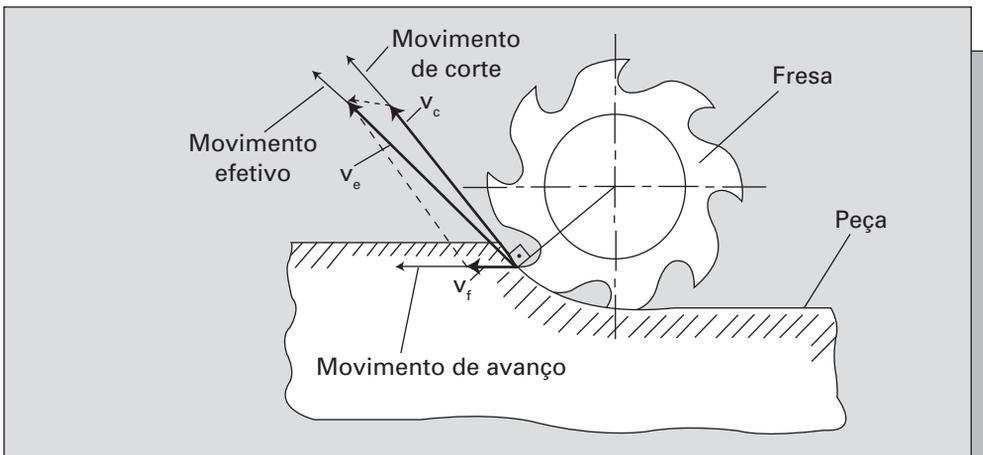
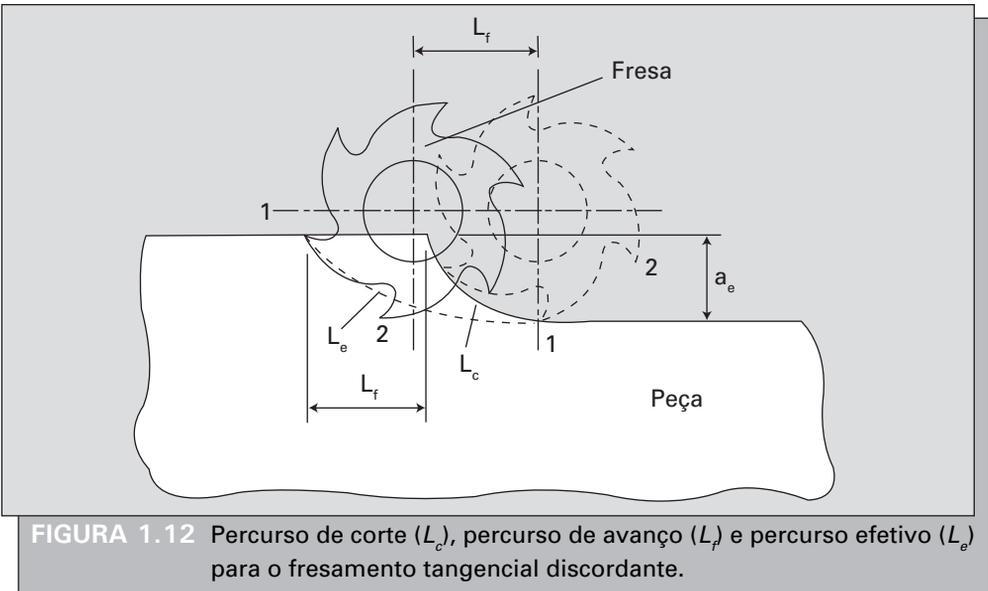


FIGURA 1.11 Direção dos movimentos de corte, de avanço e efetivo no fresamento tangencial discordante.

1.2.3 Percursos da ferramenta na peça

- *Percorso de corte* (L_c): é o espaço percorrido pelo ponto de referência da aresta cortante sobre a peça, segundo a direção de corte.
- *Percorso de avanço* (L_f): é o espaço percorrido pelo ponto de referência da aresta cortante sobre a peça, segundo a direção de avanço. Nos casos em que há movimento de avanço principal e lateral, devem-se distinguir os componentes do percurso de avanço.
- *Percorso efetivo* (L_e): é o espaço percorrido pelo ponto de referência da aresta cortante sobre a peça, segundo a direção efetiva do corte.

Definições análogas são válidas para os movimentos que não tomam parte diretamente na retirada de cavaco. A Figura 1.12 ilustra os percursos da ferramenta na operação de fresamento tangencial discordante.



1.2.4 Velocidades

Velocidade de corte (v_c) é a velocidade instantânea do ponto de referência da aresta cortante da ferramenta, segundo a direção e o sentido do corte. Para processos com movimentos de rotação, a velocidade de corte é calculada pela Equação 1.1, usando-se as unidades mais usuais em usinagem:

$$v_c = \frac{\pi \cdot d \cdot n}{1.000} \quad [\text{m/min}] \quad (1.1)$$

Onde:

d = diâmetro da peça ou da ferramenta em mm

n = número de rotações por minuto (rpm)

Velocidade de avanço (v_f) é a velocidade instantânea do ponto de referência da aresta cortante da ferramenta, segundo a direção e o sentido de avanço. É dada pela Equação 1.2:

$$v_f = f \cdot n \quad [\text{mm/min}] \quad (1.2)$$

Onde:

f = avanço em mm/rev (mm por revolução)

n = número de rotações por minuto

Velocidade efetiva de corte (v_e) é a velocidade instantânea do ponto de referência da aresta cortante da ferramenta, segundo a direção e o sentido efetivo do corte. É calculada vetorialmente como mostra a Equação 1.3:

$$\vec{v}_e = \vec{v}_c + \vec{v}_f \quad [\text{m/min}] \quad (1.3)$$

A seleção das velocidades de corte e de avanço (e, conseqüentemente, da velocidade efetiva) mais adequadas depende da operação de usinagem e dos materiais da ferramenta e da peça. Além destas, têm-se também as velocidades de aproximação, de ajuste, de correção e de recuo. Embora não tomem parte na retirada de cavaco, as velocidades de aproximação e recuo são particularmente importantes em máquinas comandadas numericamente, visto que valores elevados para tais velocidades contribuem para a redução do tempo total de fabricação da peça.

1.2.5 Conceitos auxiliares

Para melhor compreender os conceitos relacionados às diferentes operações de usinagem é necessário compreender o conceito de plano de trabalho (P_{fe}): esse plano, passando pelo ponto de referência, contém as direções de corte

e de avanço. Nele se realizam os movimentos que tomam parte na retirada de cavaco (Figuras 1.13 e 1.14). No plano de trabalho é possível identificar e definir os ângulos da direção de avanço e da direção efetiva de corte:

- *Ângulo da direção de avanço* (φ): formado entre a direção de avanço e a direção de corte. Nem sempre a direção de avanço é perpendicular à direção de corte, assim, por exemplo, no fresamento, esse ângulo varia durante o corte.
- *Ângulo da direção efetiva de corte* (η): formado entre a direção efetiva de corte e a direção de corte.

A partir da Figura 1.14 pode-se desenvolver a Equação 1.4:

$$\operatorname{tg}\eta = \frac{v_f \operatorname{sen}\varphi}{v_f \cos\varphi + v_c} = \frac{\operatorname{sen}\varphi}{\cos\varphi + v_c/v_f} \quad (1.4)$$

Nota-se que, como na maioria dos casos, a velocidade de avanço é muito inferior à velocidade de corte – o ângulo η é desprezível (nas operações de rosqueamento, η assume valores consideráveis, pois a diferença entre v_c e v_f é menor).

As superfícies em usinagem são as geradas na peça pela ferramenta. Devem-se distinguir a superfície em usinagem principal e a superfície em usinagem secundária, sendo que a primeira é gerada pela aresta principal de corte, enquanto a segunda é gerada pela aresta secundária de corte (Figura 1.15).

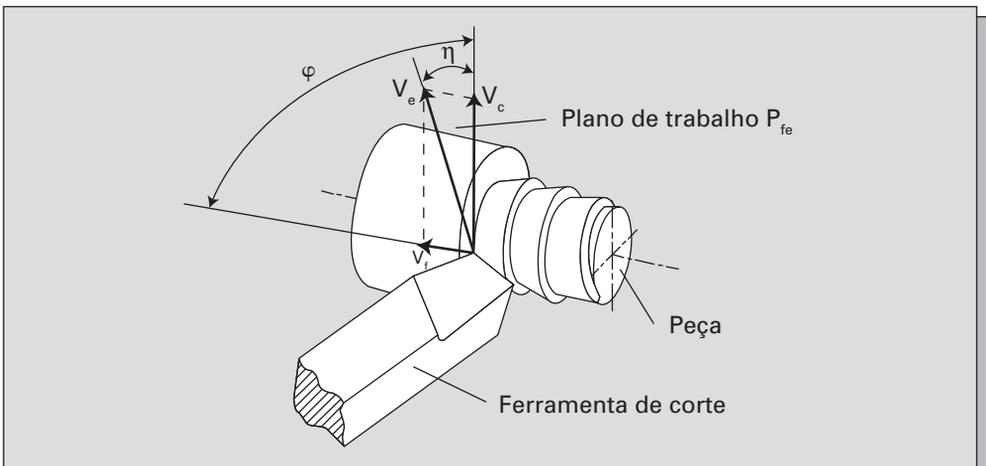


FIGURA 1.13 Plano de trabalho (P_{fe}), ângulo da direção de avanço (φ) e ângulo da direção efetiva de corte (η) no torneamento.

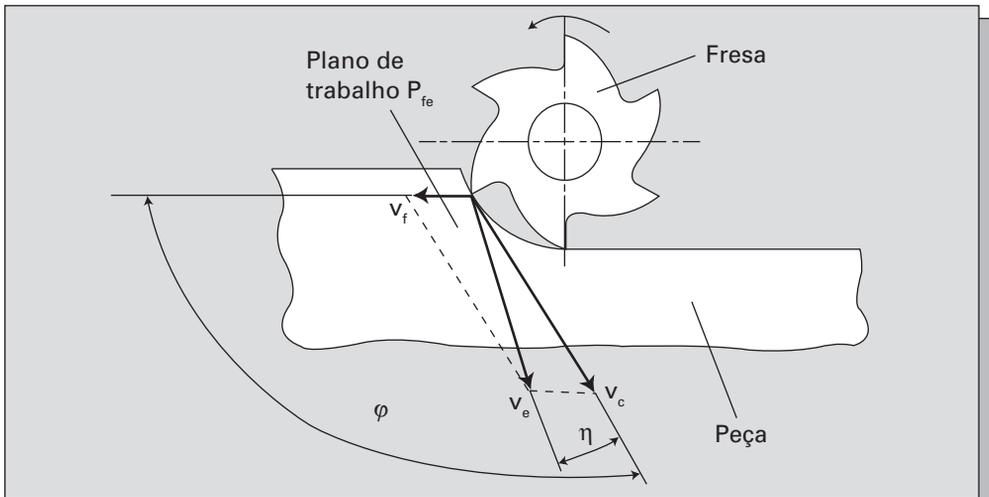


FIGURA 1.14 Plano de trabalho (P_{fe}), ângulo da direção de avanço (φ) e ângulo da direção efetiva de corte (η) no fresamento tangencial concordante.

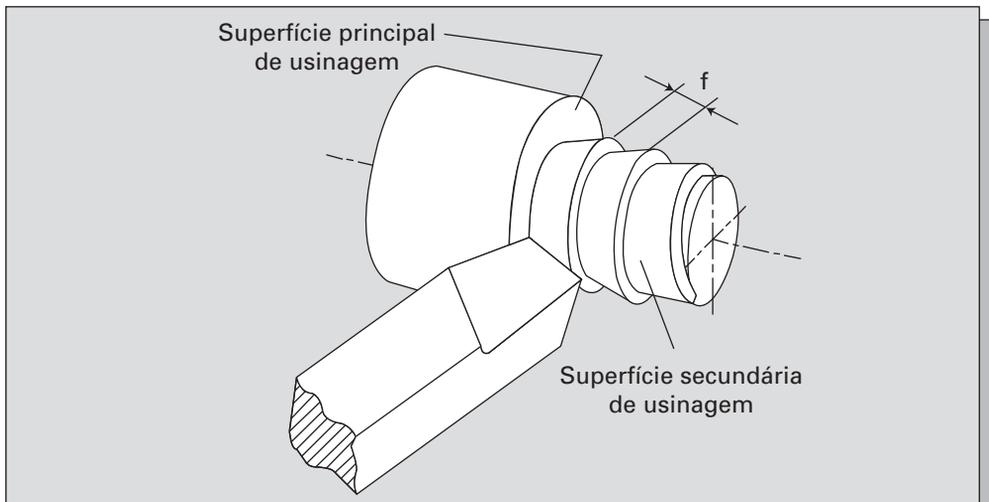


FIGURA 1.15 Superfícies em usinagem principal e secundária.

1.2.6 Grandezas de corte

São as grandezas que devem ser ajustadas na máquina direta ou indiretamente. O avanço (f) é o percurso de avanço em cada volta (mm/rev) ou em cada curso da ferramenta ($mm/golpe$). No caso de ferramentas que possuem mais de um dente, como a fresa, distingue-se ainda o avanço por dente (f_z), que

representa o percurso de avanço de cada dente medido na direção do avanço da ferramenta (correspondente à geração de duas superfícies consecutivas em usinagem). Vale a relação representada pela Equação 1.5:

$$f = f_z \cdot z \quad [\text{mm/rev}] \quad (1.5)$$

Onde:

z = número de dentes

O avanço por dente pode ainda ser decomposto no avanço de corte (f_c) e no avanço efetivo de corte (f_e), mostrados na Figura 1.16. O avanço de corte (f_c) é a distância entre duas superfícies consecutivas em usinagem medida na direção perpendicular à direção de corte no plano de trabalho (Equação 1.6). Já o avanço efetivo de corte (f_e) representa a distância entre duas superfícies consecutivas em usinagem medida na direção perpendicular à direção efetiva de corte no plano de trabalho (Equação 1.7).

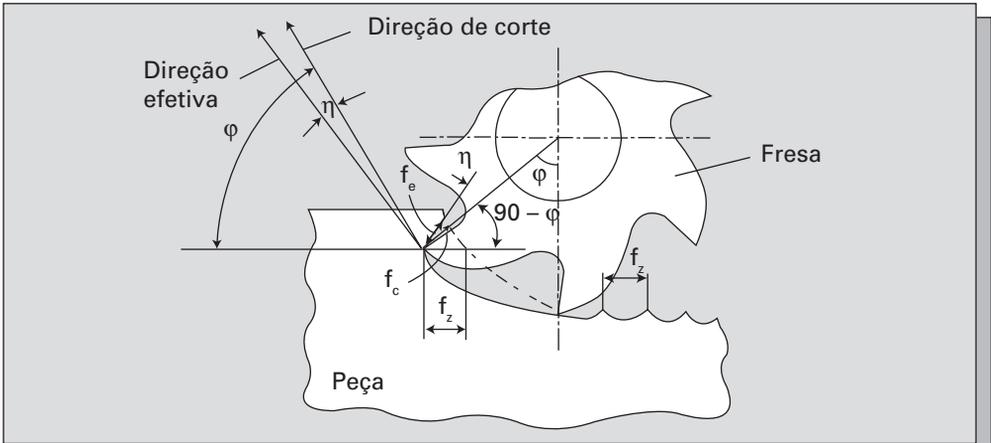


FIGURA 1.16 Avanço por dente (f_z), avanço de corte (f_c) e avanço efetivo de corte (f_e) no fresamento tangencial discordante.

$$f_c = f_z \cdot \text{sen } \varphi \quad [\text{mm/dente}] \quad (1.6)$$

$$f_e = f_z \cdot \text{sen } (\varphi - \eta) \quad [\text{mm/dente}] \quad (1.7)$$

Finalmente, a profundidade ou largura de usinagem (a_p) é a profundidade ou largura de penetração da ferramenta na peça, medida em uma direção per-

pendicular ao plano de trabalho. A penetração de trabalho (a_e) é a penetração da ferramenta em relação à peça, medida no plano de trabalho e em uma direção perpendicular à direção de avanço. É de grande importância no fresamento e na retificação. Já a penetração de avanço (a_p) é a grandeza de penetração da ferramenta medida no plano de trabalho e na direção de avanço. Essas grandezas estão representadas na Figura 1.17.

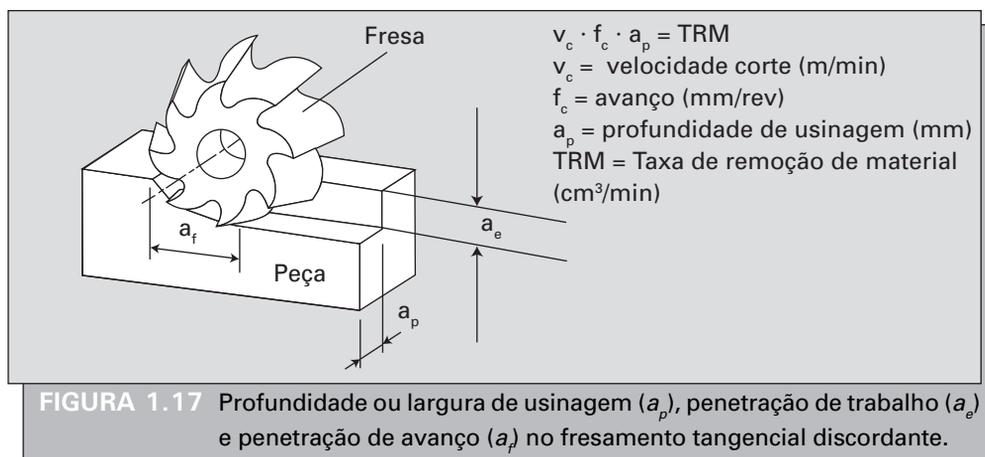


FIGURA 1.17 Profundidade ou largura de usinagem (a_p), penetração de trabalho (a_e) e penetração de avanço (a_f) no fresamento tangencial discordante.

1.2.7 Grandezas relativas ao cavaco

São grandezas derivadas das grandezas de corte e obtidas por meio de cálculos (Figura 1.18).

A largura de corte (b) é a largura calculada da seção transversal de corte a ser retirada, medida na superfície em usinagem principal e segundo a direção normal à direção de corte. Em ferramentas com aresta cortante retilínea e sem curvatura na ponta, a largura de corte (b) é definida pela Equação 1.8:

$$b = \frac{a_p}{\text{sen}\chi_r} \quad [\text{mm}] \quad (1.8)$$

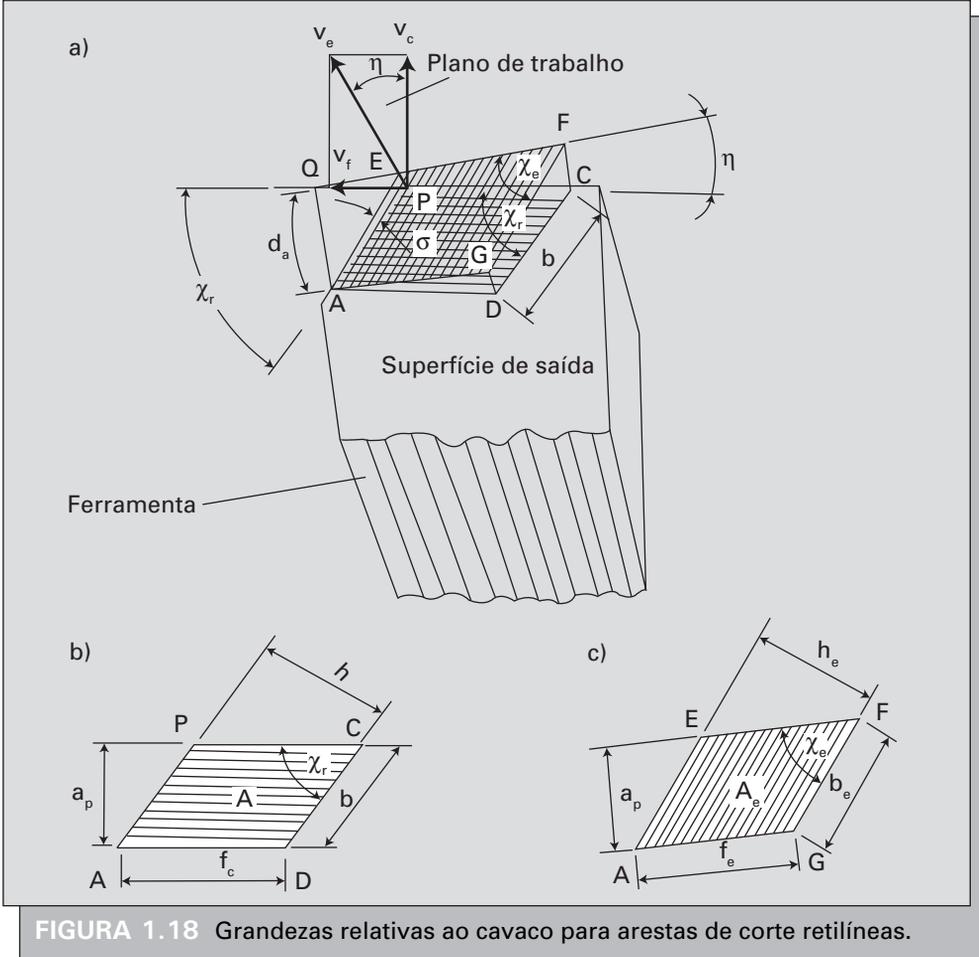
Onde:

χ_r = ângulo de posição da aresta principal de corte

A espessura de corte (h) é a espessura calculada da seção transversal de corte a ser retirada e medida, normalmente, à superfície em usinagem principal

e segundo a direção perpendicular à direção de corte. Em ferramentas com aresta de corte retilíneas:

$$h = f_c \cdot \text{sen}\chi_r \quad [\text{mm}] \quad (1.9)$$



Assim, a seção transversal de corte (A), que é a área calculada da seção transversal de um cavaco a ser retirado e medida no plano normal à direção de corte, pode ser calculada pelas Equações 1.10 ou 1.11:

$$A = a_p \cdot f_c \quad [\text{mm}^2] \quad (1.10)$$

$$A = b \cdot h \quad [\text{mm}^2] \quad (1.11)$$

Analogicamente, é possível definir a largura efetiva de corte (b_e) como sendo a largura calculada da seção transversal efetiva de corte a ser retirada e medida na superfície em usinagem principal, segundo a direção normal à direção efetiva de corte. Pela Figura 1.17 deduz-se a Equação 1.12:

$$b_e = b \cdot (1 - \text{sen}^2 \eta \cdot \text{cos}^2 \chi_r)^{1/2} \quad [\text{mm}] \quad (1.12)$$

A espessura efetiva de corte (h_e) é a espessura calculada da seção transversal efetiva de corte a ser retirada e medida normalmente à superfície em usinagem principal, segundo a direção perpendicular à direção efetiva de corte (Equação 1.13):

$$h_e = \frac{h}{(1 + \text{sen}^2 \chi_r \cdot \text{tg}^2 \eta)^{1/2}} \quad [\text{mm}] \quad (1.13)$$

Por fim, a seção transversal efetiva de corte (A_e) é a área calculada da seção transversal efetiva de um cavaco a ser retirado e medida no plano normal à direção efetiva de corte. Na maioria dos casos (ferramentas sem arredondamento de ponta), a seção transversal efetiva de corte (A_e) pode ser calculada pelas Equações 1.14 ou 1.15:

$$A_e = a_p \cdot f_e \quad [\text{mm}^2] \quad (1.14)$$

$$A_e = b_e \cdot h_e \quad [\text{mm}^2] \quad (1.15)$$

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABNT (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS). *NBR 6162 – Movimentos e Relações Geométricas na Usinagem dos Metais: Terminologia*. São Paulo, 1989.
- BLACK, J. T. “Introduction to machining processes”. *Metals handbook: machining*. 9. ed. Nova York: ASM International, 1995.
- FERRARESI, D. *Fundamentos da usinagem dos metais*. São Paulo: Blucher, 1977.
- KALPAKJIAN, S. *Manufacturing engineering and technology*. 3. ed. Nova York: Addison-Wesley Publishing Co., 1995.
- McGEOUGH, J. A. *Advanced methods of machining*. Londres: Chapman and Hall, 1988.
- SHAW, M. C. *Metal cutting principles*. Londres: Oxford University Press, 1984.
- TRENT, E. M. *Metal cutting*. 2. ed. Londres: Butterworths & Co., 1985.