

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

Alexandre Corrêa Monma

**BANCADA PARA ENSAIOS COM VISTAS À MODELAGEM
E SIMULAÇÃO DE FORÇAS NO BROCHAMENTO**

Dissertação submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Santa Catarina para a obtenção do Grau de Mestre em Engenharia Mecânica.
Orientador: Prof. Rolf Bertrand Schroeter,
Dr. Eng

Florianópolis

2013

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor, através do Programa de
Geração Automática da Biblioteca Universitária da UFSC

Monma, Alexandre Corrêa

Bancada para Ensaios com Vistas à Modelagem e Simulação
de Forças no Brochamento [dissertação] / Alexandre Corrêa
Monma ; orientador, Rolf Bertrand Schroeter -
Florianópolis, SC, 2013.

130 p. ; 21cm

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Santa
Catarina, Centro Tecnológico. Programa de Pós-Graduação em
Engenharia Mecânica.

Inclui referências

1. Engenharia Mecânica. 2. Brochamento. 3. Forças na
Usinagem. 4. Modelagem e Simulação. 5. Modelos de Força. I.
Schroeter, Rolf Bertrand. II. Universidade Federal de
Santa Catarina. Programa de Pós-Graduação em Engenharia
Mecânica. III. Título.

Alexandre Corrêa Monma

**BANCADA PARA ENSAIOS COM VISTAS À MODELAGEM
E SIMULAÇÃO DE FORÇAS NO BROCHAMENTO**

Esta Dissertação foi julgada adequada para obtenção do Título de “Mestre” e aprovada em sua forma final pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica

Florianópolis, ____ de _____ de _____.

Prof. Júlio César Passos, Dr.
Coordenador do Curso

Banca Examinadora:

Prof. Rolf Bertrand Schroeter, Dr. Eng.
Orientador
Universidade Federal de Santa Catarina

Prof. Walter Lindolfo Weingartner, Dr. Ing.
Universidade Federal de Santa Catarina

Prof. João Carlos Espíndola Ferreira, Ph.D.
Universidade Federal de Santa Catarina

Prof. Joel Martins Crichigno Filho, Dr. Ing.
Universidade do Estado de Santa Catarina

Dedico este trabalho à minha família
e aos que permaneceram ao meu
lado.

AGRADECIMENTOS

Ao orientador deste trabalho, Prof Dr. Eng. Rolf Bertrand Schroeter, que, com sua confiança, me fez acreditar na minha capacidade.

Ao doutorando Daniel Amoretti Gonçalves, pelos conselhos e sugestões de grande valor para o trabalho.

Aos professores membros da banca pela análise e críticas sugeridas.

Aos integrantes do LMP e USICON pelo apoio pessoal e estrutural necessários para a realização dos ensaios.

Ao CNPQ pelo fomento e apoio financeiro.

A minha família e amigos que estiveram pessoalmente ou não durante minha vida acadêmica.

RESUMO

O conhecimento do comportamento das forças de corte em processos de usinagem é de suma importância para a previsão da eficiência dos mesmos. Para o brochamento, cuja ferramenta tem projeto e construção onerosa, além de custo elevado, tem como questão crítica a resistência aos esforços presentes durante o processo. Este processo possui características peculiares em relação aos outros processos de usinagem, como as baixas velocidades de corte e a impossibilidade de alteração dos parâmetros de usinagem durante o processo, já que são características construtivas da brocha. Ensaios de torneamento ortogonais têm sido realizados visando simular o comportamento da força específica de corte para vários processos de usinagem, entretanto geralmente as condições de tais ensaios não se assemelham ao brochamento principalmente pelas velocidades de corte, normalmente mais altas do que as utilizadas no processo real. Para contornar tal problema, esse trabalho propõe o uso de um torno CNC para a realização de corte do material, no qual, com o movimento de translação do torno, tipicamente utilizado para a movimentação do porta-ferramentas durante a usinagem, realiza-se o corte do material com velocidades de corte inferiores a 10m/min. A medição das forças deste processo foi feita utilizando de uma plataforma piezométrica sendo os resultados analisados com emprego do software LABVIEW®. Assim, foi possível reproduzir o processo de brochamento de maneira bastante fiel, obtendo-se valor de força específica de corte similar ao ocorrido no processo real, com as velocidades de corte usuais do brochamento. Estes ensaios permitem um incremento no nível de conhecimento acerca das características do processo em estudo, essencial na modelagem e simulação do brochamento. Assim, a validação de modelos existentes ou em fase de elaboração pode ser realizada, bem como otimizações em projetos de novas brochas. Os resultados obtidos comprovaram uma variação na força específica de corte com a variação somente da faixa de velocidade utilizada. Essa variação, mantendo os outros parâmetros de usinagem inalterados, aumentou em 50 % a força específica de corte, ao se utilizar velocidades compatíveis com o brochamento, em relação ao torneamento. Outras peculiaridades do brochamento, como atritos no gume e flanco secundários, e perfis dos dentes também puderam ser mensurados, apresentando influência respectivamente crescente. Tais resultados podem compor fatores de correção para modelos matemáticos de força de corte em brochamento

Palavras-chave: Brochamento, forças na usinagem, modelagem e simulação, modelos de força,

ABSTRACT

The knowledge of the behavior of cutting forces in machining processes is of main importance for the prediction of its effectiveness. In broaching, whose design and construction of the tool is costly, besides high cost, has how critical issue the resistant to all efforts present during the process. This process has unique characteristics compared to other machining processes such as low cutting speed and the impossibility of changing the parameters during the machining process, as they are constructive characteristics of the broach. Orthogonal turning tests have been conducted to simulate the behavior of the specific cutting force for various machining processes, though generally the conditions for such tests do not resemble the broaching primarily by cutting speed, usually higher than those used in the real broaching process. To solve this problem, this paper proposes the use of a CNC turn to perform cutting of the material, in which the translational movement of the lathe, typically used for moving the tool holder during machining achieves the cutting tools with cutting speeds of less than 10m/min. The measurement of forces in this process was made using a piezoelectric platform with results analyzed software LABVIEW ®. So, was possible to reproduce the process of broaching quite accurate, obtaining values of specific cutting force similar to those experienced in the real process with the usual cutting speeds broaching. These tests allow an increase in the level of knowledge about the characteristics of the process under study, essential in modeling and simulation of broaching. Thus, the validation of existing models or in preparation can be performed as well as optimized designs of new broaches. The obtained results showed a variation in specific cutting force variation with only the speed range used. This variation, keeping the other machining parameters unchanged, increased by 50% the specific cutting force, when using compatible broaching speeds in relation to turning. Other peculiarities of broaching such as friction in edge and side edge, and profiles of the teeth could also be measured, showing growing influence respectively. Such results can compose correction factors for mathematical models of cutting force in broaching

Keywords: Broaching, machining forces, modeling and simulation, force models.

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 – Componentes usinados por brochamento	29
Figura 2.2 – Possibilidades do brochamento.	30
Figura 2.3 – (a) Brochamento interno. (b) Brochamento externo.....	31
Figura 2.4 – Ressalto Transversal (a) e Longitudinal (b) no percurso da brocha.	33
Figura 2.5 – Várias operações para uma mesma superfície	34
Figura 2.6 – Exemplos de brochas.....	35
Figura 2.7 – Divisões de uma brocha de tração	36
Figura 2.8 – Segmentador de cavacos em brochas	37
Figura 2.9 – Ressaltos de alisamento em brochas.....	38
Figura 2.10 – Força de deformação em relação à folga entre peça e ressalto da brocha [iac]. Liga de cobalto X40.	38
Figura 2.11 – Divisão de volume de usinagem entre os dentes da brocha.	39
Figura 2.12 – Parâmetros geométricos dos dentes da brocha	40
Figura 2.13 – Alterações na força de corte com a mudança do ângulo de saída.....	41
Figura 2.14 – Equivalência entre largura de usinagem e penetração de avanço.....	42
Figura 2.15 – Comprimento “L” usinável	43
Figura 2.16 – Cronologia dos materiais para ferramentas	45
Figura 2.17 – Vida da ferramenta com ou sem revestimento	52
Figura 2.18 – Vida da ferramenta sem revestimento, revestida, e re-afiadas	53
Figura 2.19 – Divisão das brochadeiras por aspectos funcionais	54
Figura 2.20 – Brochadeira horizontal hidráulica de tração.....	55
Figura 2.21 – Brochadeira horizontal contínua.....	55
Figura 2.22 – Brochadeira vertical	56
Figura 2.23 – Mecanismos de desgaste em ferramentas de geometria definida.....	57
Figura 2.24 – Perfil de temperatura em usinagem ortogonal usando metal duro.....	58
Figura 2.25 – Desgastes na ferramenta de corte	59
Figura 2.26 – Desgaste abrasivo	60
Figura 2.27 – Desgaste por adesão.	61
Figura 2.28 – Deformação plástica no gume de ferramenta de aço-rápido	61
Figura 2.29 – Desgaste por fadiga e fratura.....	62
Figura 2.30 – Influência da temperatura sobre os mecanismos de desgaste	63
Figura 2.31 – Decomposição das forças em corte ortogonal	64

Figura 2.32 – Diagrama de esforços	66
Figura 2.33 – Gráfico para determinação de $k_{c1.1}$ e $1-m_c$	68
Figura 2.34 – Divisão dos valores de k_c e coeficiente de Kienzle	69
Figura 2.35 - Exemplo de variação de força de brochamento no tempo	70
Figura 2.36 – Zonas de cisalhamento	71
Figura 2.37 – Influência de gume postiço na força de corte.....	72
Figura 2.38 – Influência nas componentes da força de usinagem com a variação dos ângulos de saída e inclinação	73
Figura 2.39 – Grandezas para determinação do fator de recalque.....	74
Figura 2.40 – Modelo de usinagem	75
Figura 2.41 – Mecanismos de remoção de material	76
Figura 2.42 – Regimes de atrito sólido	79
Figura 2.43 – Zonas de aderência e escorregamento	80
Figura 2.44 – Vida da ferramenta	81
Figura 2.45 – Tensão normal de contato na interface ferramenta-peça	83
Figura 2.46 – Contato idealizado (a) e real (b) do flanco da ferramenta com a peça.....	84
Figura 3.1 – Esquema do sistema de medição de forças para brochamento adaptado	86
Figura 3.2 – Eixos cartesianos na plataforma piezelétrica.....	87
Figura 3.3 – Tela de aquisição de sinais no LABVIEW.....	88
Figura 3.4 – Corpo de prova	90
Figura 3.6 – Representação esquemática da bancada de ensaios	92
Figura 3.7 – Vista superior da bancada,com detalhe para posicionamento e contato do gume com corpo de prova.	93
Figura 3.8 – Região do flanco secundário onde ocorre atrito com a peça. Válido para ferramentas 3 e 4.....	95
Figura 3.9 – Regiões de corte e atrito durante ensaios.	96
Figura 4.1 – Dados de força de corte para $h = 0,03\text{mm}$	98
Figura 4.2 – Dados de força passiva.....	99
Figura 4.3 – Gráfico para determinação das constantes de Kienzle.	100
Figura 4.4 – Variação da força de corte em função de h	100
Figura 4.5 – Cavaco contínuo gerado no brochamento.	102
Figura 4.5 – Força de corte para profundidade de 0,3 mm, ferramenta 2. 102	
Figura 4.6 – Tendência da força de corte x profundidade de sulco, ferramenta com atrito no gume secundário.	103
Figura 4.7 – Força de atrito no gume secundário na força de corte sem corte de material.	104
Figura 4.8 – Força passiva para profundidade de 0,3mm, ferramenta 2... 105	
Figura 4,9 – Tendência da força passiva x profundidade de sulco, ferramenta com atrito no gume secundário.	105

Figura 4.10 – Parcela de força de atrito no gume secundário na força passiva sem corte de material.	106
Figura 4.11 – Força de corte para profundidade de 0,3 mm, ferramenta 3.	106
Figura 4.12 – Força de corte x profundidade de sulco, ferramenta com atrito no flanco secundário.	107
Figura 4.13 – Parcela de força de atrito no flanco secundário na força de corte sem corte de material.	107
Figura 4.14 – Força passiva para profundidade de 0,3 mm, ferramenta 3.	108
Figura 4.15 – Tendência da força passiva x profundidade de sulco, ferramenta com atrito no flanco secundário.	109
Figura 4.16 – Parcela de força de atrito no flanco secundário na força passiva sem corte de material.	109
Figura 4.17 – Comparação da força de corte para análise de desgaste.	110
Figura 4.18 – Força de corte para profundidade de 0,3 mm, ferramenta 4.	111
Figura 4.19 – Seções do cavaco.	111
Figura 4.20 – Tendência da força de corte x profundidade de sulco, ferramenta com atrito no flanco secundário.	112
Figura 4.21 – Parcela de força de atrito no flanco secundário na força de corte sem corte de material.	113
Figura 4.22 – Força passiva para profundidade de 0,3 mm, ferramenta 4.	113
Figura 4.23 – Tendência da força passiva x profundidade de sulco, ferramenta com atrito no flanco secundário.	114
Figura 4.24 – Parcela de força de atrito no flanco secundário na força passiva sem corte de material.	114

LISTAS DE TABELAS

Tabela 2.1 – Ângulos de Saída e Incidência típicos no brochamento.....	44
Tabela 2.2 – Composição e características dos aços rápidos	48
Tabela 2.3 – Materiais para brochas e respectivas aplicações	50
Tabela 3.2 – Características das ferramentas.....	94
Tabela 4.1 – Resultados dos ensaios para cálculo de k_c e $1-m_c$	97
Tabela 4.2 – Fatores de correção para k_c de acordo com v_c	101

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

3D	- Tridimensional
AISI	- <i>American Iron and Steel Institute</i>
<i>Apud</i>	- Citado por, conforme ou segundo
CNC	- <i>Computer Numerical Control</i>
CNPQ	- Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico
CVD	- <i>Chemical vapor deposition</i>
<i>Et al</i>	- Três ou mais autores
HB	- <i>Hardness Brinell</i>
HRC	- <i>Hardness Rockwell C</i>
HSS	- <i>High Speed Steel</i>
LCME	- Laboratório Central de Microscopia Eletrônica
LMP	- Laboratório de Mecânica de Precisão
PVD	- <i>Physical vapor deposition</i>
UFSC	- Universidade Federal de Santa Catarina

LISTA DE SÍMBOLOS

Letras maiúsculas

A_{sf}	[mm]	Avanço por dente
L	[mm]	Comprimento usinável
F_t	[N]	Força total de usinagem
F_c	[N]	Força de corte
F_f	[N]	Força de avanço
K_c	[N/mm ²]	Força específica do efeito do gume. Para fresas
k_c	[N]	Força específica de corte
$k_{c1.1}$	[N/mm ²]	Força específica de corte, para $b \times h = 1 \text{ mm} \times 1 \text{ mm}$
$k_{c1.0.01}$	[N/mm ²]	Força específica de corte para brochamento
$1-m_c$		Expoente da equação de Kienzle
T	[min]	Vida da ferramenta
C_v	[horas]	Vida da ferramenta para $v_c = 1\text{m/min}$
F_T	[N]	Força radial ou passiva
F_{fN}	[N]	Força normal no flanco
F_{ff}	[N]	Força de atrito no flanco

Letras minúsculas

b	[N]	Largura do gume
d_w	[mm]	Profundidade de corte
f	[mm]	Avanço
h_{ch}	[mm]	Espessura cavaco formado
$h_{cu.min}$	[mm]	Espessura mínima de corte
h_d	[mm]	Altura do dente
k		Inclinação da curva da vida da ferramenta
p	[mm]	Passo
q_d	[N/mm]	Força de deformação por unidade de circunferência
r_1 e r_2	[mm]	Raios de concordância da bolsa de cavaco
R_y	[μm]	Rugosidade Máxima
Q_d	[N/mm]	Força de deformação por unidade de circunferência

Letras gregas

α		Ângulo de incidência
β		Ângulo do de cunha
γ		Ângulo de saída
K_r		Ângulo de direção do gume secundário
μ_{ff}		Coefficiente de atrito aparente
ρ	[μm]	Raio do gume
σ_{c-f}	[N/mm ²]	Tensão normal de interface ferramenta peça
τ_s	[N/mm ²]	Tensão de cisalhamento

Φ

Ângulo de cisalhamento

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	25
1.1	OBJETIVOS	26
2	ESTADO DA ARTE.....	29
2.1	FUNDAMENTOS DO BROCHAMENTO	29
2.2	FERRAMENTA DE CORTE	35
2.2.1	Geometria dos gumes e sua influência	39
2.3	MATERIAIS DE FERRAMENTA	45
2.3.1	Aço-rápido	47
2.3.2	Efeitos dos elementos de liga nos aços-rápidos.....	48
2.3.3	Metal-duro.....	51
2.3.4	Revestimento em aços-rápidos e metais-duros.....	51
2.4	MÁQUINAS-FERRAMENTAS PARA O BROCHAMENTO	53
2.4.1	Brochadeira horizontal.....	54
2.4.2	Brochadeira vertical	55
2.5	DESGASTE EM BROCHAS	56
2.5.1	Desgaste por abrasão	59
2.5.2	Desgaste por difusão	60
2.5.3	Desgaste por adesão	60
2.5.4	Desgaste por deformação plástica	61
2.5.5	Desgaste por fadiga e fratura.....	62
2.6	ESFORÇOS NO BROCHAMENTO.....	63
2.7	INFLUÊNCIAS NOS ESFORÇOS DE CORTE.....	70
2.7.1	Material da peça.....	71
2.7.2	Material da ferramenta	71
2.7.3	Velocidade de corte.....	72
2.7.4	Geometria do dente da brocha.....	72
2.7.5	Influência do desgaste da ferramenta	77
2.8	TRIBOLOGIA NA USINAGEM	77
2.8.1	Interface ferramenta-cavaco.....	78
2.8.2	Interface ferramenta-peça.....	80
3	MATERIAIS E MÉTODOS.....	85
3.1	SISTEMAS DE MEDIÇÃO DE FORÇAS	85
3.1.1	Plataforma piezelétrica.....	86
3.1.2	Calibração da plataforma piezelétrica	87
3.1.3	Amplificador de sinais	88
3.1.4	Digitalização e tratamento dos sinais	88
3.2	MÁQUINA-FERRAMENTA.....	89
3.3	CORPOS DE PROVA E FERRAMENTAS	89
3.4	MONTAGEM DO CONJUNTO	91

3.5	METODOLOGIA DOS ENSAIOS	93
4	ANÁLISES DOS RESULTADOS	97
4.1	COEFICIENTES DE KIENZLE	97
4.2	INFLUÊNCIA DO ATRITO NO GUME SECUNDÁRIO	102
4.3	INFLUÊNCIA DO ATRITO NO FLANCO SECUNDÁRIO.....	106
4.4	INFLUÊNCIA DO ATRITO E DO PERFIL DO DENTE.....	110
5	CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS	
	FUTUROS.....	115
	REFERÊNCIAS	117
	ANEXO 1.....	123
	APÊNDICE A – Calibração da plataforma piezométrica.....	127

1 INTRODUÇÃO

Entre os processos de usinagem, o brochamento é caracterizado como único, distinguindo-se pela produção de peças através de um único passe de ferramenta, ao contrário de outros processos que necessitam de vários passes e variações nos parâmetros de corte para atender as especificações finais (SAJEEV *et al*, 1997). Seu desenvolvimento teve origem nos Estados Unidos, com patente registrada no ano de 1873, sendo a primeira máquina-ferramenta para brochamento externo construída em 1882. Os avanços no brochamento ocorreram principalmente na indústria automobilística, entretanto, é utilizado em qualquer ramo industrial com produção em série (LIMA e MIRANDA, 2007).

O brochamento é uma alternativa viável quando se busca uma alta produtividade em peças de difícil fabricação (AXINTE e GINDY, 2003), e sendo um processo de usinagem estável, com baixo nível de vibrações em casos em que a flutuação da força não seja alta, é capaz de produzir peças com limites estreitos de tolerância e qualidade de superfície elevada, com rugosidade R_y entre 8 e 10 μm (ANDRADE, 2009). Essa alta produtividade, proveniente da característica do processo e da ferramenta, gera ótimo retorno do investimento, dispendido em sua maioria na fabricação da brocha, que pode ser, em muitos casos, de difícil fabricação. Apesar disto, o processo pode ser competitivo e vantajoso ante os processos de usinagem mais usuais (SCHNEIDER, 2001). No entanto, mesmo com todos esses anos de utilização e vantagens mencionadas, Eto (2005) afirma que existem poucos trabalhos publicados no âmbito das condições de corte e maximização da vida da ferramenta, o que faz com que pesquisas neste campo tragam grande potencial de melhoria no desempenho deste processo de usinagem.

O maior obstáculo para a utilização do processo do brochamento é o alto custo da ferramenta. Seu projeto e produção, até o momento, são feitos, na maioria dos casos, com base na experiência dos projetistas, adquirida com o sucesso em projetos anteriores por tentativa e erro, procedimentos estes dispendiosos e passíveis de otimização (GONÇALVES, 2009a).

Com a evolução dos computadores, é crescente o uso de modelos e simulações para a melhor descrição dos fenômenos presentes na usinagem, de forma científica e confiável. Assim, é possível analisar de antemão os efeitos causados por mudanças dos parâmetros de usinagem, buscando projetos mais eficientes, técnica e economicamente, evitando, no caso do brochamento, projetos de brocha mal concebidos, o que acarretaria em quebra da ferramenta, má qualidade de superfícies, erros dimensionais,

entre outros. Conhecendo-se o comportamento de forças e suas orientações, pode-se também avaliar a precisão do processo, analisando previamente as deformações na máquina-ferramenta, ferramenta e peça, bem como conhecimento sobre as influências do atrito na região de corte (BOEIRA, 2010). Contudo, os valores simulados só têm credibilidade caso tal modelo tenha sido validado. Schelsinger *et al apud* Sargent (2007) define a validação de modelo como sendo a comprovação de que tal modelo, simulado computadorizadamente, possua uma faixa de precisão satisfatória no seu domínio de aplicação, ou seja, a validação do modelo é necessário para a utilização do mesmo. Dessa forma, dados de alimentação dos modelos representa o início do sucesso e representação fiel a realidade de um modelo, sendo este dados, objeto de estudo neste trabalho.

1.1 OBJETIVOS

A presente dissertação busca a concepção de uma metodologia para ensaios de usinagem utilizando o movimento translacional de avanço do carro porta ferramenta de um torno CNC, o que permite a utilização de baixas velocidades de corte, com a finalidade de se obter dados relacionados com as forças de usinagem resultantes do fenômeno real no processo de brochamento, que contribuirá na validação e aperfeiçoamento de modelo matemático proposto por Gonçalves (2009), que descreve o comportamento das forças atuantes no brochamento, as tensões atuantes sobre a ferramenta e a potência requerida durante o processo de brochamento helicoidal. Os valores de força coletados serão comparados com os dados simulados, determinando fatores de correção se necessário, quantificando a influência do atrito entre flancos da ferramenta e peça nos esforços em cada dente da ferramenta e no conjunto de dentes atuantes simultaneamente no brochamento.

Para alcançar o objetivo proposto neste documento, algumas etapas específicas devem ser previamente completadas. Dentre todas elas, as principais são descritas a seguir:

- Reconhecimento e definição do problema: pesquisa bibliográfica, análise das necessidades, pesquisas relacionadas, estado da arte;
- Projeto de bancada experimental para análise de forças e atrito no brochamento: determinação dos equipamentos e procedimentos para realização dos ensaios de forças;
- Montagem e aferição metrológica da bancada: testes para averiguar comportamentos da bancada, como rigidez, precisão, repetibilidade;
- Coleta de dados de força através de sistema de aquisição de dados;

- Tratamento estatístico e analítico dos resultados;
- Proposta de metodologia de ensaios de brochamento.

2 ESTADO DA ARTE

2.1 FUNDAMENTOS DO BROCHAMENTO

Brochamento é definido como uma operação de usinagem de precisão, e cinematicamente é similar ao plainamento (LYANG, 1999). O movimento de corte executado pela ferramenta consiste em translação, em um único sentido, com direção paralela às guias da máquina-ferramenta. Historicamente, além da usinagem de grandes lotes em materiais correntes na indústria metal-mecânica, este processo tem sido empregado no corte de materiais de difícil usinagem, como ligas de titânio resistentes ao calor, ligas de níquel (SHI *et al*, 2006). O brochamento também tem sido empregado com muito sucesso na indústria aeroespacial, mais precisamente na manufatura de componentes de turbinas, comumente de geometria complexa (MO *et al*, 2005), algumas das quais são ilustradas na Figura 2.1.



Figura 2.1 – Componentes usinados por brochamento
Fonte: Forst *apud* Klocke (2011).

Este processo utiliza uma ferramenta denominada brocha, a qual é tracionada ou pressionada sobre a superfície de uma peça, com o objetivo de produzir inúmeras características geométricas, como rasgos de chaveta, rasgos retangulares, hexagonais, circulares, engrenamentos e formas não

definidas, exemplificadas na Figura 2.2, de acordo com a necessidade e funcionalidade da peça.

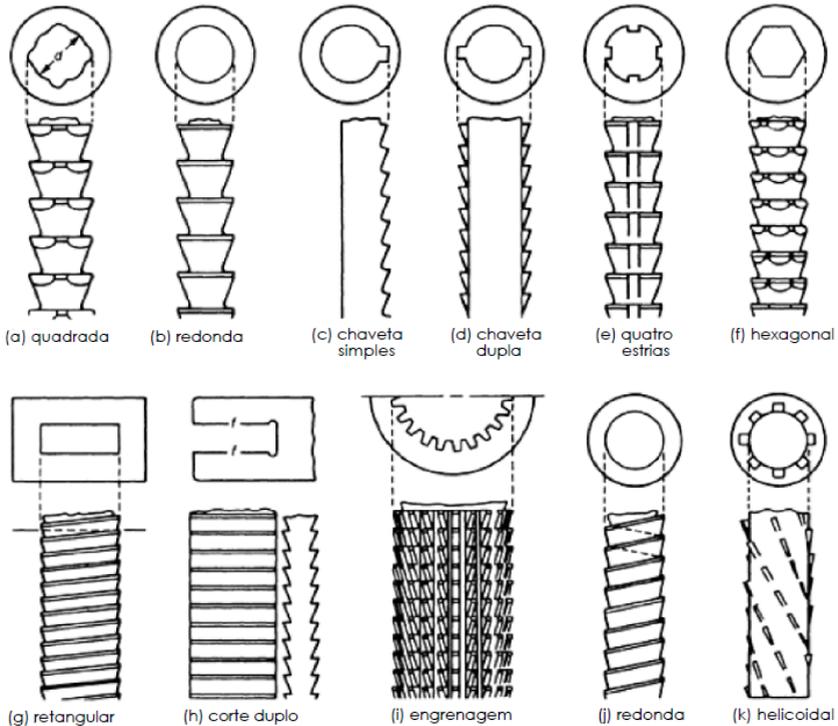


Figura 2.2 – Possibilidades do brochamento

Fonte: ASM (1989).

Essas formas podem ser geradas externamente ou internamente conforme a Figura 2.3, através de cavidades passantes previamente produzidas, ou em furos cegos, com a utilização de ferramenta especial (WALSH, 2001).

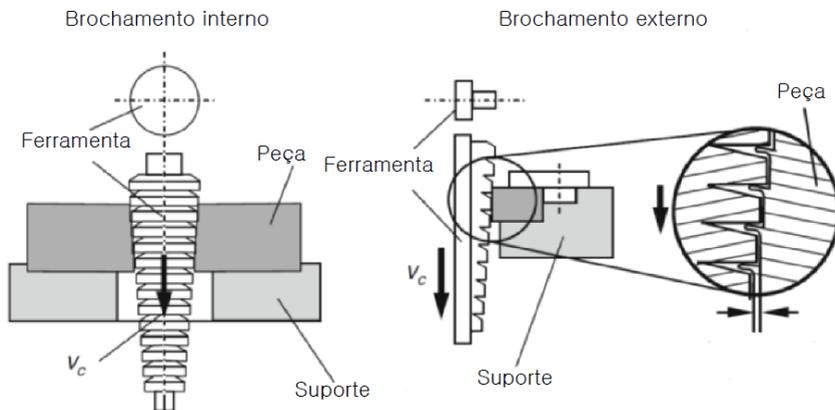


Figura 2.3 – (a) Brochamento interno. (b) Brochamento externo
Fonte: Klocke (2011).

A ferramenta é o principal elemento do processo (ASM, 1989). Ela permite que o brochamento seja extremamente rápido, produzindo em poucos segundos peças com dimensões precisas, sendo aplicável para vários tipos de materiais com diferentes usinabilidades, conforme tabela no Anexo 1. No entanto, para desbastes de um volume grande de material, são comumente utilizados outros processos de usinagem, utilizando-se o brochamento apenas para as operações de acabamento (LYANG, 1999).

O brochamento permite a obtenção de tolerâncias apertadas durante todo o ciclo de vida da ferramenta, pois a remoção de material, ao longo da peça usinada, se dá de forma compartilhada entre os dentes de desbaste, semi-acabamento e acabamento, incumbindo ao último dente a tarefa de remoção de pouco material ou alisamento da superfície. Assim, apesar do esforço total de corte ser elevado para esse processo, cada gume é solicitado de forma pouco intensa em comparação ao esforço total, proporcionando vida prolongada da ferramenta em comparação aos outros processos de usinagem (LYANG, 1999).

No quesito qualidade de superfície, Legutko *et al* (2011) listam os fatores que influenciam a rugosidade:

- Condições do gume;
- Tipos de meios lubri-refrigerantes aplicados;
- Os valores dos ângulos de saída e incidência;
- A espessura de corte realizado por um dente (avanço por dente);
- Número de dentes agindo simultaneamente;
- Projeto e condições da máquina-ferramenta;

- Propriedades mecânicas, estruturais e físico-químicas do material a ser usinado.

Comparativamente, a velocidade de corte do brochamento, usualmente na faixa compreendida entre 0,5 e 6,0 m/min, é muito baixa em relação ao torneamento e fresamento de mesmos aços e ligas, sendo em torno de 10 a 15 vezes menor (MAKAROV *et al*, 2008). Apesar dessa diferença, sua produtividade é alta, pois o processo integra desbaste, semi-acabamento e acabamento em um único passe (STEMMER, 2005), eliminando tempos secundários, como *setup*, trocas de ferramenta, preparação, aproximação, recuo etc. (KÖNIG e KLOCKE, 1997). Se adequadamente projetado e executado, o brochamento atinge taxas de remoção de material até 25 vezes maiores que outros processos mais tradicionais (RAJAM, 1997). Esta característica, unicamente presente no brochamento, o torna viável, dissolvendo os custos elevados de confecção da ferramenta entre as peças do grande lote possível de ser produzido por uma única ferramenta.

Apesar das características vantajosas descritas anteriormente, o processo de brochamento apresenta desvantagens e limitações inerentes à sua forma de remoção de material, destacando-se (ASM, 1989):

- O brochamento utiliza movimento simples de translação em um único sentido (com exceção do brochamento helicoidal), implicando em superfícies brochadas obrigatoriamente paralelamente ao eixo do movimento de corte. O mesmo acontece com ressaltos presentes no caminho de corte, onde somente ressaltos longitudinais permitem a passagem da ferramenta e, conseqüentemente, a retirada de material, conforme Figura 2.4.
- A cinemática do brochamento não permite a mudança de direção do curso da ferramenta para uma mesma operação, sendo necessárias mais de uma operação para usinar superfícies curvas ou presentes em vários planos (Figura 2.5).
- Remoção de muito material por brochamento demanda vários dentes, acarretando em comprimento demasiadamente longo da ferramenta, o que é geralmente evitado, pois também exigiria um comprimento longo do curso da máquina-ferramenta e grandes espaços físicos na planta industrial.
- Na grande maioria dos casos, as brochas são projetadas e fabricadas para a usinagem de um único tipo de peça, com determinadas características dimensionais, metalúrgicas, acabamento etc. Uma mudança nessas características ocasionaria

perda de rendimento da ferramenta, qualidade de superfície falha, mudanças na requisição de potência e curso da máquina-ferramenta, entre outros aspectos. Essa exclusividade de ferramenta por peça pode inviabilizar o processo de brochamento.

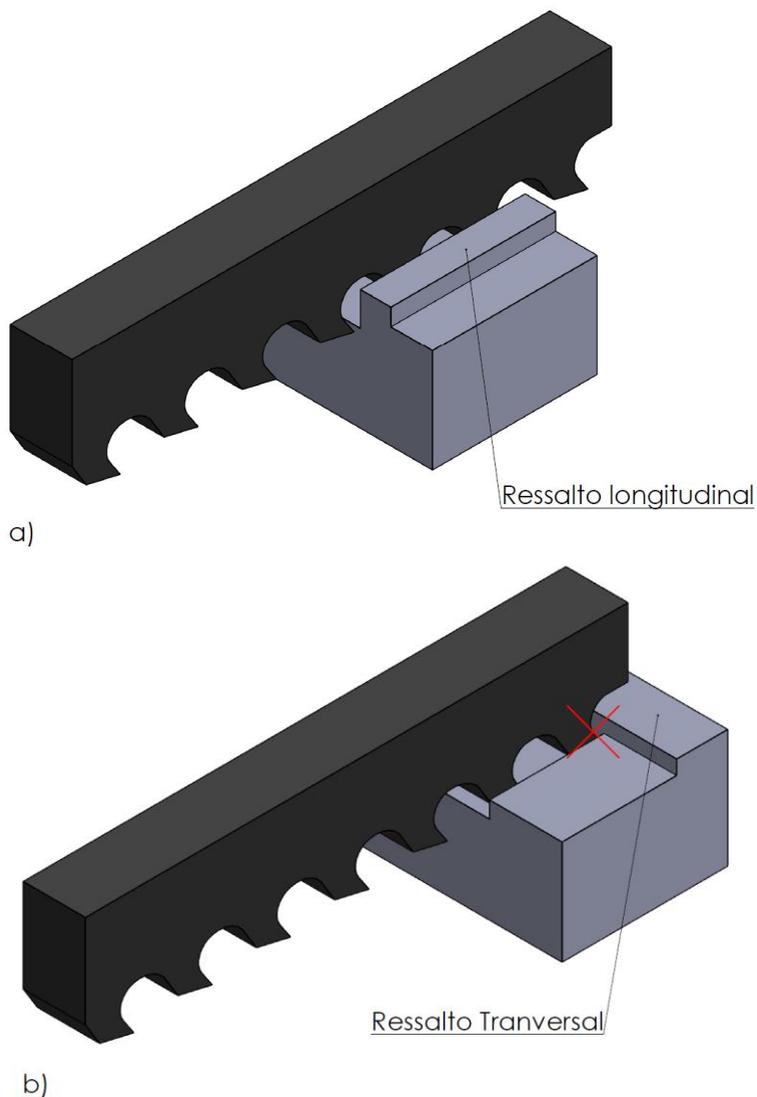


Figura 2.4 – Ressalto Transversal (a) e Longitudinal (b) no percurso da brocha

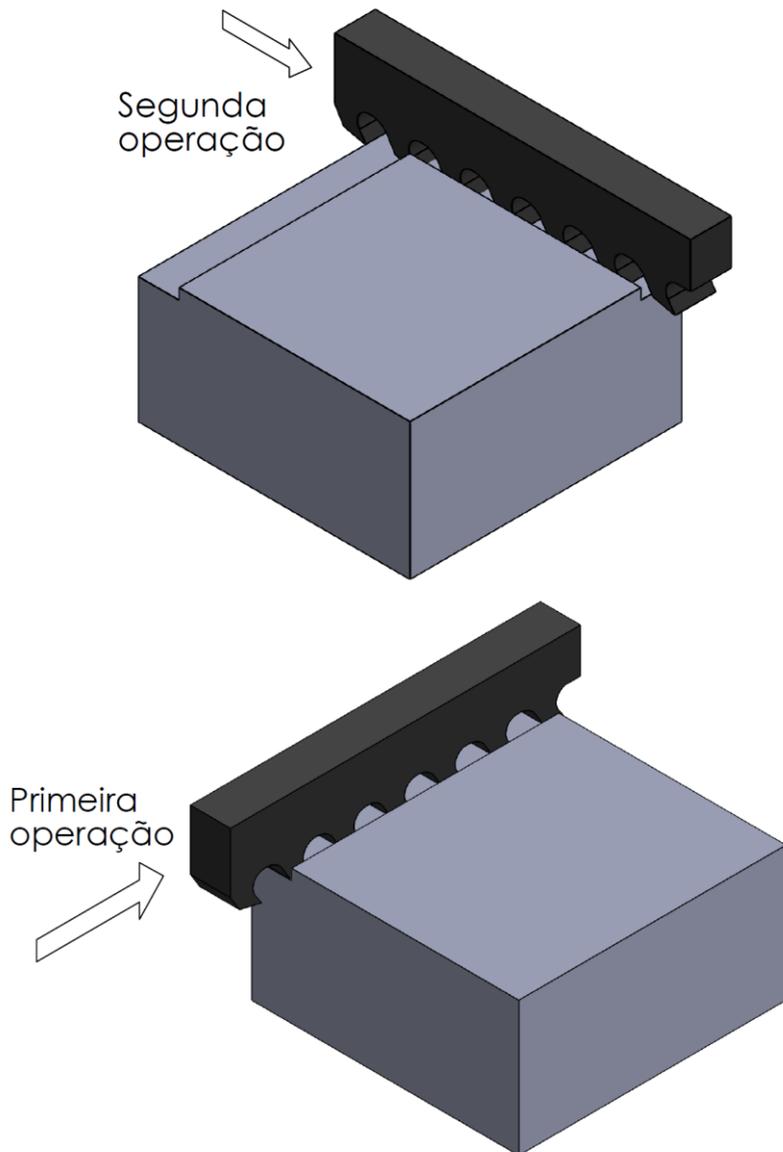


Figura 2.5 – Várias operações para uma mesma superfície

2.2 FERRAMENTA DE CORTE

Denominada brocha, a ferramenta do brochamento geralmente possui dimensão elevada para o comprimento em relação à seção transversal. Exemplos de brocha são expostas na Figura 2.6. O gume da ferramenta é dividido entre vários dentes dispostos em série, onde suas formas progressivamente se aproximam cada vez mais do perfil a ser brochado, do primeiro ao último dente (STEMMER, 2005).

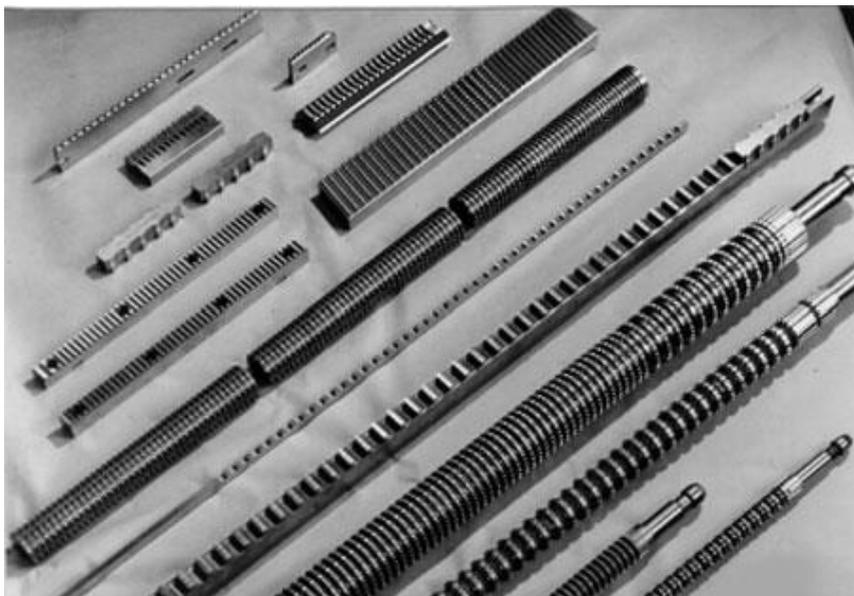


Figura 2.6 – Exemplos de brochas

Fonte: Forst *apud* Klocke (2011).

Os dentes são divididos em três grupos principais ao longo do comprimento da brocha: dentes de desbaste, de semi-acabamento e acabamento (HUANG, 1989).

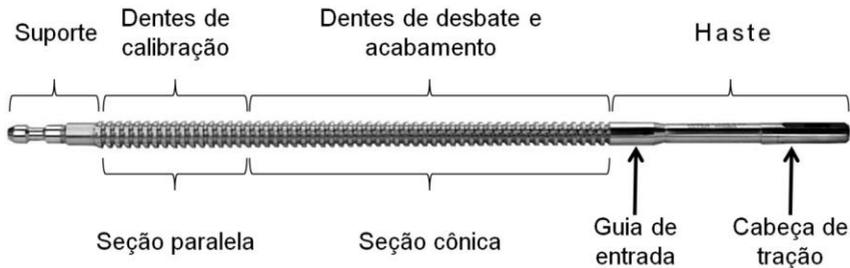


Figura 2.7 – Divisões de uma brocha de tração

Fonte: Gonçalves (2009b).

Conforme ilustrado na Figura 2.7, as partes que compõem uma brocha de acionamento trativo podem ser descritas como (GONÇALVES, 2009a):

- **Haste:** composta pela cabeça de tração e guia de entrada, localiza-se na região anterior da ferramenta;
- **Cabeça de tração:** componente da ferramenta a qual é fixada ao mandril da máquina-ferramenta, transmitindo o movimento e tração necessários para a realização da usinagem do material. Sua seção transversal possui a menor área de toda a brocha, sendo portanto submetida à maior tensão, e tomada devido a isto como referência para o dimensionamento da ferramenta. Para facilitar a utilização, padroniza-se a cabeça de tração de acordo com a norma DIN 1415, para o uso da ferramenta em diversas máquinas-ferramentas (DROZDA, 1983);
- **Guia de entrada:** região responsável pelo guiamento da ferramenta através do eixo de direção no início do brochamento, evitando desvios e descentralizações. Sua geometria depende do perfil a ser brochado e seu comprimento dever ser igual ou maior que o comprimento do furo a ser usinado. Tem função também de verificação da dimensão do pré-furo realizado antes do brochamento, para evitar forças elevadas no primeiro dente ou fileira de dentes da ferramenta.
- **Guia posterior:** localiza-se ao final da ferramenta, após os dentes de reserva, com a função de orientação da brocha durante a usinagem com os últimos dentes e proteção contra queda da ferramenta após a usinagem.
- **Segmentador de cavacos:** para o caso das brochas, onde o espaço para cavaco é confinado, o controle de formação do cavaco se torna primordial. Para evitar que o acúmulo de cavacos promova

entupimento das bolsas da ferramenta, entalhes retificados são empregados nos primeiros dentes de desbaste, dispostos de forma alternada conforme ilustrado na Figura 2.8, para que o dente subsequente remova marcas do segmentador de cavaco da fileira de dentes anterior (STEMMER, 2005).

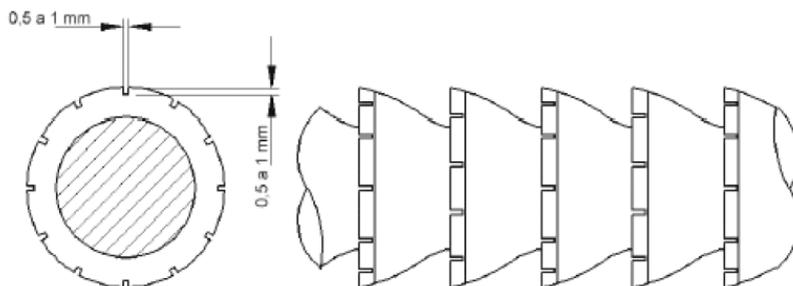


Figura 2.8 – Segmentador de cavacos em brochas
Fonte: Stemmer (2005).

- **Dentes:** realizam o corte do material. Cada dente age de forma igual à usinagem com geometria definida. Cada grupo de dentes tem funções distintas (STEMMER, 2005):
 1. Dentes de desbaste: são os primeiros dentes a remover material e são responsáveis pela maior remoção no brochamento, com penetração por avanço mais significativos, sem a preocupação com o acabamento final.
 2. Dentes de acabamento: removem pouco material no corte, com penetrações por avanços menores, com o objetivo de assegurar uma qualidade de superfície superior.
 3. Dentes de reserva ou de calibragem: têm como característica principal a igualdade na forma e dimensões, com ausência da diferença de altura entre dentes, ou seja, sem penetração por avanço. Sua função é garantir a dimensão final mesmo com desgaste dos dentes de desbaste e acabamento, pois tendo ângulo de incidência $\alpha = 0^\circ$, reafiações nesses gumes não prejudicam a altura dos dentes e consequentemente, a dimensão final da peça.
 4. Ressaltos de alisamento abaulados: presentes em determinadas brochas para realizar o esmagamento da superfície usinada, os ressaltos são dispostos após os dentes (Figura 2.9), com sobremedida na ordem de micrometros.



Figura 2.9 – Ressaltos de alisamento em brochas
 Fonte: Mello (2001).

Pesquisas voltadas à melhoria da qualidade de superfície com deformações por brochamento avaliaram os efeitos dos ressaltos. Shchedrin *et al* (2009) quantificaram a força de deformação de brochamento por unidade de circunferência (Figura 2.10), de acordo com a equação 2.1:

$$q_d = \frac{F}{\pi D} \quad [\text{N/mm}] \quad (2.1)$$

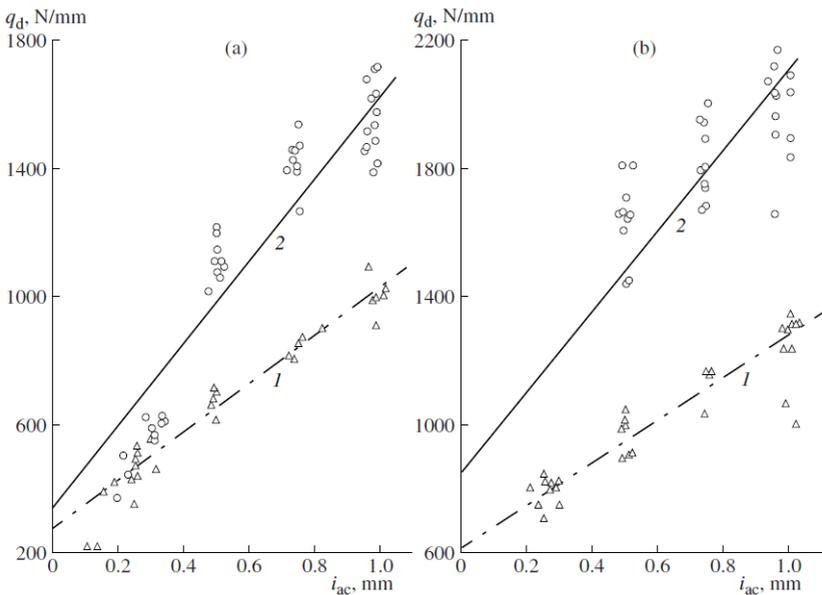


Figura 2.10 – Força de deformação em relação à folga entre peça e ressalto da broca. Liga de cobalto X40
 Fonte: Shchedrin *et al* (2009)

O número de dentes, bem como o perfil de cada um, são de extrema importância para o projeto da brocha, pois essas características alteram os resultados do custo da ferramenta e da usinagem, tempo de ciclo do processo, qualidade de superfície etc. (KÖKTÜRK, 2004). Na Figura 2.11 estão ilustradas duas formas de remoção de volume de material para se obter a mesma superfície brochada. No primeiro caso, à medida que a altura dos dentes vai se elevando, o comprimento de corte diminui, resultando em um esforço de corte menor para os dentes posteriores. Já no segundo caso, em alguns perfis o comprimento não diminui o suficiente com o incremento da altura para que o esforço seja menor, o que pode acarretar em esforços de corte muito elevados durante o brochamento, sendo que o último corte tem como objetivo um acabamento superior nas superfícies laterais.

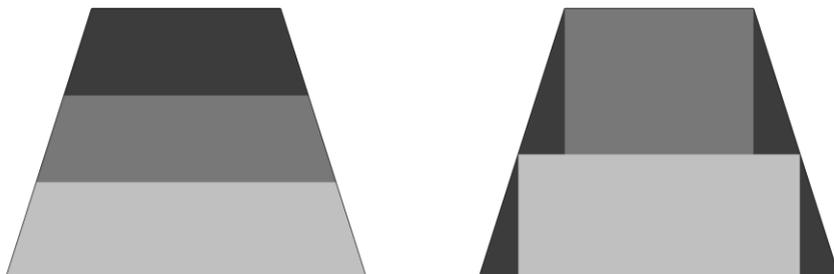


Figura 2.11 – Divisão de volume de usinagem entre os dentes da brocha

Fonte: Adaptado de Köktürk (2004).

2.2.1 Geometria dos gumes e sua influência

Como em qualquer outro processo de usinagem com ferramenta de geometria definida, a geometria do gume, bem como dos elementos adjacentes ao contato entre ferramenta e peça, interferem no resultado da usinagem. A geometria dos dentes deve ser projetada de tal forma a se adaptar ao material da peça, da ferramenta e das condições da máquina, pois este conjunto de fatores determinará o mecanismo de formação dos cavacos, os esforços de corte, desgaste do gume e as características da superfície após o corte (KÖNIG, KLOCKE, 1997). Os principais parâmetros geométricos dos gumes da brocha são indicados na Figura 2.12.

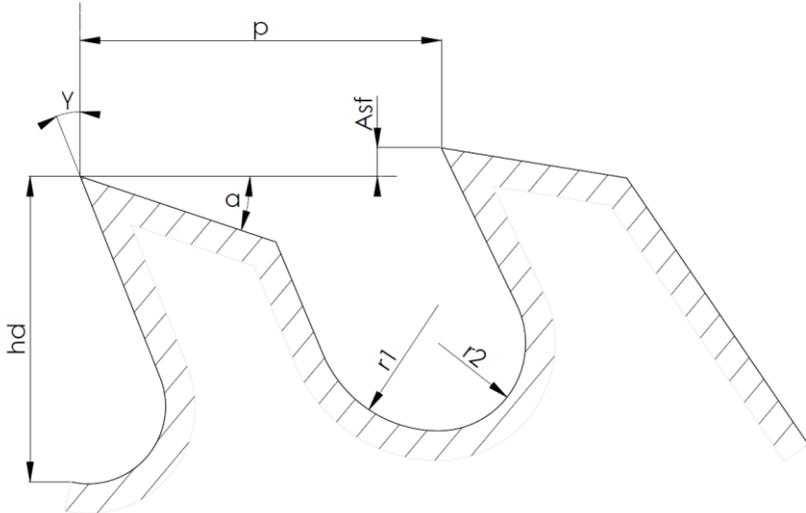


Figura 2.12 – Parâmetros geométricos dos dentes da brocha

Fonte: Adaptado de Gonçalves (2009a).

- **Ângulo de Saída [γ]:** de equivalente importância como nos outros processos de usinagem com ferramenta de geometria definida, o ângulo de saída determina a inclinação da face de saída da ferramenta em relação à peça, geometria essa de grande influência nos mecanismos de formação e adesão do cavaco, bem como na força (vide Figura 2.13, que demonstra seu efeito sobre a força de corte em ensaios de torneamento de AISI 1040) e temperatura de corte. Esse ângulo pode ser tanto negativo quanto positivo. Valores mais positivos acarretam em ângulos de cisalhamento maiores, promovendo uma menor deformação do material do corte e, por conseguinte, menor esforço de corte, com os inconvenientes de enfraquecimento do dente e quebra de cavaco insuficiente. Valores mais negativos estabilizam o dente, útil para aplicações de corte interrompido e com carepas de processos anteriores, no entanto, aumenta-se muito a deformação do material no corte, bem como o esforço de corte (KÖNIG e KLOCKE, 1997).

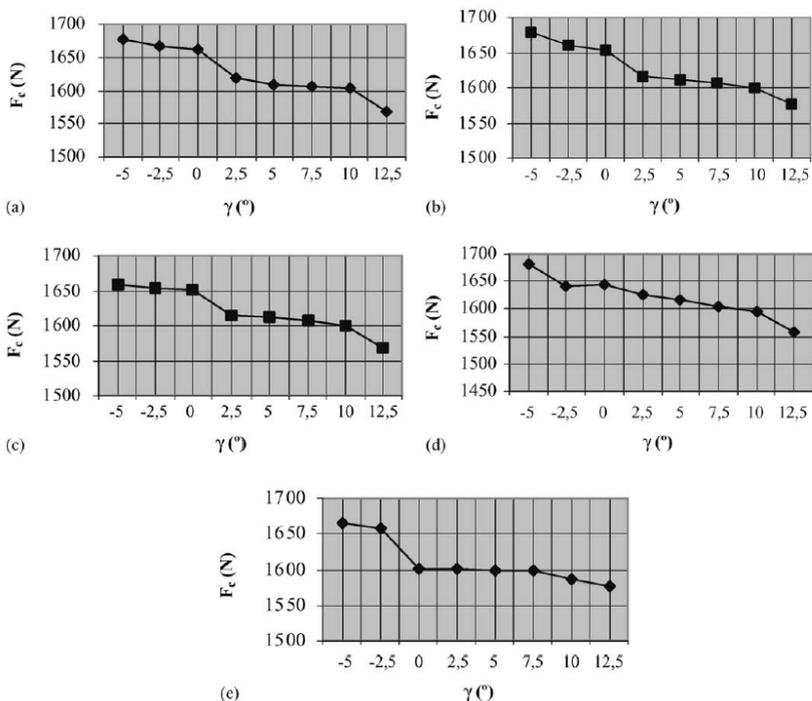


Figura 2.13 – Alterações na força de corte com a mudança do ângulo de saída
 a) $v_c = 80$ m/min. b) $v_c = 100$ m/min. c) $v_c = 120$ m/min. d) $v_c = 150$ m/min. e) $v_c = 180$ m/min

Fonte: Günay *et al* (2005).

- **Ângulo de Incidência [α]:** tem como principal função evitar o atrito entre o flanco da ferramenta e a superfície usinada da peça, evitando a marca de desgaste de Flanco VB. Porém, este ângulo deve ser o menor possível a fim de evitar o enfraquecimento do dente que pode ocasionar lascamento e quebra (KÖNIG e KLOCKE 1997). Para os dentes de calibração, é usual utilizar ângulo de incidência $\alpha = 0^\circ$ na região logo após o gume no flanco, possibilitando reafiações dos dentes sem comprometer as tolerâncias dimensionais de projeto (RAJAM, 1997). Ângulos de incidência e saída comumente utilizados estão representados na Tabela 2.1.
- **Penetração de avanço [A_{sf}]:** o escalonamento entre os dentes sucessivos determinam a penetração por avanço no brochamento. Quanto maior a dureza do material da peça a ser usinada, menor o

valor da penetração de avanço, proporcionando um esforço de corte por dente controlado, a fim de evitar quebras do mesmo, e também evitar um esforço excessivo no corpo da brocha, no momento em que vários dentes estejam removendo material. Em contrapartida, há um limite mínimo para penetrações de avanço, pois valores muito pequenos podem promover apenas recalque ao invés de corte do material. Sua função é similar à espessura de usinagem $[h]$ de outros processos, com o ângulo $\kappa_r = 0^\circ$ (Figura 2.14). Seu projeto, porém, é mais crítico, pois este parâmetro é fixo, impossibilitando seu ajuste durante a realização do processo (STEMMER, 2005). Para que o resultado seja satisfatório, o projeto deve levar em consideração os seguintes requisitos:

1. Propriedades mecânicas do material da peça, principalmente dureza e tenacidade;
2. Tipo de brochamento;
3. Acabamento de superfície desejado;
4. Tolerâncias estipuladas;
5. Volume de material a ser removido;
6. Comprimento da usinagem e tamanho da brocha;
7. Rigidez da peça e ferramenta.

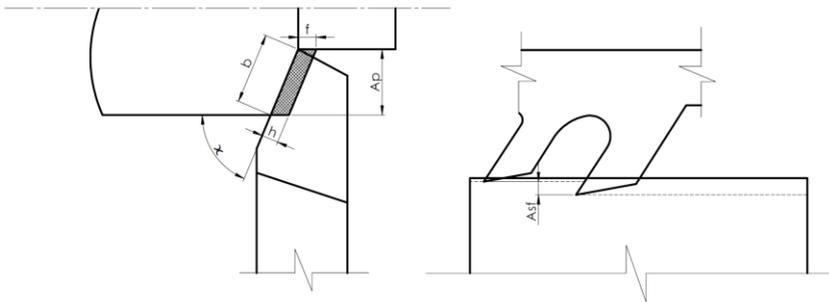


Figura 2.14 – Equivalência entre largura de usinagem e penetração de avanço
Fonte: Adaptado de König e Klocke (1997).

- **Passo $[p]$:** definido como a distância linear entre dois gumes subsequentes, o passo é um item notório no projeto da brocha, influenciando diretamente o comprimento total da ferramenta, espessura de usinagem, número de dentes atuantes durante o passe da brocha, e conseqüentemente, a força total (RAJAM, 1997). Com passo grande, poucos dentes estarão atuantes simultaneamente, totalizando uma força menor, com maior espaço

para o cavaco gerado, porém obrigando um comprimento demasiado para a brocha (ÖZTURK, 2003). Assim, o passo deve ser projetado equilibradamente, evitando ser grande, para evitar longas brochas com longos tempos de usinagem, nem pequeno, possibilitando a fluidez da formação do cavaco. De maneira geral, o passo pode ser determinado com a seguinte equação (HSS FORUM, 2005):

$$p = (1,2 \dots 2)L^{0,5} \quad (2.2)$$

onde “L” engloba somente o comprimento real a ser brochado. Cavidades, rebaixos e vazios não são considerados, conforme exemplificado na Figura 2.15.

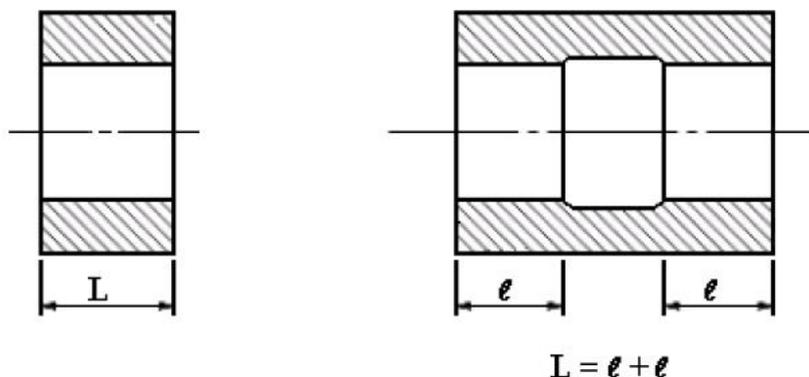


Figura 2.15 – Comprimento “L” usinável
Fonte: HSS FORUM (2005).

- **Raios de curvatura da bolsa de cavacos [r1 e r2]:** juntamente com a altura dos dentes e o passo, determinam o volume de alojamento dos cavacos e sua formação, fenômenos críticos no brochamento, pois a remoção do cavaco só acontece no fim da passagem da brocha sobre a superfície, e seu acúmulo e entupimento promoveria quebra da brocha. Denominado raio de concordância da face, “r1” tem função de aumentar a resistência do dente e orientar o enrolamento do cavaco formado. “r2” ocorre nos casos de passos grandes da brocha, sendo denominado como raio de concordância do dorso do dente (STEMMER, 2005).

- **Altura do dente [hd]:** diretamente independente do passo. Juntos eles formam o volume de armazenagem da bolsa de cavacos. Grandes passos com pequenas penetrações de avanço permitem alturas de dente pequenas, e vice-versa (STEMMER, 2005).

Tabela 2.1 – Ângulos de Saída e Incidência típicos no brochamento

Material	Ângulo de Saída [°]	Ângulo de Incidência [°]
Alumínio	6-10	...
Metal Patente	8-10	...
Latão	-5-5	2-3
Bronze	0	0,5-2
Ferro Fundido	6-10	2-5
Cobre	15	2-3
Zinco	6	...
Liga de alumínio e bronze	15	2-3
SAE 1037	15	1-2
SAE 1112	15	2,5
SAE B-1113	15	2-3
SAE 1340	12	1-2
SAE 4140	8-15	1-3
SAE 4337	8-15	1-3
SAE 5140	15	1-2
SAE 5140 type 410	18 (Desbaste)	2
Inox	20 (Acabamento)	2
SAE 9310	18 (Desbaste)	2
	20 (Acabamento)	2
Aço inox 303	15	0,5-2
Aço inox 304	15	0,5-2
Aço inox 403	15-20 (Desbaste)	3
	30 (Acabamento)	5
Aço inox 431	Até 28	...

Fonte: American Machinist Magazine (1979).

2.3 MATERIAIS DE FERRAMENTA

Cronologicamente, os principais materiais utilizados para ferramenta em usinagem se desenvolveram de acordo com a Figura 2.16 (KÖNIG e KLOCKE, 1997). Em geral, quando se aumenta a dureza e a resistência ao desgaste, a tenacidade diminui, bem como a ductibilidade.

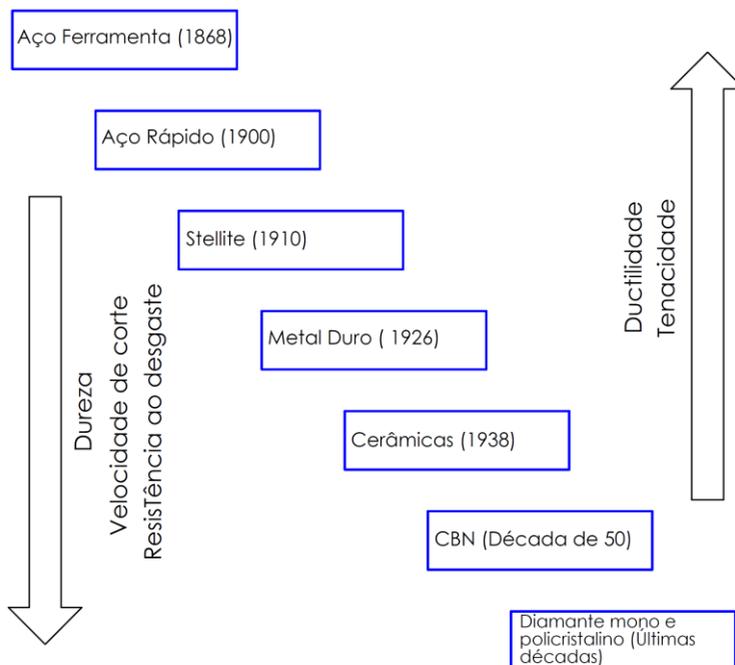


Figura 2.16 – Cronologia dos materiais para ferramentas

Fonte: Adaptado de König e Klocke (1997).

A seleção do material para uma ferramenta deve ser feita de forma criteriosa, ponderando a equilibrando vários fatores, dentre os quais (DINIZ *et al*, 2006):

- Material a ser usado:** a dureza e o tipo de cavaco formado por determinado tipo de material são características que influenciam diretamente na escolha do material da ferramenta.
- Processo de usinagem:** os parâmetros de cada processo requisitam certos comportamentos da ferramenta. Materiais mais nobres de ferramentas são inviáveis para processos rotativos de pequeno

diâmetro, pois a velocidade de rotação da máquina necessária para atingir eficiência da ferramenta seria muito alta.

- c. **Condição da máquina-ferramenta (potência, gama de velocidades, estado de conservação etc.):** máquinas em más condições, com folgas, baixa potência etc. exigem materiais de ferramenta mais tenazes e com velocidade de corte ótima mais baixa.
- d. **Forma e dimensões da ferramenta:** em muitos processos, são utilizadas ferramentas de formas não padronizadas que exigem brasagem entre o suporte e a ferramenta, como o aço-rápido ou metal-duro. Ferramentas rotativas de pequenos diâmetros exigem materiais de velocidades de corte baixas.
- e. **Custo do material da ferramenta:** o custo benefício entre preço e vida da ferramenta/menor produção tem de ser satisfatório.
- f. **Condições de usinagem:** condições típicas de acabamento remetem ao uso de ferramentas com menor tenacidade e maior resistência ao desgaste, pois realizam corte de material já usinado, com baixos níveis de excentricidade e/ou superfícies endurecidas, baixas penetrações de avanço, altas velocidades de corte. Em contrapartida, condições de desbaste são inversas às de acabamento, exigindo ferramenta mais tenaz e com menor resistência ao desgaste.
- g. **Condições da operação:** cortes interrompidos, folgas e flexões no sistema máquina-ferramenta/fixação/ferramenta/peça exigem tenacidade por parte do material da ferramenta.

Estes fatores desencadeiam e determinam fenômenos físicos, químicos e térmicos durante o corte. Assim, para cada um deles a ferramenta se comportará de maneira satisfatória ou não de acordo com suas propriedades mecânicas e metalúrgicas, destacadas por (DINIZ *et al*, 2006):

- Dureza a quente: em algumas operações, a temperatura de corte ultrapassa 1000° C, e materiais que mantêm dureza e resistência mecânica suficientes para o corte a tais temperaturas são requeridos.
- Resistência ao desgaste: principalmente resistência a abrasão, está intimamente ligada à dureza a quente de um material. Desgastes diminuem a qualidade do gume, comprometem a qualidade da superfície, tolerâncias dimensionais e aumentam a força de corte.

- Tenacidade: energia necessária para colapso do material. Propriedade necessária para que a ferramenta resista aos choques mecânicos do processo de usinagem.
- Estabilidade química: propriedade importante para evitar desgastes do gume por difusão atômica, com ocorrências em velocidades de corte e temperatura altas.

Nos primórdios da história do brochamento, a ferramenta era fabricada exclusivamente com aços-ferramenta temperados em água, o único disponível, material cuja capacidade atendia os requisitos necessários de acordo com maquinário e esforços envolvidos daquela época, com velocidades de corte baixas, promovidas por acionamentos de fuso (GONÇALVES, 2009).

Dentro da indústria, a busca por maior produção demandou por máquinas com maior velocidade de corte, limitando o uso de aços ferramentas, devido principalmente à maior temperatura gerada no processo, que enfraquece esse material e o expõe a maiores desgastes e avarias. Esta evolução tecnológica do brochamento culminou em uma predominância de aços-rápidos para fabricação de brochas (ASM, 2005).

2.3.1 Aço-rápido

Uma evolução do aço-ferramenta, o aço-rápido é assim denominado devido à capacidade de ter suportado as mais altas velocidades na época de seu desenvolvimento, em 1903. Essa evolução se deu metalurgicamente, onde sua composição é de aço-ferramenta de alta liga de tungstênio, molibdênio, cromo, vanádio, cobalto e nióbio (DINIZ *et al*, 2006). A estrutura metalográfica do aço-rápido temperado é martensita básica com incrustação de carbonetos, e suas propriedades mecânicas são interessantes no âmbito da usinagem, pois esse material se comporta com mais tenacidade e com elevada resistência ao desgaste e dureza a quente, se comparado com o aço-ferramenta.

Essa dureza a quente se deve à estrutura martensítica, e será mais elevada quanto maior for a dissolução e manutenção dessa dissolução dos elementos de liga após tratamento térmico, e o grau de dissolubilidade destes determina a tenacidade do material. Já a resistência à abrasão é de responsabilidade da quantidade de carbonetos duros formados em sua estrutura (DINIZ *et al*, 2006).

Os tipos de aços-rápidos mais usados são divididos em categoria “T”, tendo como principal elemento de liga o tungstênio, e a categoria “M”, com o molibdênio como elemento de liga predominante. Essas duas categorias estão apresentadas na Tabela 2.2.

Tabela 2.2 – Composição e características dos aços rápidos

Tipo de aço	Clas. SAE	C[%]	Mn[%]	Si[%]	Cr[%]	V[%]	W[%]	Mo[%]	Co[%]
Ao W	T1	0,70	0,30	0,25	4,00	1,00	18,00	-	-
	T2	0,85	0,30	0,25	4,00	2,00	18,00	-	-
	T3	1,00	0,30	0,25	4,00	3,00	18,00	-	-
	T7	0,80	0,30	0,25	4,00	2,00	14,00	-	-
	T9	1,20	0,30	0,258	4,00	4,00	18,00	-	-
Ao W-Co	T4	0,75	0,30	0,25	4,00	1,00	18,00	-	5,00
	T5	0,80	0,30	0,25	4,00	2,00	18,00	-	8,00
	T6	0,80	0,30	0,25	4,00	1,50	20,00	-	12,00
	T8	0,80	0,30	0,25	4,00	2,00	14,00	-	5,00
Ao Mo	M1	0,80	0,30	0,25	4,00	1,00	1,50	8,00	-
	M2	0,85	0,30	0,25	4,00	2,00	6,00	5,00	-
	M3	1,00	0,30	0,25	4,00	2,75	6,00	5,00	-
	M4	1,30	0,30	0,25	4,00	4,00	5,50	4,50	-
	M10	0,85	0,30	0,25	4,00	2,00	-	8,00	-
Ao Mo-Co	M4	0,80	0,30	0,25	4,00	1,50	4,00	5,00	12,00
	M30	0,85	0,30	0,20	4,00	1,25	2,00	8,00	5,00
	M34	0,85	0,30	0,25	4,00	2,00	2,00	8,00	8,00
	M35	0,85	0,30	0,25	4,00	2,00	6,00	5,00	5,00
	M36	0,85	0,30	0,25	4,00	2,00	6,00	5,00	8,00

Fonte: Chiaverini (1981)

2.3.2 Efeitos dos elementos de liga nos aços-rápidos

Acompanhando os fenômenos metalúrgicos, elementos de liga conferem propriedades mecânicas aos aços-rápidos. Exemplos de tipos de aços-rápidos formados e suas aplicações são listados na Tabela 2.3, além das aplicações de meta-duro em brochamento.

- **Carbono [C]:** similarmente aos aços carbono, tem como função aumentar a dureza e temperabilidade do material, e através dele há a possibilidade de formação de carbonetos, que são as partículas

duras precipitadas na matriz de martensita, concebendo resistência ao desgaste.

- **Tungstênio e molibdênio [W e Mo]:** são os principais elementos de liga que promovem a elevada resistência ao desgaste e dureza a quente. O tungstênio sempre está presente nos aços-rápidos, e o molibdênio é adicionado como substituto. Como o molibdênio tem cerca da metade do peso atômico, na substituição em peso na mesma porcentagem, é verificado o dobro de átomos que podem formar carbonetos. Nessas condições é usado 1% de molibdênio para substituir 1,6 a 2,0% de tungstênio em peso na composição química.
- **Vanádio e Nióbio [V e Nb]:** elementos que formam os carbonetos mais duro encontrado nos aços-rápidos. Para cada 1% de vanádio adicionado, é necessária a adição de 0,25% de carbono para a formação desse carboneto. Aços-rápidos com alto teor de carbono e vanádio são os que apresentam a maior resistência ao desgaste. Principalmente no Brasil, o vanádio tem sido substituído pelo nióbio, que é mais barato, tendo o Brasil como principal fornecedor e apresenta as mesmas características.
- **Cromo [Cr]:** junto com o carbono, tem função de melhorar a temperabilidade do aço-rápido.
- **Cobalto [Co]:** adicionado ao aço-rápido para elevar a temperatura de trabalho. Devido a esta característica, aços-rápido ligados ao cobalto são recomendados para cortes com desbaste pesado, ou usinagem de materiais que formam cavacos curtos, como o ferro fundido, ou onde não há possibilidade de uso de meios lubrificantes (DINIZ *et al*, 2006).

Tabela 2.3 – Materiais para brochas e respectivas aplicações

Classificação	Material a ser usinado
AISI M2	Uso geral, bronze, alumínio, magnésio, nylon, plásticos, chumbo, aços: 1020, 1063, 1112, 1340, 1345, B-1113, 4140, 4340, 5140, 8620 (26 HRC), aço inox 347 e 416 (35 a 40 HRC)
AISI M3	Aço inox 418 (32 a 38 HRC), Aço inox 403 (37 a 40 HRC), Aços liga: A-286 (32 a 38 HRC). M-252 (39 a 40 HRC), D-970 (40HRC), 4140 (32 HRC), 4337 (23 a 29 HRC), 4340 (32 a 38 HRC) 8617 (30 to 36 HRC), 8620 (32 HRC), 9310 (36 to 38 HRC), 9840 (32 to 36 HRC). Ferro fundido, Alumínio fundido sob pressão, grafite, Bronze
AISI M4	Aços com alto teor de silício, ligas de bronze com silício, alumínio fundido sob pressão
AISI M42	Aços: forjados, fundidos, inox, ferramenta, e de médio carbono (35 a 42 HRC).
AISI T2	Aços 1112, 4340 (35 a 40 HRC), aço inox 403 (30 a 35 HRC), ligas de titânio, Lapelloy (30 to 35 HRC), Greek Ascolloy (32 a 38 HRC), Discalloy (23 a 32 HRC), PWA-682 Ti (36 HRC), 19-9DL (20 to 27 HRC)
AISI T5	A-286 (29 HRC), Chromalloy (30 to 35 HRC), Incoloy 901, PWA-682 Ti (34 to 36 HRC)
AISI T15	Ligas: Alumínio 2219, A-286 (32 a 36 HRC), Stellite, 17-22(S) (29 a 34 HRC), N-155 (30 a 40 HRC), AMS 4925 Titânio (32 to 40 HRC), Waspaloy, Incoloy 901 (32 to 36 HRC), Aços com resistência a quente, Aços forjados: 4340 (35 to 40 HRC), 52100, 9310 (26 to 30 HRC), 17-4PH
Aços-rápidos sinterizados	Brochamento com velocidade de corte alta, aumento significativo na vida da ferramenta substituindo M2, M3, T15 entre outros.
Metal-duro	Ferro fundido cinzento

Fonte: Drozda e Wick (1983).

2.3.3 Metal-duro

Com aplicações ainda restritas, o metal-duro também é utilizado como substrato para fabricação de brochas. Chamadas de *hard broaches*, sua construção é distinta daquelas fabricadas em aço-rápido, com geometria diferenciada e constituição integral de metal-duro (ARTHUR KLINK *apud* ANDRADE, 2009). Sem resultados vantajosos ante ao aço-rápido nas velocidades usuais do brochamento, sua aplicação é indicada principalmente no brochamento de ferro fundido cinzento, que demanda alta resistência à abrasão por parte da ferramenta (ASM, 2005). Utilizado em processos de brochamento adaptados para velocidades altas (60 a 80 m/min), realiza operações de acabamento, substituindo operações de retificação, tendo como desvantagem na operação a exigência de rigidez elevada para evitar lascamento dos gumes.

2.3.4 Revestimento em aços-rápidos e metais-duros

Para várias operações de usinagem, como furação, operações para manufatura de engrenagens, abertura de roscas com macho, alargamento e brochamento, a forma e dimensão das ferramentas, bem como as condições de usinagem, principalmente a velocidade de corte, limitam o uso de materiais mais resistentes que o aço-rápido (DINIZ *et al*, 2006). Desta forma, muitas pesquisas visando a melhoria no desempenho de ferramentas estão voltadas para a melhoria do aço-rápido, através principalmente do uso de revestimentos mais resistentes ao desgaste sobre o substrato de aço-rápido e metal-duro, sendo os mais utilizados os nitreto de titânio (TiN) e carbonitreto de titânio (TiCN) (DINIZ *et al*, 2006). Dentre as características do TiN, pode-se citar:

- ✓ Dureza na ordem de 2300HV;
- ✓ Alta ductilidade;
- ✓ Redução sensível do calor de formação a frio (mecanismo responsável pela formação de gume postiço);
- ✓ Baixo coeficiente de atrito;
- ✓ Quimicamente inerte;
- ✓ Espessura na ordem de 1 a 4µm.

O revestimento de nitreto de titânio entrou em uso em escala industrial e comercial através do processo de deposição CVD (*chemical vapor deposition*), ou deposição química a vapor, na década de 60. No entanto, seu uso sobre o substrato de aço-rápido não era possível, pois a temperatura do processo de deposição alcançava 1000°C, alterando os resultados dos tratamentos térmicos anteriores. Já na década de 70, o

desenvolvimento do processo PVD (*physical vapor deposition*), ou deposição física a vapor, permitiu a deposição de camadas de revestimento sobre o aço-rápido atingindo temperaturas abaixo das necessárias para revenimento, as quais não prejudicam os tratamentos térmicos presentes nos aços-rápidos (DINIZ *et al*, 2006).

Na usinagem utilizando ferramenta revestida, o esforço de corte é menor, devido ao coeficiente de atrito menor. A resistência ao desgaste do revestimento ameniza as avarias no gume e nas superfícies adjacentes, principalmente na superfície de saída. Assim, é possível afirmar que, para as mesmas condições de corte, a ferramenta revestida tem uma vida maior, fato demonstrado para o caso de brochamento na Figura 2.17.

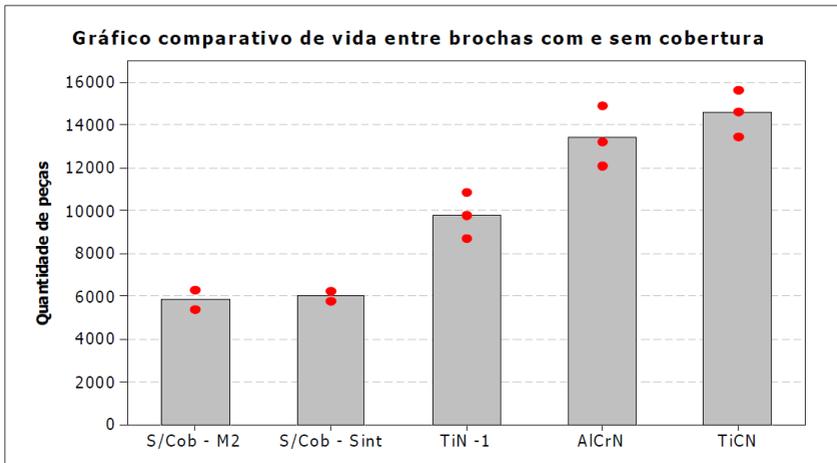


Figura 2.17 – Vida da ferramenta com ou sem revestimento

Fonte: Andrade (2009).

A eficiência do revestimento, ainda que menor, permanece mesmo após afiações, onde a ferramenta perderá o revestimento somente em uma superfície, de saída, ou de incidência, dependendo do tipo de reafiação (DINIZ *et al*, 2006), no caso do brochamento, a afiação será sempre na face de saída. A Figura 2.18 destaca este comportamento, comparando ferramentas não-revestidas, revestidas, e reafiadas depois de revestidas.

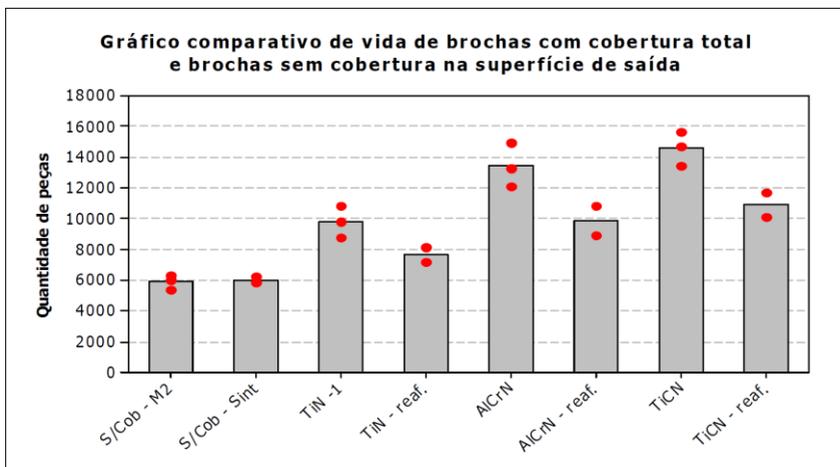


Figura 2.18 – Vida da ferramenta sem revestimento, revestida, e re-afiadas
 Fonte: Andrade (2009).

2.4 MÁQUINAS-FERRAMENTAS PARA O BROCHAMENTO

De forma simplificada, uma brochadeira consiste em um mecanismo capaz de executar o movimento relativo entre peça e ferramenta com potência necessária capaz de remover material da peça, com precisão, rigidez e velocidade requerida. Dentre os processos de usinagem, a brochadeira tem um custo menor se comparado às máquinas-ferramentas de outros processos, que apresentam ciclos de operações mais complexos para alcançar as formas e tolerâncias de projeto. Uma exceção é o caso do brochamento helicoidal, onde a máquina precisa executar, além do movimento de translação entre peça e ferramenta, um movimento de rotação em torno do eixo da brocha (STEMMER, 2005).

A seleção de uma brochadeira tem o tipo de brocha para o processo como item mais importante a ser avaliado. Em segundo lugar de importância, aparece a taxa de produção. Juntos, estes dois parâmetros geralmente já determinam o tipo de brochadeira adequada. O tamanho é determinado pela dimensão da brocha e da peça, potência requerida e o espaço disponível na planta industrial (ASM, 2005).

Para brochamento interno, o comprimento da brocha em relação ao diâmetro ou largura transversal pode determinar o sentido de acionamento, se deve ser por tração ou compressão para realizar o passe, pois pela sua geometria, as brochas suportam mais esforços de tração do que

compressão, devido principalmente à possibilidade de ocorrer flambagem (ASM, 2005).

Os meios lubri-refrigerantes, tamanho da peça, controle do cavaco e acabamento da superfície influenciam a escolha do tipo de brochadeira a ser usada, *pull-up* ou *pull-down*. As do tipo *pull-down* são mais utilizadas, pois a gravidade ajuda a alimentação de meios lubri-refrigerantes na região de corte, além do manuseio de peças de grande porte mais facilitado (ASM, 2005).

Outros fatores importantes a serem selecionados nas brochadeiras são convertibilidade, automação e o tipo de acionamento, que podem ser de forma hidráulica ou eletromecânica. Algumas brochadeiras permitem a conversão de trabalho interno para superfície externa.

As brochadeiras são divididas em três grandes grupos: verticais, horizontais e especiais. A Figura 2.19 desmembra estes grupos em suas variações.

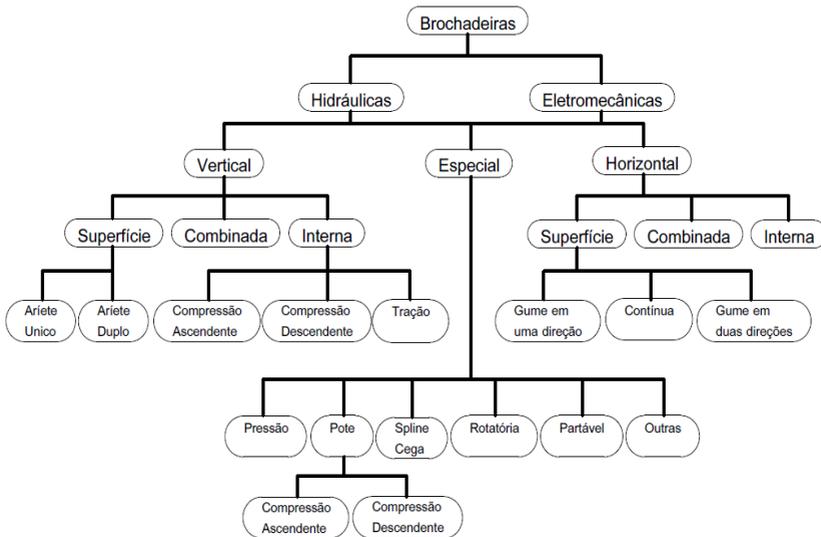


Figura 2.19 – Divisão das brochadeiras por aspectos funcionais

Fonte: Adaptado de ASM (2005).

2.4.1 Brochadeira horizontal

Tipo de brochadeira pioneira, a brochadeira horizontal foi sendo substituída gradualmente pelas verticais devido à desvantagem do grande espaço físico necessário para sua instalação. Cerca de 50% de todas as

brochadeiras em uso são horizontais, sendo as mesmas usadas exclusivamente para determinados trabalhos de usinagem, como desbaste e acabamento de bloco de motores (ASM, 2005). A Figura 2.20 é um exemplo esquemático de uma brochadeira horizontal hidráulica. Já a Figura 2.21 é um exemplo de brochadeira horizontal contínua, de alta produtividade.

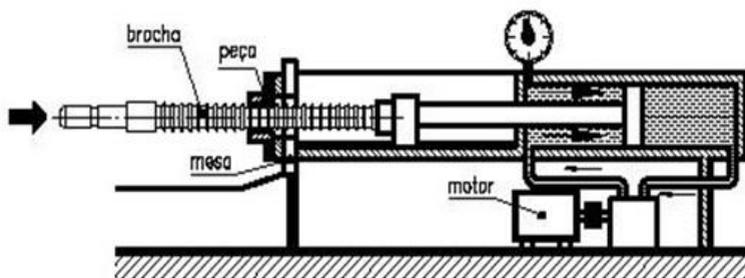


Figura 2.20 – Brochadeira horizontal hidráulica de tração
Fonte: Gonçalves (2009).

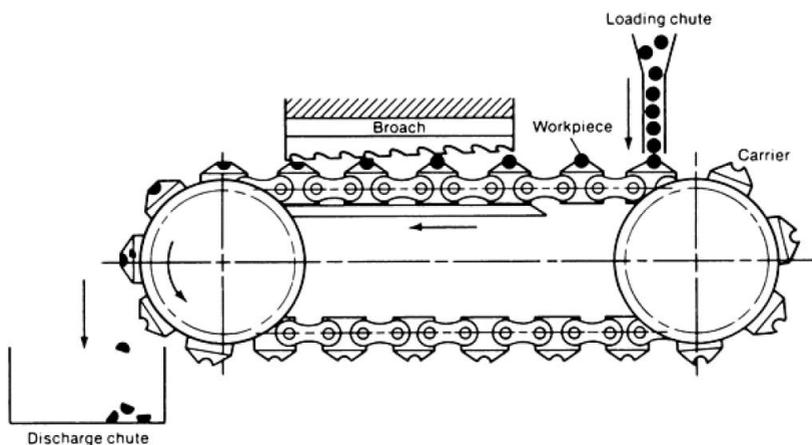


Figura 2.21 – Brochadeira horizontal contínua
Fonte: ASM (2005).

2.4.2 Brochadeira vertical

Esse grupo de brochadeiras representa uma parcela de 50% do total de máquinas para brochamento utilizadas na indústria, o qual é dividido

quase que equivalentemente entre brochadeiras verticais internas, de superfície ou combinada, tendo como acionamento do tipo hidráulico, em quase todos os casos. Tendo como vantagem o uso de pequeno espaço físico na planta, sua desvantagem é o pequeno curso de brochamento, limitado verticalmente pela altura acessível dos operadores e da construção das plantas industriais, ilustrado na Figura 2.22 (ASM, 2005).

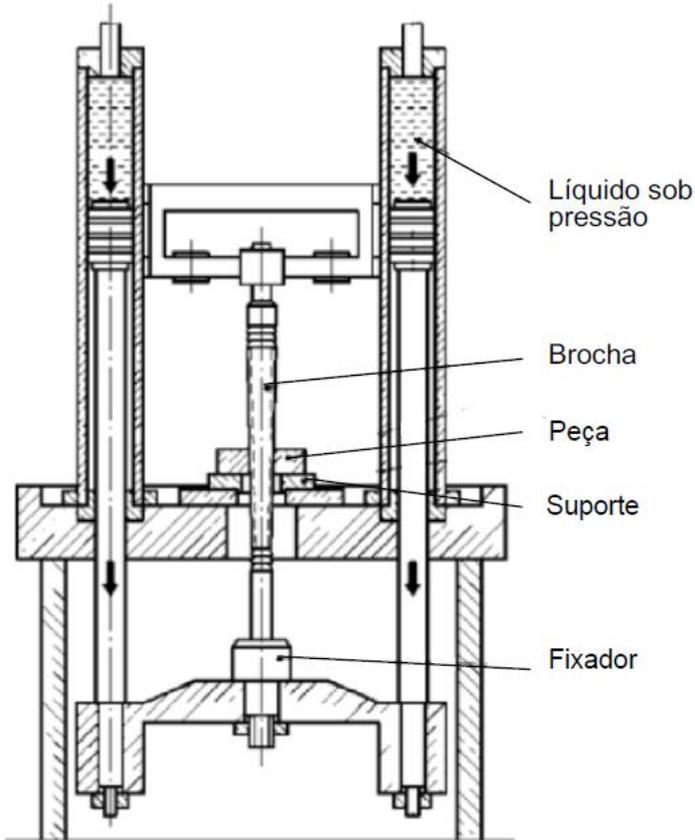


Figura 2.22 – Brochadeira vertical

Fonte: ASM (2005).

2.5 DESGASTE EM BROCHAS

O processo de fabricação por usinagem demanda condições extremas de forças, pressões de contato, altas temperaturas e ataque químico sobre a ferramenta de corte, devido à dificuldade apresentada

pelos materiais a serem trabalhados. Para obtenção de produtividade, a maioria das ferramentas é projetada para uso em seu limite de resistência contra estas condições extremas, especialmente no limite de tensões presentes e temperaturas alcançadas (HOGMARK e OLSSON, 2005).

Os mecanismos de desgaste são fortemente influenciados pela escolha da velocidade de corte (AZIZPOUR e MAJD, 2010). Além de estar sujeitas às mesmas características de mecanismos de desgaste que as outras ferramentas de usinagem, a brocha apresenta particularidades que implicam na predominância de certos mecanismos. Tais características inerentes ao brochamento são: baixa velocidade de corte, pequenos ângulos de incidência e espessura de usinagem, grandes ângulos de saída, atrito nos flancos dos dentes e afinidade química entre material da peça (aço) e ferramenta (aço-rápido) (DROZDA, 1983).

Esses mecanismos são resultantes da interação entre ferramenta e peça e alteram a geometria da ferramenta, bem como sua eficiência durante o corte (KONIG e KLOCKE, 1997). A Figura 2.23 ilustra os princípios dos mecanismos de desgaste sobre ferramentas de geometria definida.

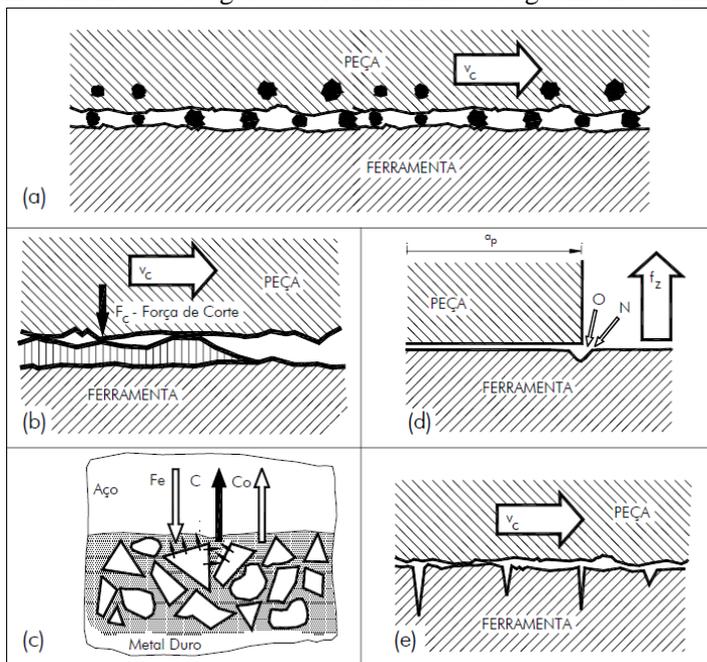


Figura 2.23 – Mecanismos de desgaste em ferramentas de geometria definida
a) Abrasão, b) Adesão, c) Difusão, d) Oxidação, e) Fadiga térmica ou mecânica
Fonte: Valle (2001).

O entendimento da ocorrência desses mecanismos de desgaste na usinagem requer uma compreensão básica das condições severas a que a ferramenta fica exposta durante o corte de materiais. Uma dessas condições é a temperatura alcançada nas regiões próximas ao gume e raiz do cavaco, conforme Figura 2.24. Este perfil de temperatura para um caso ortogonal é gerado pelo cisalhamento do material de trabalho e do deslizamento deste sobre as superfícies de flanco e saída da ferramenta. As principais fontes de geração de calor estão localizadas na zona de cisalhamento primária e no contato de atrito entre cavaco e ferramenta, denominada zona de cisalhamento secundária (HOGMARK e OLSSON, 2005). Os diversos tipos de desgaste resultantes dessas condições severas que se propagam na ferramenta durante um corte ortogonal podem ser vistos na Figura 2.25.

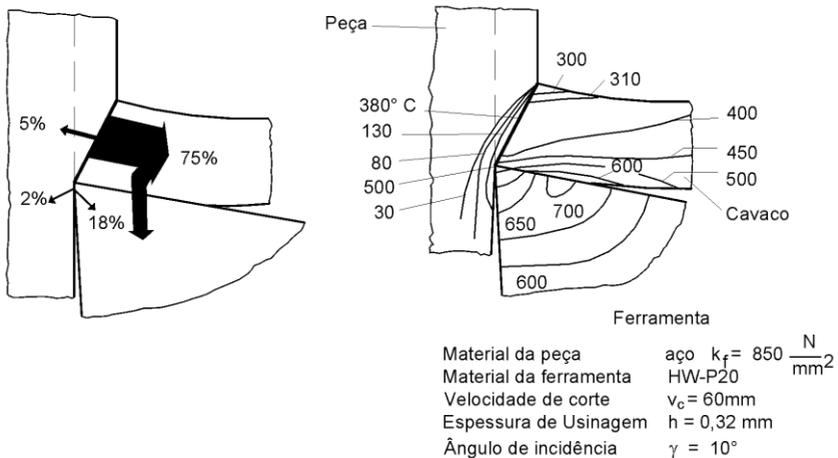


Figura 2.24 – Perfil de temperatura em usinagem ortogonal usando metal duro
Fonte: König e Klocke (1997).

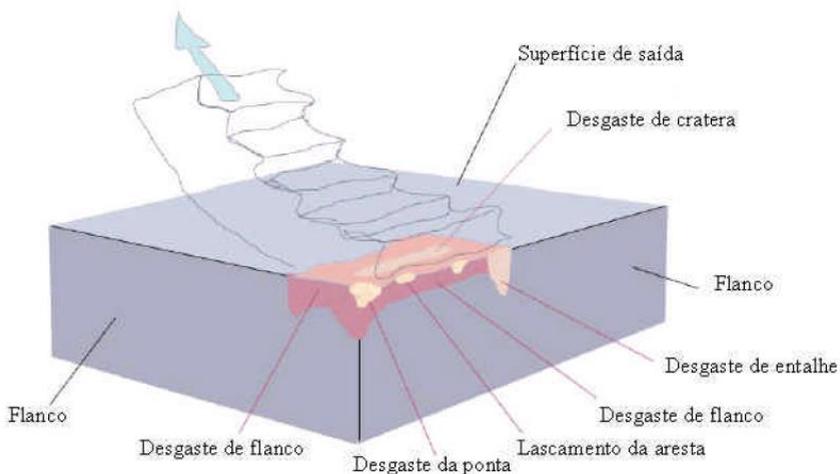


Figura 2.25 – Desgastes na ferramenta de corte

Fonte: Hogmark e Olsson (2005).

2.5.1 Desgaste por abrasão

Mecanismo de desgaste mais comum, tendo como origem a ação de partículas duras com dureza maior que o material da ferramenta, que ao passar pela superfície desta, removem quantidades de material (KÖNIG e KLOCKE, 1997) (Fig 2.23a). Estas partículas podem estar contidas no material da peça em forma de carbonetos e/ou nitretos, e normalmente provocam desgaste na forma de riscos paralelos a direção de formação do cavaco (Figura 2.26), sendo a principal causa do desgaste de flanco na ferramenta (TRENT, 2000).

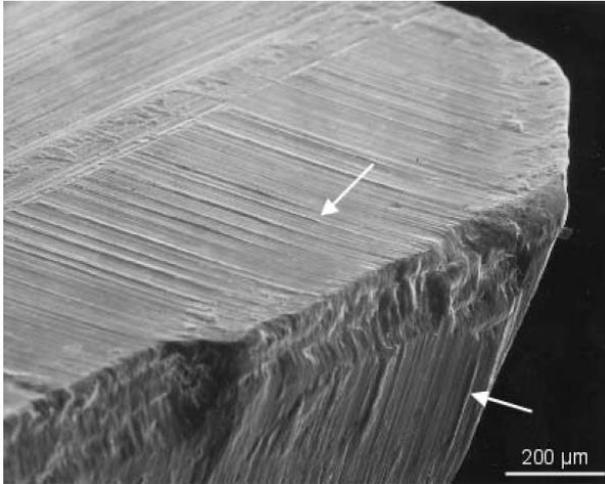


Figura 2.26 – Desgaste abrasivo
Fonte: Hogmark e Olsson (2005).

2.5.2 Desgaste por difusão

Tem como causa a afinidade química entre material da peça e da ferramenta, ocorrendo uma solubilidade mútua entre ambas pelas altas temperaturas alcançadas em velocidades de corte altas (Fig 2.23c). Para aços-rápidos e aços-ferramenta também não tem tanta importância, pois nas temperaturas que ocorrem difusão, já houve amolecimento por parte do material da ferramenta (KÖNIG e KLOCKE, 1997). Após o alcance de temperatura de difusão, a cada incremento de mais ou menos 20°C na temperatura, a taxa de difusão pode dobrar (HOGMARK e OLSSON, 2005). O caso mais característico de difusão é a que acarreta o desgaste de cratera.

2.5.3 Desgaste por adesão

A adesão é resultado de caldeamentos de material da peça sobre a ferramenta. Esses caldeamentos são resultados da pressão elevada na região, entre a superfície inferior do cavaco e superfície da ferramenta, esta última livre de óxidos (Fig 2.23b) por tempo suficiente entre materiais com afinidade em baixas temperaturas. As perturbações decorrentes do fluxo de material sobre essas caldeamentos provocam seu lascamento, resultando em desgaste semelhante ao abrasivo (Figura 2.27). Tal desgaste tem maior ocorrência para baixas velocidades de corte, principalmente com a

formação de gume postiço (KÖNIG e KLOCKE, 1997). Meio lubri-refrigerantes e/ou revestimentos de baixo coeficiente de atrito reduzem esse mecanismo de desgaste (DINIZ, 2005).

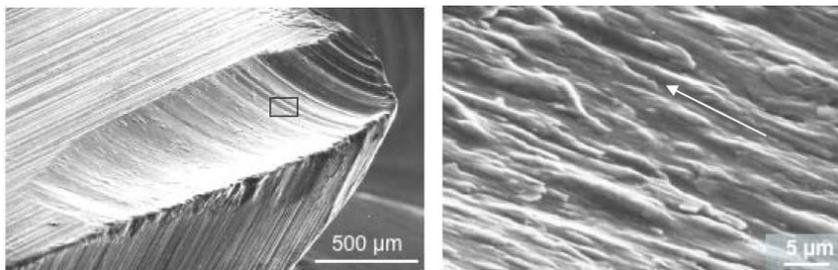


Figura 2.27 – Desgaste por adesão

Fonte: Hogmark e Olsson (2005).

2.5.4 Desgaste por deformação plástica

Não necessariamente considerado como desgaste, a combinação de altas pressões de compressão e altas temperaturas durante o corte aceleram os processos que reduzem a vida da ferramenta (TRENT, 2000). Geralmente iniciando-se no raio do gume da ferramenta, ela se propaga irregularmente sobre todo o gume (Figura 2.28). Ocorre principalmente quando se usinam materiais de dureza elevada que impedem o uso de aço-rápido como material da ferramenta.

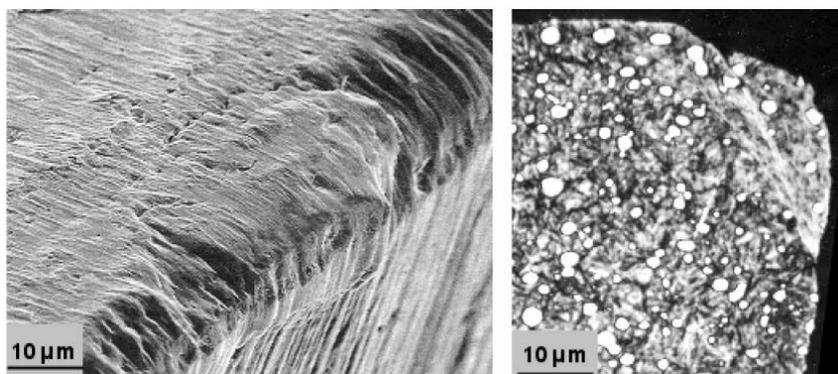


Figura 2.28 – Deformação plástica no gume de ferramenta de aço-rápido

Fonte: Hogmark e Olsson (2005).

2.5.5 Desgaste por fadiga e fratura

De rara ocorrência, existe a possibilidade de se apresentar grandes fraturas nas ferramentas de aço-rápido (Fig 2.23e). Porém, a maior probabilidade é a ocorrência de pequenos lascamentos decorrentes da fadiga térmica, devido às variações de temperaturas na ferramenta em cortes intermitentes, bem como fadiga mecânica por cortes interrompidos, ou por trincas iniciadas nas marcas de retificação paralelas ao gume, conforme Figura 2.29 (HOGMARK e OLSSON, 2005).

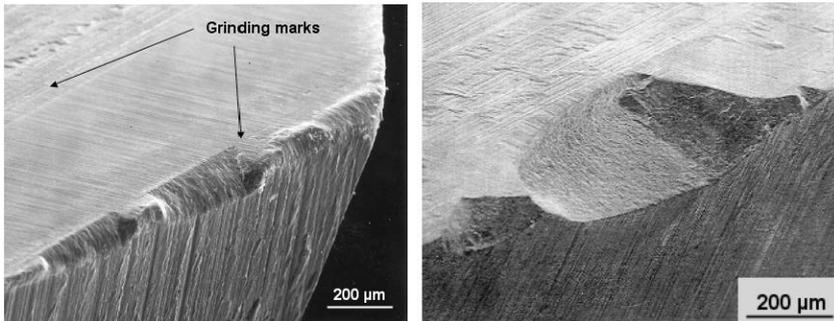


Figura 2.29 – Desgaste por fadiga e fratura
Fonte: Hogmark e Olsson (2005).

König e Klocke (1997) apresentam um gráfico sobre os mecanismos de desgaste mais predominantes dependentemente da temperatura, que por sua vez é dependente da velocidade de corte, avanço, entre outros (Figura 2.30). Assim, é possível concluir que no brochamento, os mecanismos de desgaste presentes são primordialmente por abrasão e adesão.

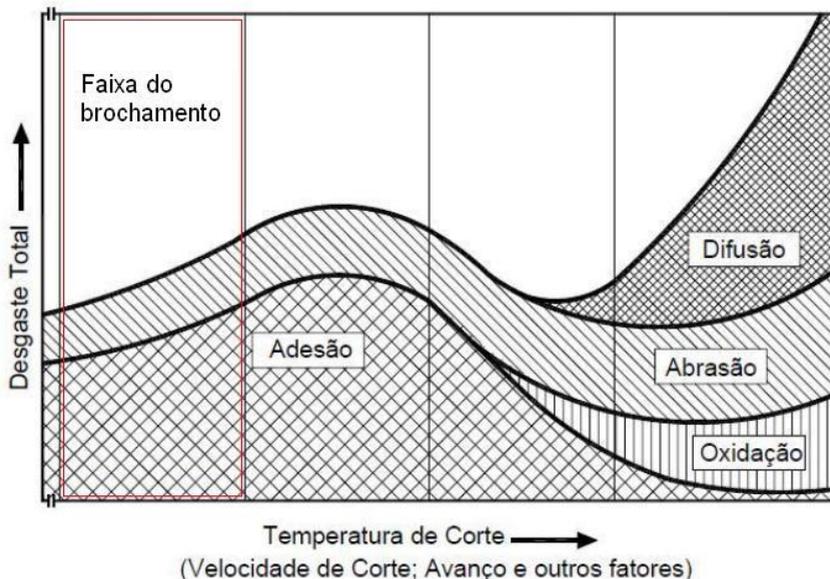


Figura 2.30 – Influência da temperatura sobre os mecanismos de desgaste
 Fonte: Vieregge apud König e Klocke (1997).

2.6 ESFORÇOS NO BROCHAMENTO

A força de brochamento é um parâmetro fundamental que afeta o processo de usinagem, pois resultados satisfatórios na usinagem requerem um controle preditivo das forças que ocorrem no processo, principalmente da componente na direção de corte. Com esses dados, é possível ter o controle sobre a potência de corte, tensão na ferramenta e nos dentes da brocha. A inviabilidade de obtenção de dados de força em condições reais torna necessário a modelagem para a predição das forças e otimização dos processos de usinagem, inclusive e criticamente no brochamento (ÖZTÜRK, 2003).

A dificuldade de manufatura de brochas impõe certa limitação na sua geometria, onde seus dentes são fabricados de forma a proceder ao corte de forma ortogonal, na grande parcela dos casos. No corte ortogonal, a força total no dente (F_t) é decomposta em duas direções (ÖZTÜRK, 2003), conforme ilustrado na Figura 2.31.

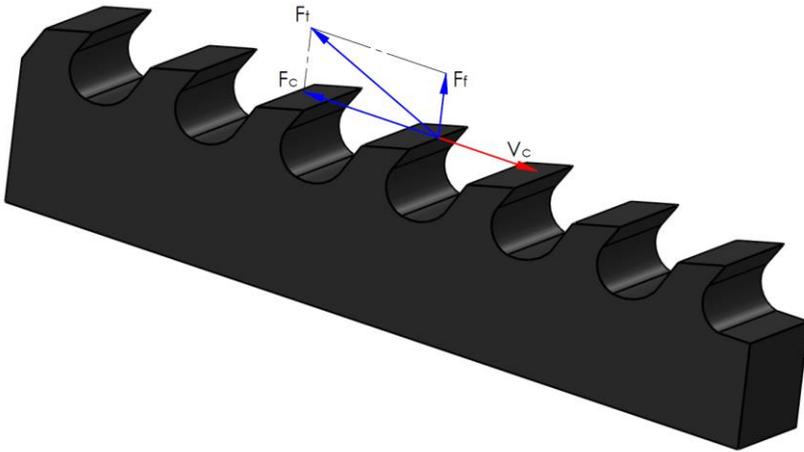


Figura 2.31 – Decomposição das forças em corte ortogonal
 Fonte: Gonçalves (2009a)

Onde:

F_c – é a força de corte na direção da velocidade de corte;

F_f – é a força passiva.

Para tal caso, (ALTINTAS, 2000) propôs um modelo nas duas principais direções do corte:

$$F_c = \sum_{i=1}^m (K_{cc} h_i b_i + K_{ce} B_i) \quad (2.3)$$

$$F_f = \sum_{i=1}^m (K_{fc} h b_i + K_{fe} B_i) \quad (2.4)$$

Onde:

m – número de dentes em corte simultaneamente, resultando a força total de usinagem em um determinado instante, conforme Figura 2.30;

h e b – espessura e largura de corte, ou do cavaco antes do corte;

K_e – força específica do efeito do gume, no caso de fresas;

K_c – é a força específica de corte, a qual é dependente do material da ferramenta e da peça, implicando em diferentes valores de força para diferentes combinações de pares ferramenta-peça. Segundo Budak *et al* (1996), a maneira mais fácil de se obter os valores da força específica de corte é realizando ensaios de usinagem ortogonal, cujo valores já alimentam modelos de força para fresamento,

torneamento, brochamento, entre outros. Outra maneira de obter o valor de K_c é analiticamente, conforme a equação 2.5 e Figura 2.32, figura que ilustra o teorema de geometria de Merchant (1945). Este modelo representa a força total de usinagem F_t em um diâmetro de um círculo, e suas componentes no interior desse círculo:

$$K_c = \left[\tau_s \frac{\cos(\beta-\gamma)}{\sin(\Phi)\cos(\Phi+\beta-\gamma)} \right] \quad (2.5)$$

Onde:

τ_s = Tensão de cisalhamento no plano de cisalhamento;

B = Ângulo de atrito;

γ = Ângulo de saída;

Φ = Ângulo de cisalhamento, que pode ser obtido através do princípio da mínima energia, proposto por Merchant (1945), Equação 2.6:

$$\Phi = \frac{\pi}{4} - \frac{(\beta-\gamma)}{2} \quad (2.6)$$

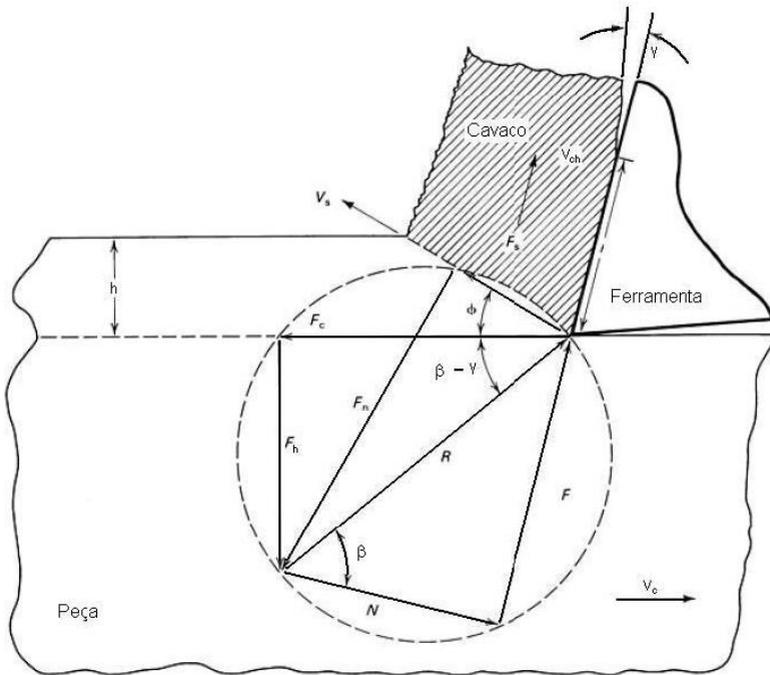


Figura 2.32 – Diagrama de esforços
 Fonte: Merchant (1945).

FERRARESI (1977) afirma que das componentes da força total, a força de corte é a de maior relevância, sendo a maior consumidora de energia para o corte de material, e a força total geralmente é utilizada para a escolha da máquina-ferramenta e seus acessórios (ÖZTÜRK, 2003).

De acordo com KÖNIG e KLOCKE (1997), além de Altintas, outros pesquisadores, como Kienzle, por exemplo, criaram métodos e modelos para simular as forças preditivamente na usinagem. Estes modelos incluem a influência da geometria da ferramenta, das características do material da peça, das condições de corte, das eventuais deformações e das vibrações presentes no processo, com considerações para torná-los simplificados, pois levar em consideração todas as variáveis presentes no processo real é complexo.

Segundo Mangoni (2004), o modelo de Kienzle possui confiabilidade para o cálculo de forças no torneamento. Além disso, Stemmer (2005) atesta a validade do modelo de Kienzle para diversos processos de usinagem com espessura constante do cavaco (como

brochamento, furação com restrições, plainamento), como também em processos com espessura variável (fresamento, serramento), com a utilização do parâmetro espessura de cavaco médio. Nesse modelo, a força específica de corte k_c pode ser definida como sendo a força necessária para remover uma unidade de volume de material (STEMMER, 2005). A partir dessa definição, a força de corte pode ser calculada através da relação entre força e pressão:

$$k_c = \frac{F_c}{A} \quad (2.7)$$

$$A = b \cdot h \quad (2.8)$$

$$b = \frac{a_p}{\text{sen}\kappa} \quad (2.9)$$

$$h = f \cdot \text{sen}\kappa \quad (2.10)$$

Onde:

A – é a área teórica da seção transversal do cavaco a ser removido, medida perpendicularmente à direção de corte (FERRARESI, 1977).

A princípio, essas medidas são derivadas de modelos matemáticos a partir dos parâmetros de corte: avanço, profundidade e ângulo de direção do gume, não propriamente medidos no cavaco.

b – é a largura do corte;

κ – ângulo de inclinação do gume principal;

h – é a profundidade de corte, (no brochamento é o A_{sf});

a_p – largura de penetração do gume;

f – avanço.

A partir dessas considerações, a força de corte no brochamento pode ser definida como:

$$F_c = k_c \cdot b \cdot h \quad (2.11)$$

O modelo de Kienzle é determinado através de um gráfico linearizado, em escala bi-logarítmica, da relação não linear entre $\frac{F_c}{b}$ em função de h , mostrada na Figura 2.33.

$$\frac{F_c}{b} = k_{c1.1} \cdot h^{1-mc} \quad (2.12)$$

Em representação logarítmica:

$$\log\left(\frac{F_c}{b}\right) = \log(k_{c1.1}) + (1 - m_c)\log(h) \quad (2.13)$$

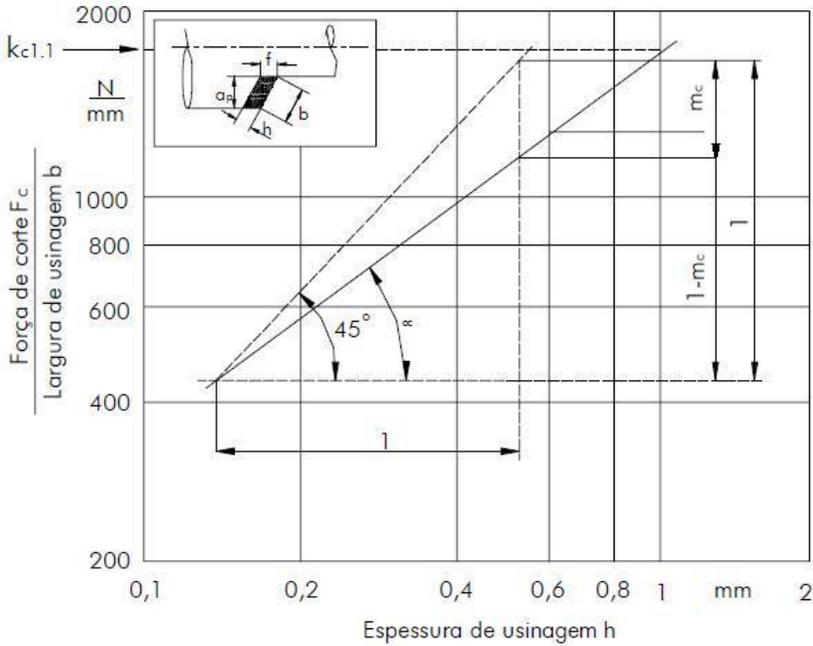


Figura 2.33 – Gráfico para determinação de $k_{c1.1}$ e $1 - m_c$

Fonte: Kienzle apud Mangoni (2002).

Através desse método, encontram-se os coeficientes $k_{c1.1}$ e $1 - m_c$ do modelo, tornando possível o cálculo da força necessária para retirar um cavaco de espessura teórica “h”. Devido à propriedade logarítmica $\log(1) = 0$, quando o valor da espessura for de uma unidade, o valor de F_c/b representará a força específica de corte necessária para um cavaco de seção $b \times b = 1 \text{ mm}^2$.

A extrapolação do gráfico para utilizá-lo em diferentes campos decimais de unidades de espessura leva a erros grosseiros, de modo que Victor *apud* Bastos (2005) propôs a divisão para cada campo decimal, cada qual com seu respectivo gráfico, pressão de corte e coeficiente de Kienzle, conforme apresentado na Figura 2.34.

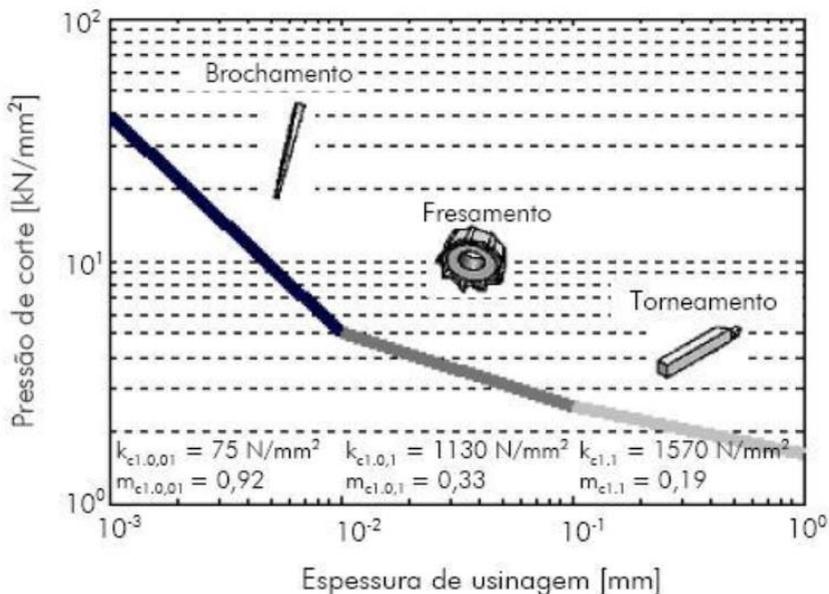


Figura 2.34 – Divisão dos valores de k_c e coeficiente de Kienzle

Fonte: Victor *apud* Bastos (2005).

Um detalhe do brochamento que não está presente em outros processos é o esforço da ferramenta. Ele é composto não pela força atuando em um único dente, e sim em todos os que atuam no corte de material simultaneamente. A Figura 2.35 ilustra bem a adição de força nos momentos em que dentes subsequentes passam a agir, bem como a subtração de forças quando há término de corte por parte de algum dente, variando o esforço total sobre a brocha em determinados instantes do tempo.

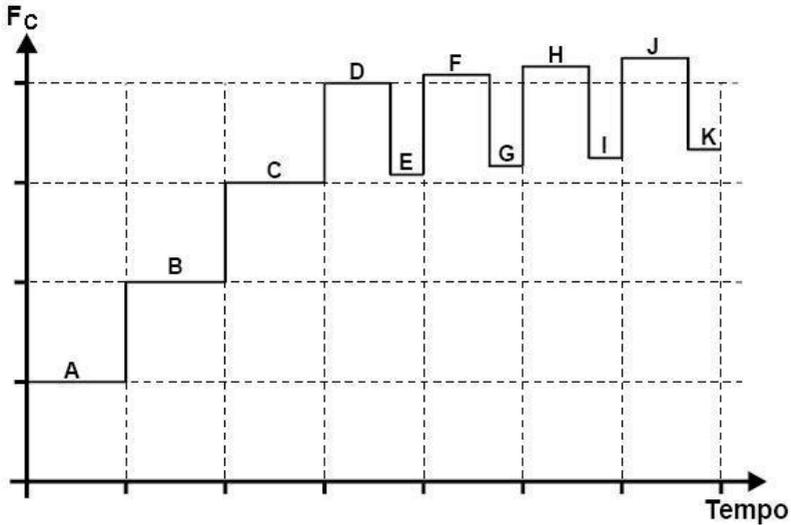


Figura 2.35 - Exemplo de variação de força de brochamento no tempo
 Fonte: Stemmer (2005).

2.7 INFLUÊNCIAS NOS ESFORÇOS DE CORTE

Os fatores principais que afetam o mecanismo de separação de material na usinagem são agrupados por Trent (1991) em duas principais características:

Áreas das zonas de cisalhamento primárias e secundárias localizadas, conforme Figura 2.36;

Resistência ao cisalhamento do material no plano dessas regiões.

Ou seja, a influência sobre o esforço de corte com a variação dos parâmetros envolvidos na usinagem é avaliada baseada nos efeitos causados sobre essas características (SANTOS e SALES, 2007).

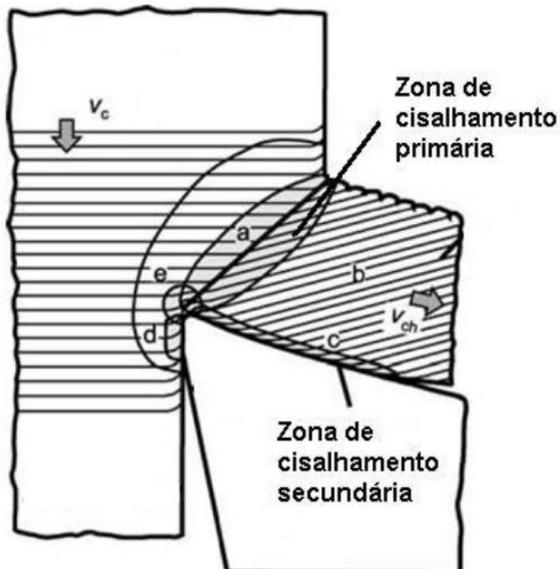


Figura 2.36 – Zonas de cisalhamento
 Fonte: Vieregge apud König e Klocke (1997).

2.7.1 Material da peça

Como via de regra, quanto maiores as características de resistência mecânica apresentadas pelo material da peça, maior será resistência ao cisalhamento, tendo como consequência uma maior força de usinagem, salvo certos casos, como materiais extremamente dúcteis, como ferro e alumínio comercialmente puros, que alteram a área da seção de corte, alterando significativamente a força de usinagem (SANTOS E SALES, 2007).

2.7.2 Material da ferramenta

Existindo contato. A combinação entre ferramenta e peça pode gerar uma afinidade química entre ambas, atuando na área de seção de corte. Durante a usinagem, se a difusão de elementos químicos atuarem na produção de uma zona de aderência forte e estável, a força de usinagem poderá aumentar. Mas se o caso for de produção de películas lubrificantes que reduzem o atrito na interface, a área de contato será menor, com um ângulo de cisalhamento menor, exigindo menos esforço para o corte (SANTOS e SALES, 2007).

2.7.3 Velocidade de corte

Dentro das faixas usuais de velocidade de corte empregadas na indústria, a influência da velocidade na força de usinagem é discreta. Segundo Ferraresi (1977), nas baixas velocidades de corte, sem ocorrência de gume postiço, que ocasiona uma desordem no comportamento da força de corte (Figura 2.37), há uma queda acentuada na força de usinagem com o aumento da velocidade de corte, comportamento atribuído à redução da resistência ao cisalhamento do material da peça, com o aumento da temperatura nas zonas primárias e secundárias de cisalhamento. Em faixas elevadas de velocidade de corte, a força de usinagem tem como tendência a estabilização com uma gradual diminuição, pois mesmo havendo a diminuição da resistência de cisalhamento do material da peça com o aumento da temperatura, em contrapartida há um aumento da zona de cisalhamento secundária, região essa onde ocorre aderência de material (SANTOS e SALES, 2007).

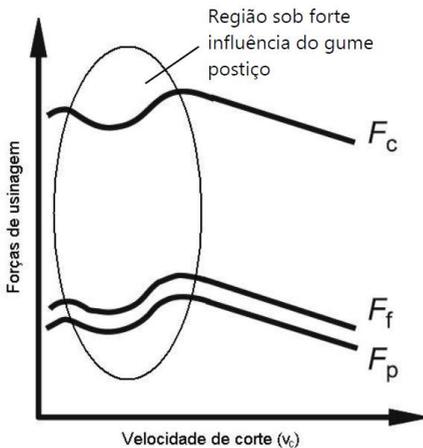


Figura 2.37 – Influência de gume postiço na força de corte

Fonte: König e Klocke (1997).

2.7.4 Geometria do dente da brocha

Excepcionalmente no caso das brochas, a geometria da ferramenta é importância fundamental, pois o custo de fabricação exige que seu desempenho seja satisfatório (GONÇALVES, 2009). Tanto no brochamento quanto nos outros processos de usinagem, o ângulo mais influente nas alterações do esforço de corte é o de saída (γ). Sua redução

tem como efeito a tendência no aumento da área de contato entre a superfície de saída do dente e o cavaco, dificultando o escorregamento deste e aumentando a força necessária para usinagem (SANTOS E SALES, 2007). König e Klocke (1997) quantificaram a variação das forças de corte, de avanço e passiva para alterações nos ângulos de saída e inclinação (Figura 2.38).

Fatores de influência		Mudança nos componentes das forças de usinagem para cada grau de ângulo mudado		
		Força de corte F_c	Força de avanço F_f	Força passiva F_p
Diminuição 	Ângulo de saída	 1,5%	 5,0%	 4,0%
	Ângulo de inclinação	 1,5%	 1,5%	 10,0%
Aumento 	Ângulo de saída	 1,5%	 5,0%	 4,0%
	Ângulo de inclinação	 1,5%	 1,5%	 10,0%

Figura 2.38 – Influência nas componentes da força de usinagem com a variação dos ângulos de saída e inclinação
Fonte: König e Klocke (1997).

Esse comportamento é demonstrado na influência que o ângulo de saída tem sobre o fator de recalque:

$$\Delta_h = \frac{h_{ch}}{h} \quad (2.14)$$

Esse fator relaciona a espessura do cavaco formado (h_{ch}) com a espessura nominal de usinagem (h), que no caso do brochamento é determinada pela altura entre dentes subsequentes (A_{sf}). Quanto maior o ângulo de saída, maior será o ângulo de cisalhamento (Φ), menor serão as zonas de cisalhamento e menor o esforço de corte, facilmente visualizado na Figura 2.39.

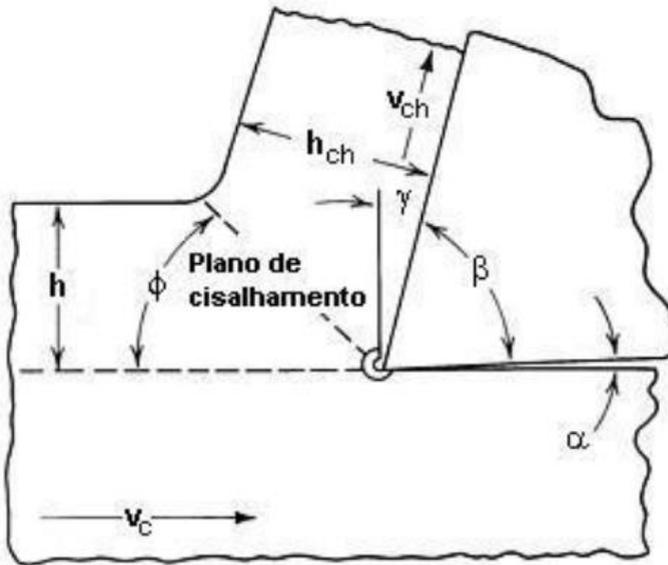


Figura 2.39 – Grandezas para determinação do fator de recalque
Fonte: ASM (2005).

Características de avanço e profundidade de corte, tratados como parâmetros variáveis em outros processos de usinagem, são detalhes provenientes da geometria da ferramenta no brochamento, e seus ajustes somente são possíveis por ocasião da fabricação da brocha. Este é mais um agravante na problemática do projeto da brocha, o qual deve ter controle sobre essas características. As dimensões desses elementos da brocha determinam a área de seção de usinagem, que por consequência altera proporcionalmente e de forma direta, as zonas de cisalhamento e a força de usinagem (SANTOS e SALES, 2007).

No brochamento, onde a espessura de usinagem costuma ser na ordem de centésimos de milímetros, o raio do gume (ρ) passa a dificultar o entendimento do fenômeno de corte. A microgeometria do gume acarreta variações no ângulo de saída efetivo, demonstrado no modelo de Albrecht (1960) e ilustrado na Figura 2.40. Tal modelo visa explicar a influência do raio do gume, que no processo real não é infinitesimal, acarretando em ângulos de saída efetivos para cada incremento da espessura de corte (GONÇALVES, 2009).

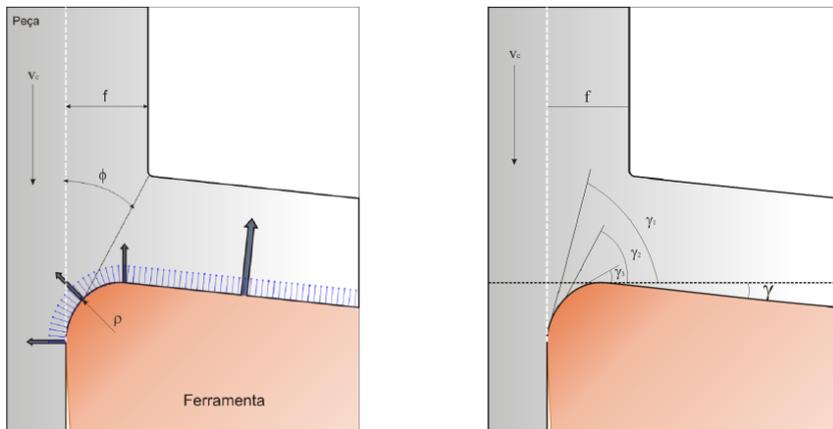


Figura 2.40 – Modelo de usinagem
 Fonte: Albrecht (1960).

Os mecanismos de remoção de material podem ser o conjunto de duas condições simultâneas. A região da peça que se encontra em contato com ângulos de saída negativos sofre deformações plásticas com níveis de tensões acima da tensão de ruptura, mas sem formação de cavaco, escorregando para o flanco da ferramenta, apresentando escoamento lateral de material, que, para casos de espessuras delgadas de corte, influenciará fortemente a pressão de corte (DINIZ 2005). Já a porção de material em contato com a face de saída da ferramenta será removida na forma de cavaco. A região deformada apresentará uma porção deformada somente elasticamente, havendo sua recuperação após a passagem do gume (PORTO, 2004). Essas situações estão ilustradas na Figura 2.41.

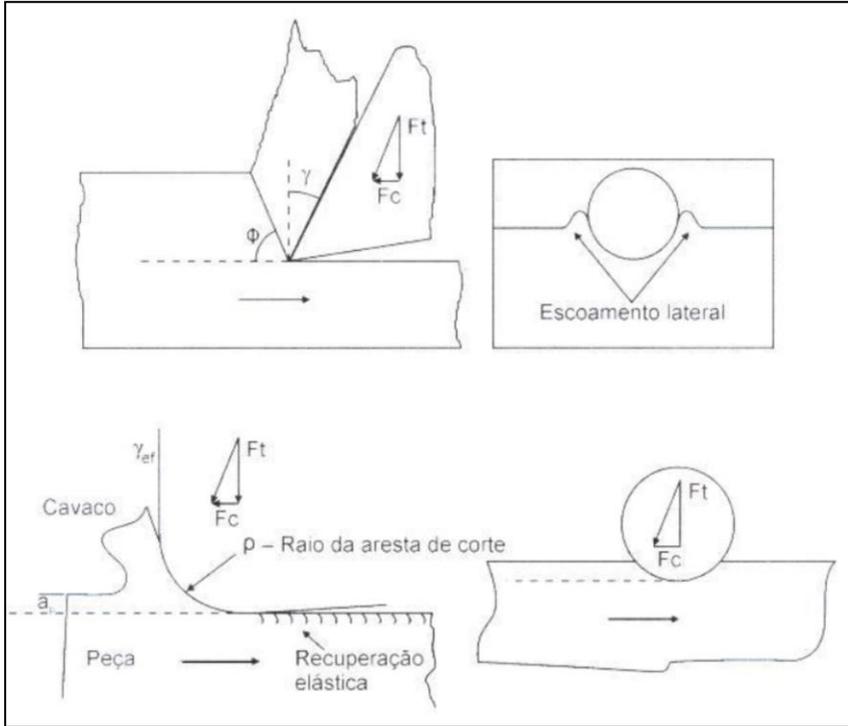


Figura 2.41 – Mecanismos de remoção de material

Fonte: Porto (2004).

Para evitar tais fenômenos, é interessante ter conhecimento da espessura mínima de usinagem. Porém tal espessura não corresponde a uma grandeza absoluta, mas sim é dependente do raio do gume, velocidade e temperatura de corte, material da peça, que contribuem para formar o ângulo efetivo de corte (PORTO, 2004). Schroeter (1997) afirma que, quanto menor o raio do gume e melhor sua afiação, menor poderá ser a espessura de usinagem, valendo a seguinte equação:

$$h_{cu.min} = \rho \cdot (1 - \text{sen}\gamma_{ef}) \quad (2.15)$$

Onde:

$h_{cu.min}$ – espessura mínima de usinagem;

ρ – raio de arredondamento do gume;

γ_{ef} – ângulo de saída efetivo.

König e Klocke (1997) afirmam que a espessura mínima de usinagem é de duas ou três vezes o tamanho do raio do gume ou largura do chanfro.

2.7.5 Influência do desgaste da ferramenta

Já é de conhecimento que as condições de afiação e desgaste do gume da ferramenta alteram o desempenho do processo de usinagem, o que inclui acabamento da superfície, tensões residuais, precisão dimensional e a força de usinagem (KOUNTANYA e WILLIAN, 2001). O desgaste do gume altera sua geometria e como consequência, altera a força de usinagem. Esse efeito é explicado principalmente pela maior área de contato entre ferramenta e cavaco ou peça.

De maneira geral, o comportamento da força é de aumentar com o aumento do desgaste. No entanto, na predominância de desgaste de cratera, a força de corte pode diminuir pelo aumento do ângulo de saída efetivo (SANTOS E SALES, 2007). No brochamento, o desgaste do gume e seu arredondamento, bem como o desgaste de flanco, têm grande efeito sobre a força de tração na brocha, o primeiro devido aos problemas explicados no item anterior, e o segundo, devido ao aumento de atrito entre o flanco da ferramenta e peça. De acordo com König apud Bastos (2005), desgaste de flanco em torno de 0,5 mm, pode resultar em aumento na força passiva em 100%, aumento na força de avanço em 90%, e aumento na força de corte em 20%.

2.8 TRIBOLOGIA NA USINAGEM

As interações entre os pares ferramenta-peça e ferramenta-cavaco representam fenômenos de difícil entendimento, porém de importância tecnológica apurada, e podem representar parcelas significativas na energia consumida durante a usinagem. Como mostrado por Astakhov (2006), somente 40% a 70% da energia total consumida durante usinagem é gasta com o corte de material propriamente dito. Isso leva à condição de que 30% a 60% da energia total consumida pelo processo é gasta na transição da energia útil para a zona de usinagem, e maior parte dessa energia é gasta nas interfaces ferramenta-peça e ferramenta-cavaco, devido às condições não otimizadas dos processos tribológicos presentes.

As interações nas superfícies tribológicas são altamente complexas e seu entendimento necessita conhecimentos interdisciplinares, contemplando física, química, matemática aplicada, mecânica dos sólidos e

dos fluidos, termodinâmica, transferência de calor, ciência dos materiais, reologia e lubrificação, entre outros (BUNSHAH, 2001).

2.8.1 Interface ferramenta-cavaco

A determinação do coeficiente de atrito pelo modelo proposto por Amontons e Coulomb não é válida para os processos de usinagem (SANTOS e SALLES, 2007). As pressões exercidas nas superfícies durante o corte são muito grandes, fazendo com que a área de contato seja muito maior do que aquelas comuns na determinação de coeficiente de atrito. Santos e Sales (2007) citam Bowder e Tabor, Archand e outros, que afirmam que a superfície real de contato nunca é total, ocorrendo somente nos picos superiores das superfícies. Em mecanismos e elementos de máquinas, a área de contato é extremamente pequena, na ordem de um centésimo da área aparente. Um aumento na força normal provoca deformações nos picos, dobrando a área de contato, e, conseqüentemente, aumentando a força necessária para cisalhar essa parte de material (BOISSE *et al*, 2003).

Conforme se aumenta a força normal, a área de contato real (A_r) eleva-se, o que resulta num aumento proporcional da força de atrito. No entanto, esse comportamento vale até certo ponto, onde a área real de contato se aproxima da área aparente (A), tornando o atrito independente da força normal, mas sim dependente da área de contato real (SANTOS e SALLES, 2007), comportamento este mostrado na Figura 2.42.

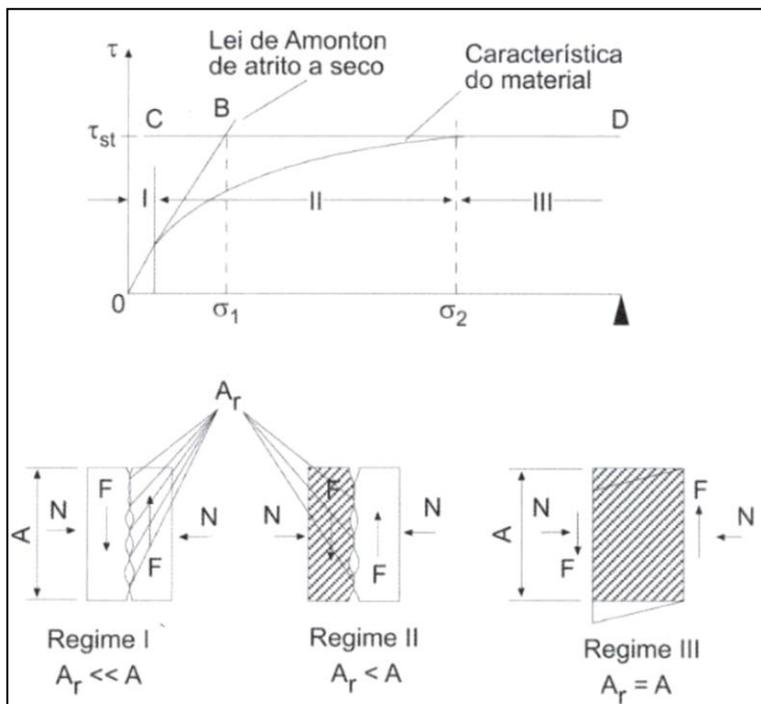


Figura 2.42 – Regimes de atrito sólido
 Fonte: Shaw *apud* Santos e Salles (2007).

Na interface ferramenta-cavaco, durante a usinagem, a superfície livre de óxidos, com afinidade química, e com pressão que não permite espaços vazios na interface (mesmo em nível molecular), promove ligação entre os átomos da ferramenta e do cavaco. Nessas condições, não é possível afirmar que exista escorregamento entre os dois materiais, que estão unidos. Há um cisalhamento de uma região menos resistente, adjacente à região de adesão, de forma paralela à superfície da ferramenta, no sentido de saída do cavaco, onde o perfil de velocidade aumenta com a distância em relação a superfície da ferramenta, chegando à estabilidade da velocidade de formação do cavaco (ASTAKHOV, 2006). Na adjacência dessa zona de aderência (pontos BC da Figura 2.43), existe uma região de contato intermitente dos picos de rugosidade entre ferramenta e cavaco (pontos EHDKFC). Nessa região, não ocorre deformação como na zona de cisalhamento secundária, e as condições de atrito obedecem às leis tradicionais de Amontons e Coulomb (SANTOS e SALES, 2007).

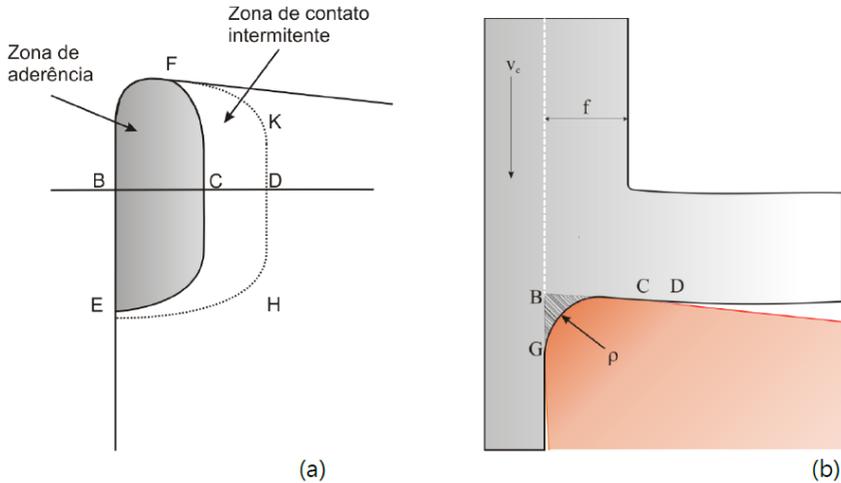


Figura 2.43 – Zonas de aderência e escorregamento
Fonte: Trent (2000).

2.8.2 Interface ferramenta-peça

Os fenômenos físicos do contato entre o flanco da ferramenta e da peça são de interesse, pois permitem o esclarecimento das condições que resultam no desgaste de flanco, características da superfície usinada e tensões sobre essa região da ferramenta. Entretanto, há poucos estudos conhecidos e livros modernos de usinagem não costumam considerar essa questão. O desgaste de flanco é analisado com a equação de Taylor (ASTAKHOV, 2006):

$$T = V_c^K C_v \quad (2.16)$$

Onde:

T – vida da ferramenta;

k – inclinação da curva da vida da ferramenta (Figura 2.44);

V_c – velocidade de corte;

C_v – vida da ferramenta para uma velocidade de corte $v_c = 1\text{m/min}$.

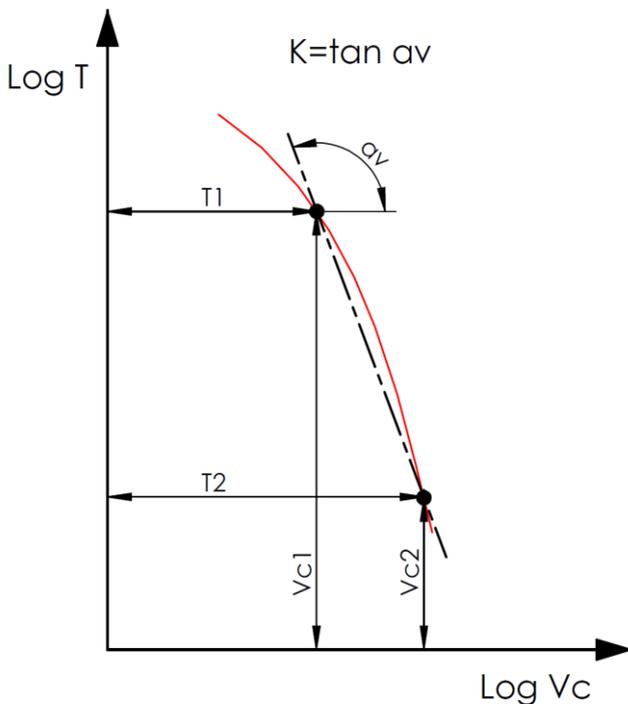


Figura 2.44 – Vida da ferramenta
 Fonte: Adaptado de König e Klocke (1997).

Zorev (1966) buscou equações matemáticas para explicar analiticamente as forças às quais o flanco da ferramenta está submetido, chegando a conclusões surpreendentes. Ele observou que se o desgaste de flanco é pequeno, a profundidade de corte é ótima e a dureza do material da peça é moderada, então as forças presentes no flanco da ferramenta têm pouca influência na total, podendo ser desconsideradas. Em uma situação contrária, com desgaste de flanco acentuado, profundidade de corte pequena, particularmente na usinagem de materiais duros, as forças no flanco são comparáveis às forças na superfície de saída da ferramenta. Assim, ele estimou que a pressão normal no flanco do gume principal pode ser calculada com a seguinte equação 2.17 (ASTAKOHV, 2006):

$$N_f = \sigma_{c-f} \frac{d_w}{\text{sen}\kappa_r} \approx \frac{HB}{3} \frac{d_w}{\text{sen}\kappa_r} h_f \quad [\text{kg/mm}^2] \quad (2.17)$$

Já a pressão normal sobre o flanco do gume secundário é calculada por (equação 2.18):

$$N_f = \frac{HB}{3} f h_{fl} [\text{kg/mm}^2] \quad (2.18)$$

E a força de atrito sobre o flanco é (equação 2.19):

$$F_f = \mu_{ff} \sigma_{c-f} \left(\frac{d_w}{\text{sen}\kappa_r} + f \right) \approx 0,2HB \left(\frac{d_w}{\text{sen}\kappa_r} + f \right) [\text{kg/mm}^2] \quad (2.19)$$

Onde:

HB – é a dureza Brinell do material;

h_f e h_{fl} – são as larguras do gume principal e secundário, respectivamente;

σ_{c-f} – é a tensão normal de contato na interface ferramenta-peça;

μ_{ff} – é o coeficiente de atrito aparente na interface ferramenta-peça;

Entretanto, essas análises iniciais de tensões de contato feitas por Zorev (1966) não abrangem o regime de corte e o tipo de material da ferramenta (ASTAKHOV, 2006). Após tomar conhecimento destas discrepâncias, Zorev realizou ensaios com mais de 20 diferentes materiais, de dureza entre 80 HB (ferro recozido puro) até 65 HRC (aço endurecido por têmpera). A Figura 2.45 mostra os resultados obtidos para velocidade correspondente a uma vida da ferramenta de 90 minutos. Para Zorev, a redução da tensão normal de contato com o decréscimo da velocidade é atribuído ao cisalhamento na zona secundária sobre a superfície de saída da ferramenta, fato que protege o flanco da ferramenta. A mesma explicação pode ser adotada para a influência da profundidade de corte d_w . Para manter a vida da ferramenta constante, a velocidade decresce com incrementos da profundidade de corte.

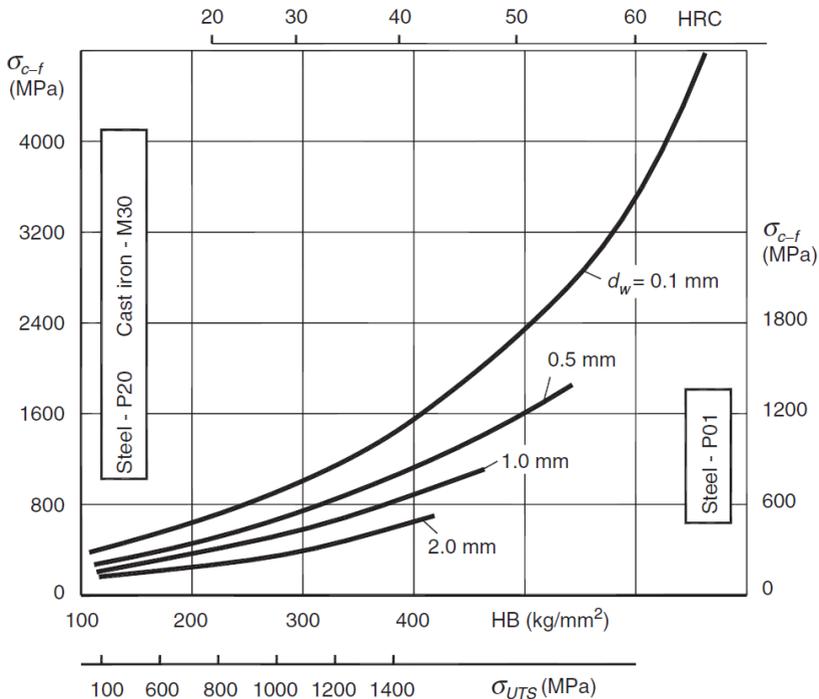


Figura 2.45 – Tensão normal de contato na interface ferramenta-peça
Fonte: Zorev (1960).

A influência do material é verificável na Figura 2.45. Para uma mesmo tempo de vida de ferramenta, a tensão normal de contato, e conseqüentemente a força sobre o flanco da ferramenta, foi aproximadamente 25 % menor para o material P01, que é menos resistente ao desgaste.

De acordo com a hipótese largamente aceita, o contato entre o flanco da ferramenta e a peça usinada ocorre devido à recuperação elástica ocorrida após a deformação plástica da superfície da peça (indicada por δ_1 na Fig 2.46a). A Figura 2.46a mostra o caso ideal onde o gume da ferramenta apresenta um raio infinitesimal, tal consideração adotada em vários modelos.

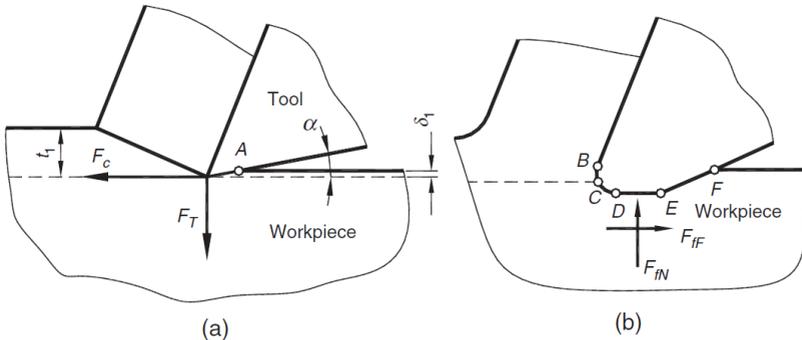


Figura 2.46 – Contato idealizado (a) e real (b) do flanco da ferramenta com a peça
 Fonte: Astakhov (2006).

A força radial ou passiva F_T causa deformação plástica sobre a superfície durante a passagem do gume sobre tal, e então há alívio da deformação, representada por δ_1 , que provoca contato sobre o flanco até o ponto A (Figura 2.46a). Essa recuperação elástica é, portanto, dependente da força radial de corte (ASTAKHOV, 2006). Porém, este é o caso idealizado da ferramenta perfeitamente afiada. Para o caso real, no entanto, a ferramenta apresenta um arredondamento do gume, o qual une a superfície de saída com o flanco, tornando incerta a referência C (Figura 2.46b), que determina o ponto onde há a separação do cavaco da peça. O desgaste representado pela área DE está presente em qualquer ferramenta no caso real, sendo formado nos primeiros segundos de corte. A região EF representa a superfície de contato entre flanco da ferramenta e peça. Se o raio da ferramenta é pequeno, a força normal (F_{fN}) e de atrito (F_{fF}) atuando no flanco, são resultados da interação entre o desgaste DE e a superfície usinada da peça (ASTAKHOV, 2006).

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Para alcançar os objetivos deste trabalho, foram realizados ensaios de brochamento adaptados, visto que o Laboratório de Mecânica de Precisão (LMP) não dispõe de máquinas brochadeiras. Para contornar essa necessidade, várias soluções foram levadas em consideração. A princípio, a primeira proposta seria a construção de uma bancada especializada para o brochamento, com movimentos de translação, acionamento eletromecânico ou hidráulico, sistema de aquisição de forças e fixação da ferramenta e corpo de prova. No entanto, ensaios de brochamento requerem comportamento adequado da bancada para que os resultados sejam satisfatórios. É necessária precisão de velocidade e posicionamento, rigidez para suportar eventuais flexões nos componentes e potência necessária para a usinagem. As fases do projeto, incluindo compra de componentes, montagem, aferições metrológicas e outros procedimentos para garantir ensaios adequados de brochamento poderiam demandar custo elevado e tempo.

A solução adotada para realizar os ensaios de brochamento consistiu, assim, em uma adaptação de torno CNC, utilizando sua característica de coordenadas comandadas numericamente para a realização dos movimentos de corte e manutenção da velocidade desejada. A ferramenta reproduziu as características geométricas equivalentes a um dente de brocha. As componentes da força de usinagem foram medidas utilizando plataforma piezométrica montada sobre o carro porta-ferramenta.

3.1 SISTEMAS DE MEDIÇÃO DE FORÇAS

Para analisar os fenômenos reais não contemplados por modelos matemáticos, como o de Gonçalves (2009), os dados de alimentação deste modelo foram comparados com valores experimentais realizados. Esses dados se referem às constantes de Kienzle ($1-m_c$ e $k_{c1.0,01}$) para o brochamento. O princípio de medição tem como fundamento o fenômeno piezométrico e subseqüente tratamento de dados, conforme esquema demonstrado na Figura 3.1.

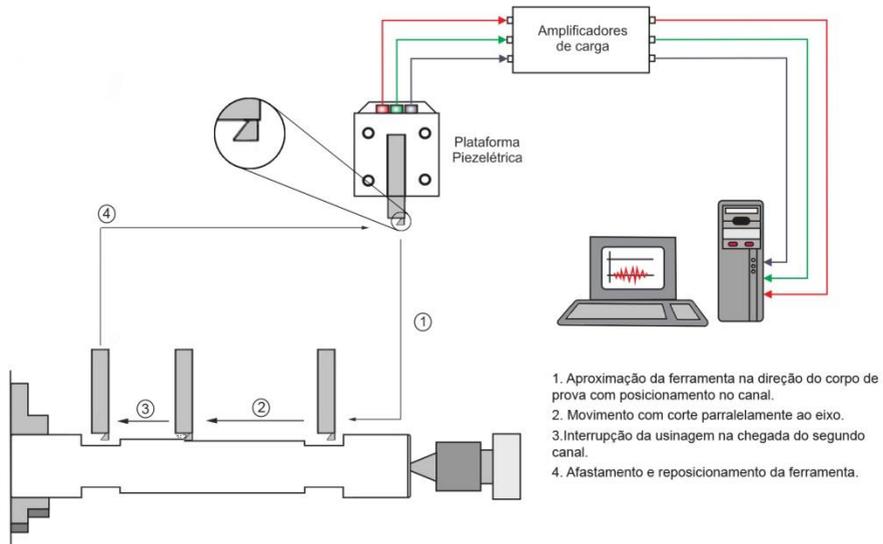


Figura 3.1 – Esquema do sistema de medição de forças para brochamento adaptado

O ciclo 1-2-3-4-1 se refere ao percurso realizado pela ferramenta, reproduzindo o movimento relativo entre peça e ferramenta empregada no brochamento.

O posicionamento da plataforma sobre o carro porta-ferramentas do torno resultou que o sistema de coordenadas da máquina-ferramenta fosse o mesmo da Figura 3.2, sendo que a força de corte F_c foi lida no eixo X, e a força passiva F_f no eixo Y.

O corte de material foi realizado ao longo do eixo X, paralelo à linha de centro do corpo de prova, simulando o brochamento externo com um único dente

3.1.1 Plataforma piezolétrica

Para o processo de usinagem, a escolha de uma plataforma piezolétrica é baseada nos benefícios proporcionados pelas propriedades presentes nesses sistemas: elevada sensibilidade com forças variáveis, precisão, rigidez (frequências naturais altas) e pouca variação no comportamento por influências ambientais (temperatura e umidade) nas condições normais de trabalho (HIOKI, 1998), com exceção dos terminais que necessitam limpeza e secagem. A plataforma utilizada foi da fabricante KISTLER, modelo 9257A, com as características operacionais listadas na Tabela 3.1. Características visuais da plataforma são mostradas na Figura 3.2.

Tabela 3.1 – Características da plataforma piezelétrica 9257A

	Eix		Eixo
	o X	o Y	Z
Faixa de Medição [N]	0 a 5000	0 a 5000	0 a 10000
Sensibilidade [PC/N]	7,82	7,85	3,72
Linearidade [$\leq \pm$ %FSO]	0,3	0,3	0,3
Faixa de temperatura [°]	0 a 70	0 a 70	0 a 70

Fonte: Kistler Instrument

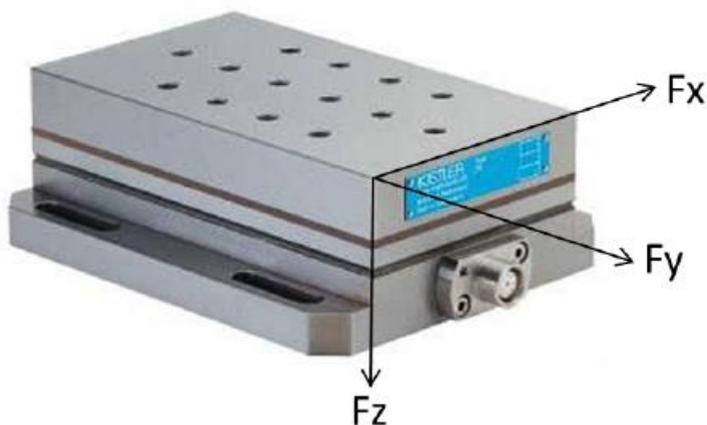


Figura 3.2 – Eixos cartesianos na plataforma piezelétrica

Fonte: Kistler (2012).

3.1.2 Calibração da plataforma piezelétrica

A utilização da plataforma piezelétrica para medições de força com confiabilidade requer uma calibração prévia, adotando-se procedimentos experimentais que estabeleçam a relação entre os valores indicados por um instrumento de medição e os valores correspondentes das grandezas estabelecidas por padrões (GONÇALVES, 2009), e determinando-se as correções, se necessário.

Dessa forma, foi levantada a curva de erros para calibração da plataforma (Apêndice A), utilizando uma base e aplicando massas padrão nas direções das componentes cartesianas da plataforma utilizadas nos ensaios de brochamento. Foi constatada uma média de erros de 0,94% no eixo X e 0,30% no eixo Y para a faixa de forças utilizadas nos ensaios, onde foi constatada a linearidade, mostrada no Apêndice A.

3.1.3 Amplificador de sinais

O fenômeno piezelétrico da plataforma resulta em carga elétrica nos terminais proporcional ao carregamento mecânico aplicado. Essa carga elétrica tem proporções na ordem de picoCOULOMB [pC], sensíveis a ruídos presentes no sistema, e necessita ser amplificada para aquisição e tratamento no computador. Esses tratamentos de filtragem e ampliação foram realizados utilizando amplificadores KISTLER 5011 para cada eixo solicitado.

3.1.4 Digitalização e tratamento dos sinais

A leitura das forças ocorridas nos ensaios de brochamento através da variação de tensão nos terminais dos amplificadores é transformada digitalmente para o computador com o uso de placa de aquisição da NATIONAL INSTRUMENTS PCI 6013. A leitura e gravação dos dados obtidos experimentalmente foram manipuladas pelo software de laboratório virtual LABVIEW, onde a Figura 3.3 ilustra os campos necessários para aquisição e análise dos sinais adquiridos.

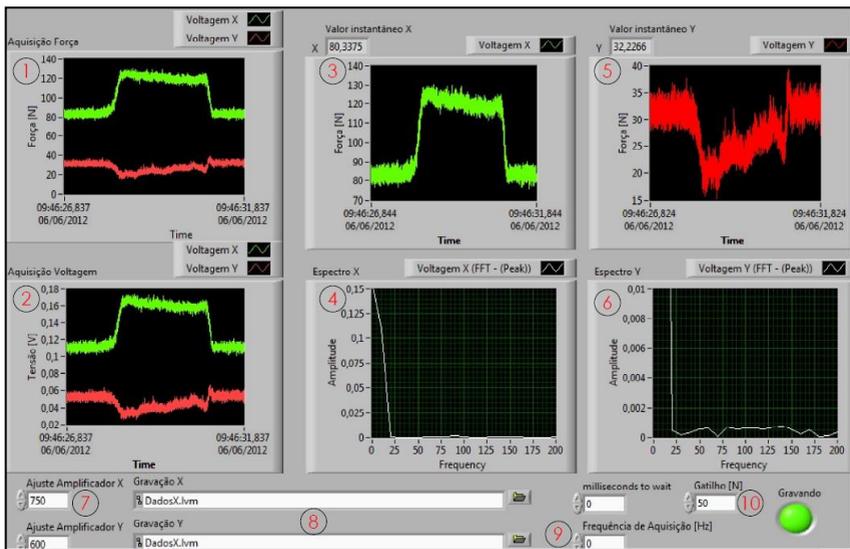


Figura 3.3 – Tela de aquisição de sinais no LABVIEW

- Campo 1 – Gráfico em tempo real de dados convertidos em unidade de força [Newton] da leitura de sinais amplificados originados pela plataforma piezelétrica e adquiridos pela placa de aquisição.
- Campo 2 – Gráfico em tempo real de dados analógicos [Volts] da leitura de sinais amplificados originados pela plataforma piezelétrica e adquiridos pela placa de aquisição.
- Campo 3 – Gráfico dos dados de força no eixo X (força de corte) gravados no computador em arquivo de texto.
- Campo 4 – Gráfico de espectro de frequência do canal X da placa de aquisição (força de corte).
- Campo 5 – Gráfico dos dados de força no eixo Y (força passiva) gravados no computador em arquivo de texto.
- Campo 6 – Gráfico de espectro de frequência do canal Y da placa de aquisição (força passiva).
- Campo 7 – Ajuste do amplificador. Valor equivalente a 1/10 do valor máximo de força aplicada em cada eixo da plataforma, a fim de utilizar toda a faixa mensurável da placa de aquisição, aumentando a resolução do sistema.
- Campo 8 – Diretório do arquivo de texto dos dados adquiridos para cada eixo.
- Campo 9 – Frequência de aquisição
- Campo 10 – Gatilho para início e fim de gravação de dados.

3.2 MÁQUINA-FERRAMENTA

Os ensaios foram realizados sobre uma bancada montada no torno CNC COSMOS 20U, da fabricante ROMI, que possui resolução de 10 μm . Tal escolha contornou os problemas referentes ao controle de velocidade e posicionamento necessários para a realização confiável dos ensaios, com o aproveitamento da rigidez dos barramentos do torno, e programação por comando numérico do avanço da mesa, bem como do posicionamento micrométrico do gume em relação ao corpo de prova.

3.3 CORPOS DE PROVA E FERRAMENTAS

A utilização de um torno CNC implicou em corpos de provas com regiões cilíndricas, para encaixe na placa do torno, e regiões planas, por onde o gume produziu cavaco com um bom controle da seção de corte. A Figura 3.4 ilustra o corpo de prova utilizado, com detalhe da superfície

plana, que foi usinada utilizando uma ferramenta também similar ao dente de uma brocha, porém com uma largura de usinagem maior. Com isso, obteve uma superfície perpendicular ao corpo das ferramentas utilizadas nos ensaios.

Além disso, para que pudesse ser feito o corte longitudinal dos ensaios, foi necessário que sua geometria permitisse a entrada e saída da ferramenta, que foi contemplada com dois rebaixos nos corpos de prova.

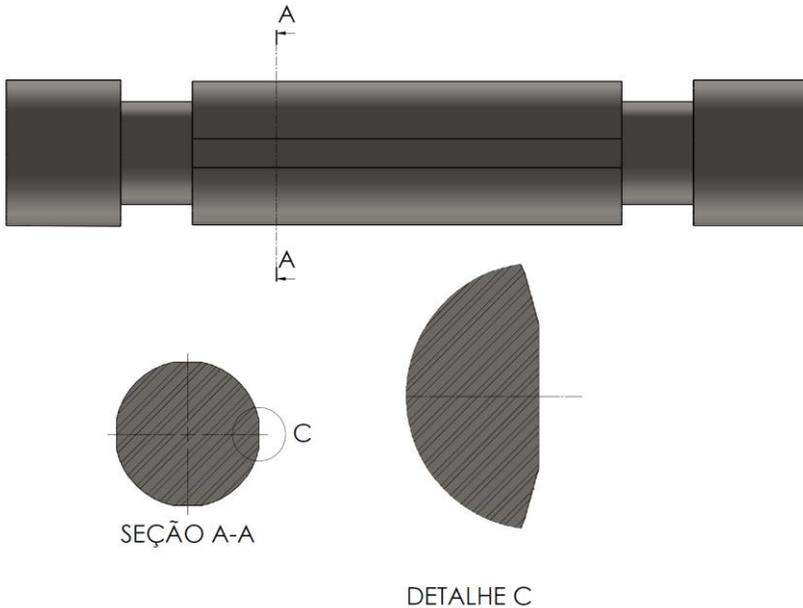


Figura 3.4 – Corpo de prova

O material do corpo de prova utilizado foi o ABNT 1045, disponível no LMP e o mesmo utilizado em ensaios de torneamento empregados para o modelo matemático de Gonçalves (2009).

As ferramentas utilizadas nos ensaios foram confeccionadas em aço-rápido AISI M2, de larga utilização na fabricação de brochas comerciais e custo baixo para confecção da geometria da ferramenta similar à um dente de uma brocha. Na Figura 3.5 a seguir, é ilustrada uma ferramenta confeccionada de um bits de 12,7 mm de largura e 12,7 mm de altura utilizada nos ensaios. O estudo sobre as componentes da força de usinagem analisou a influência da variação da geometria da ferramenta, em destaque na Figura 3.5, que mostra as características geométricas das ferramentas empregadas.

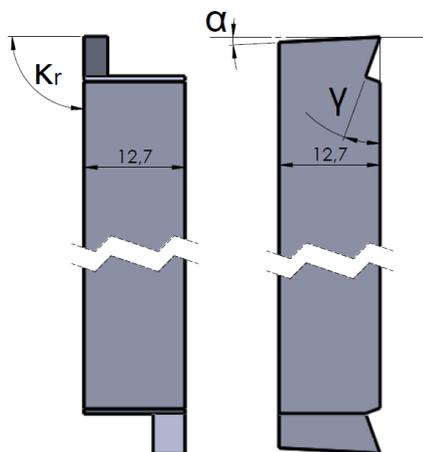


Figura 3.5 – Ferramenta de corte

3.4 MONTAGEM DO CONJUNTO

A aquisição de sinais de força exigiu a montagem de uma bancada rígida, com alinhamento e perpendicularidade entre seus componentes, com o intuito de não afetar as características geométricas efetivas do gume. Tais posicionamentos alcançados com auxílio de relógio comparador fixado sobre a estrutura da máquina para. A estrutura final é representada nas Figuras 3.6 e 3.7. Sobre a mesa XY do torno foi montada a plataforma piezelétrica que suporta a ferramenta. O corpo de prova montado entre a placa e contra-ponto, com a restrição de giro feita pela trava mecânica.

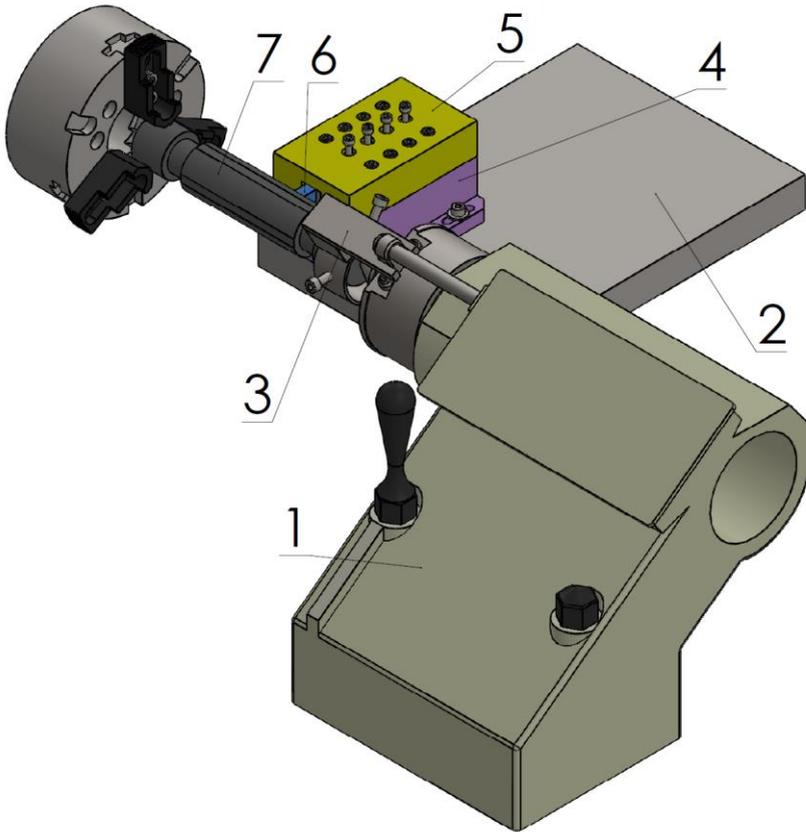


Figura 3.6 – Representação esquemática da bancada de ensaios

- 1 Componentes da bancada:
- 2 Contra-ponto: alinha o corpo de prova com o eixo da placa do torno;
- 3 Mesa de coordenadas ou carro porta-ferramentas: responsável pelo posicionamento e velocidade de corte, comandada numericamente;
- 4 Trava: impede mecanicamente o giro do corpo de prova, evitando possíveis movimentos angulares indesejáveis durante os ensaios;
- 5 Plataforma piezelétrica: transforma a força proveniente do corte em carga elétrica;
- 6 Fixação e alinhamento da ferramenta;

- 7 Ferramenta: possui o gume e a geometria de corte;
 8 Corpo de prova: material que será usinado.

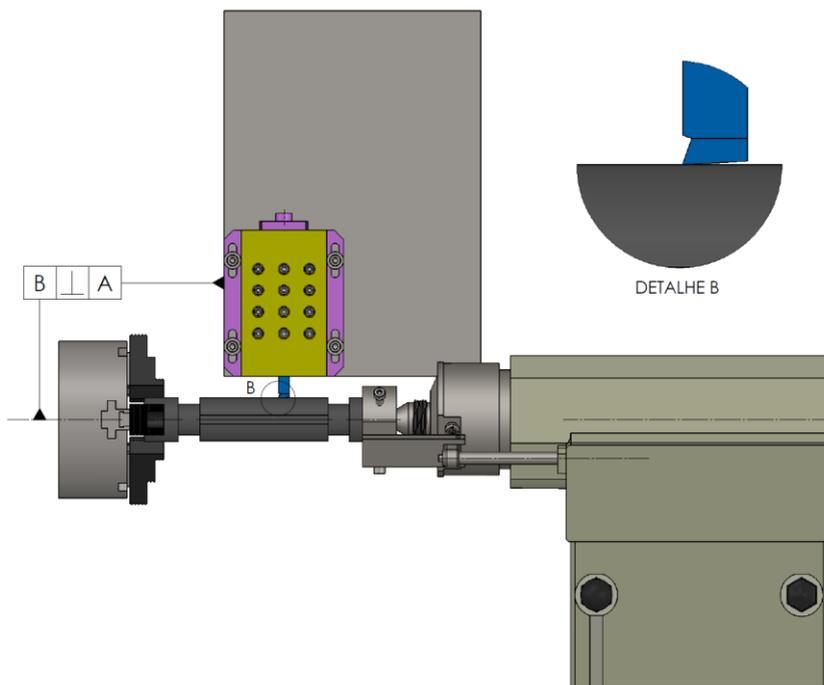


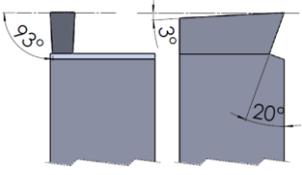
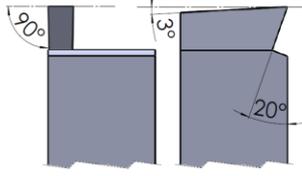
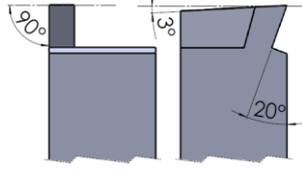
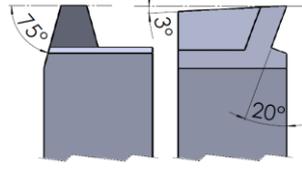
Figura 3.7 – Vista superior da bancada, com detalhe para posicionamento e contato do gume com corpo de prova

3.5 METODOLOGIA DOS ENSAIOS

A análise da força na usinagem foi realizada através da avaliação do comportamento de força de corte e de avanço, modificando características geométricas da ferramenta de corte, e mantendo inalterados alguns parâmetros da usinagem compatíveis com a realidade industrial para o processo de brochamento. Os parâmetros constantes durante os ensaios foram velocidade de corte $v_c = 5$ m/mm, ângulo de saída $\gamma = 20^\circ$, ângulo de incidência $\alpha = 3^\circ$. A frequência de aquisição de sinais de força foi de 1000 Hz.

Os parâmetros alterados durante os ensaios para a quantificação da influência de cada um nos esforços de corte são listados na Tabela 3.2.

Tabela 3.2 – Características das ferramentas

Ferramenta	Ângulo de posição do gume secundário (K_r)	Avanço por dente (A_{sf})	Representação em CAD
1	93° Sem atrito no gume e flanco secundário	0,03 0,04 0,05 0,06	
2	90° Atrito no gume secundário	0,05	
3	90° Atritos no gume e no flanco secundário	0,05	
4	75° Atritos no gume e flanco secundário Alteração do perfil do cavaco	0,05	

A ferramenta “1” teve como objetivo a realização de ensaios com diferentes espessuras de usinagem para obter a curva de Kienzle, e conseqüentemente, suas constantes $1-m_c$ e $k_{c1.1}$. Sua geometria foi fabricada com gume afim de que a força específica de corte fosse determinada de acordo com a espessura de corte na faixa de centésimos de milímetros,

correspondente à primeira região do gráfico proposto por Victor (BASTOS, 2005), em conjunto com velocidade de corte baixa em comparação à outros processos de corte e estudos anteriores, isolando-a da influência dos outros parâmetros estudados nesse trabalho, como atrito do gume, utilizando ângulo de posição do gume secundário maior que 90° , e atrito no flanco secundário, utilizando ângulo de inclinação maior que 0° .

A ferramenta “2” foi projetada para permitir a análise da contribuição do atrito do gume secundário sobre força de corte e passiva. Para tanto, a ferramenta possui ângulos de incidências do gume principal e do gume secundário de 3° e ângulo de inclinação do gume secundário de 90°

Já a ferramenta “3” teve como função avaliar a parcela do atrito no flanco secundário na força de corte e avanço, dotada de uma região nesse flanco com ângulo de incidência nulo. Essa área, que promove atrito entre flanco secundário e peça, é representada na Figura 3.9.

Completando as opções de ferramentas utilizadas, com a ferramenta “4” visou-se a análise da influência do perfil do gume secundário na força de corte e de avanço, aproximando-se fielmente a um perfil comumente utilizado em brochas comerciais. Além de possuir flanco secundário com ângulo de incidência nulo, possui um ângulo de inclinação menor que 90° reproduzindo perfil de um dente de uma brocha (Figura 3.8).

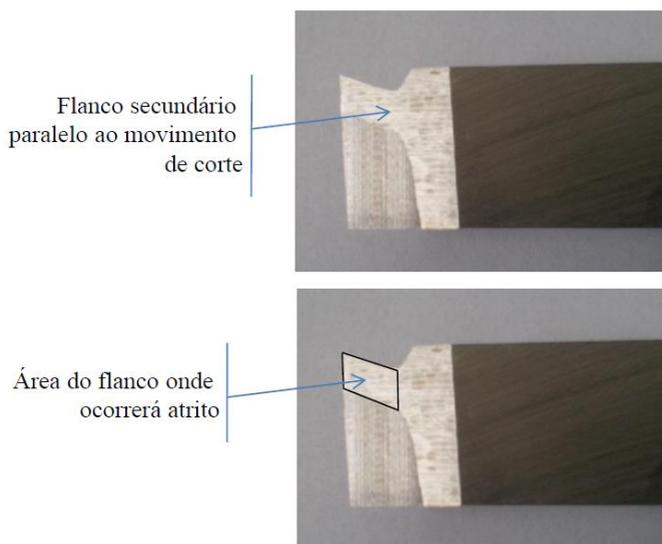


Figura 3.8 – Região do flanco secundário onde ocorre atrito com a peça. Válido para ferramentas 3 e 4

Para as ferramentas “2”, “3” e “4”, os ensaios foram conduzidos de tal forma que fosse possível a separação da parcela da força necessária para corte de material propriamente dita, e forças de atrito geradas pelo gume e flanco secundários. Para solucionar tal questão, a ferramenta foi conduzida por duas vezes em cada profundidade de sulco, como explicado na Figura 3.9.

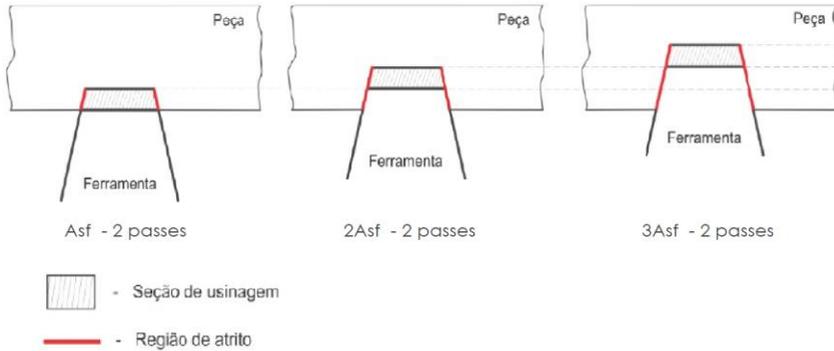


Figura 3.9 – Regiões de corte e atrito durante ensaios

Os ensaios para determinação das constantes de Kienzle foram repetidos 4 vezes para cada espessura de corte (vide Tabela 3.2), todos com corte de material. A análise do atrito foi realizada com passadas duplas por cada valor de penetração, com incrementos de 0,05mm, partindo de 0,05 até profundidade de 1,50mm.

4 ANÁLISES DOS RESULTADOS

Para melhor organização e tratamento dos dados obtidos, os mesmos foram armazenados em arquivos de EXCEL. Todo o aparato experimental apresentou um bom comportamento dinâmico, com ruídos eliminados utilizando-se filtros dos amplificadores.

4.1 COEFICIENTES DE KIENZLE

O levantamento das constantes de Kienzle foi realizado a partir dos dados representados na Tabela 4.1.

Tabela 4.1 – Resultados dos ensaios para cálculo de k_c e $1-m_c$

Dados experimentais				
$v_c = 5\text{m/min}$	A	B	D	E
A_{sf}	0,03	0,04	0,05	0,06
a_p	3,00	3,00	3,00	3,00
K_r	93,00	93,00	93,00	93,00
b	3,004	3,004	3,004	3,004
h	0,030	0,040	0,050	0,060
$F_c \text{ exp.}$	288,7	378,7	471,5	552,9
$k_c \text{ dado}$	3208,0	3156,0	3143,1	3071,4
$F_c/b \text{ dado}$	96,1	126,1	156,9	184,0
Equação da reta $y = x \cdot 2950,4081 + 8,2005$			Pontos A e D 96,6 e 185,0	
$k_{c1,0,01} = 2588,7 \text{ N/mm}^2$			$1-m_c = 0,94$	

Os dados de F_c experimentais resultam de vários ensaios. Para cada espessura de corte “h”, foram promovidos quatro cortes de material, sendo utilizado o valor médio de cada passe, e após a média desses valores. O gráfico da Figura 4.1 faz a comparação dos dados coletados para a espessura de usinagem $h = 0,03 \text{ mm}$. O gráfico foi construído com o eixo das abscissas representando a linha do tempo, o qual utilizando uma

freqüência de 1000 Hz, resultou entre 700 a 800 dados de força adquiridos da plataforma piezelétrica.

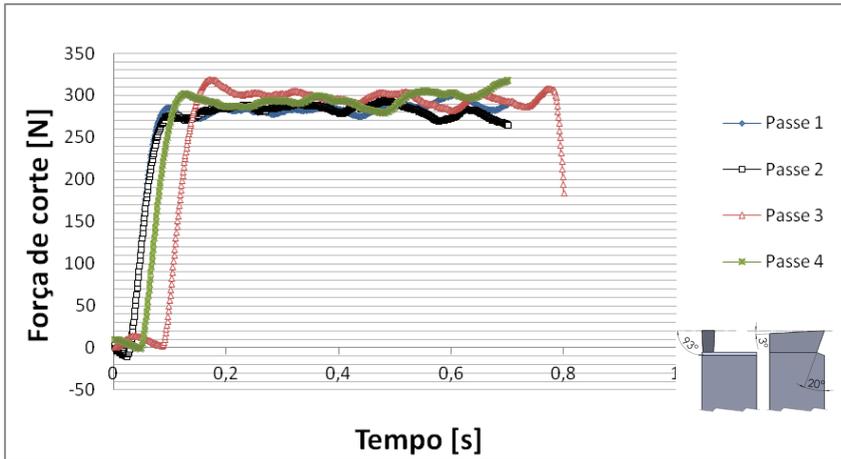


Figura 4.1 – Dados de força de corte para $h = 0,03\text{mm}$

Visando evitar a ação negativa no desvio padrão dos dados por parte do início e fim de corte, eles foram calculados somente na região onde houve a estabilidade da força (entre 0,2 e 0,7s), obtendo-se valores de:

- $\sigma = 6,5\text{ N}$ (0,03 mm);
- $\sigma = 7,4\text{ N}$ (0,04 mm);
- $\sigma = 14,1\text{ N}$ (0,05 mm);
- $\sigma = 19,2\text{ N}$ (0,06 mm).

Foram coletados também dados da força passiva durante o corte de material, como mostra a Figura 4.2.

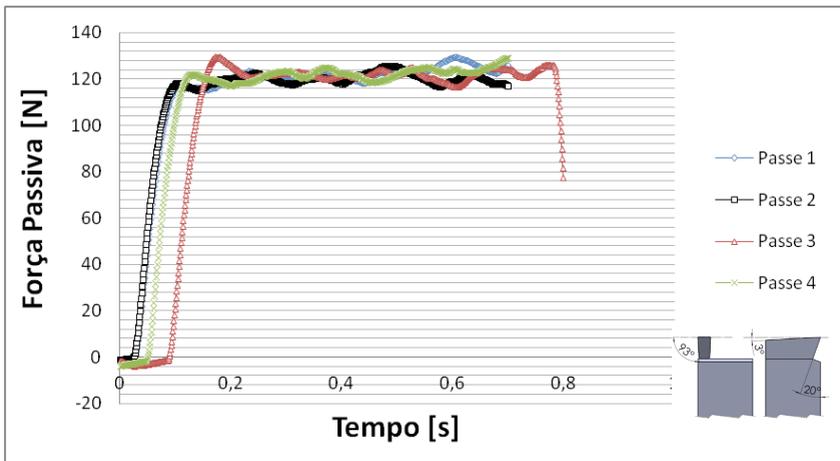


Figura 4.2 – Dados de força passiva

Os desvios padrões obtidos foram (0,2 a 0,6s):

- $\sigma = 4,5 \text{ N}$ ($h = 0,03 \text{ mm}$);
- $\sigma = 3,0 \text{ N}$ ($h = 0,04 \text{ mm}$);
- $\sigma = 6,5 \text{ N}$ ($h = 0,05 \text{ mm}$);
- $\sigma = 8,1 \text{ N}$ ($h = 0,06 \text{ mm}$).

Com os dados da força de corte disponíveis na Tabela 4.1 foi possível obter a curva $F_c/b \times h$ (Figura 4.3), requisito para determinação das constantes de Kienzle.

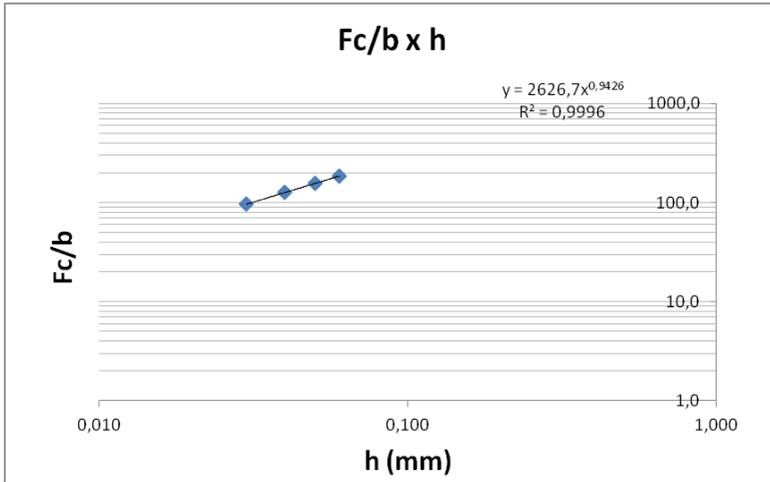


Figura 4.3 – Gráfico para determinação das constantes de Kienzle

O gráfico da Figura 4.4 mostra o comportamento da força de corte F_c ao longo do tempo de ensaio nas diferentes espessuras de usinagem utilizadas, com incrementos de 0,01 mm.

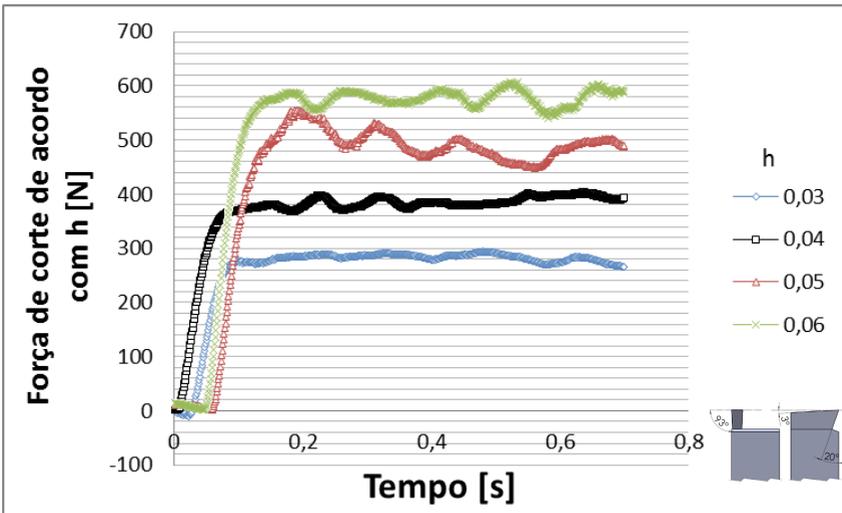


Figura 4.4 – Variação da força de corte em função de h .

Encontrou-se um incremento de força média de aproximadamente 90 N a cada incremento de 0,01 mm na espessura de corte. O coeficiente de Kienzle para aço ABNT 1045 encontrado pôde ser comparado com outro valor já proposto por Gonçalves (2009). Em seus ensaios, a metodologia utilizada foi a de 4 espessuras de corte, as mesmas utilizadas nesse trabalho, bem como a largura do gume “b”. No entanto, a velocidade de corte utilizada teve um mínimo limitado a 35m/min, devido à instabilidade da rotação do torno para velocidades baixas. O valor de aproximadamente 2600 N/mm² encontrado nesse trabalho é em torno de 50% maior que o valor encontrado por Gonçalves (2009). Tal discrepância pode ser explicada por vários parâmetros de usinagem, mas o principal pode ser a velocidade de corte aplicada. Tabellenbuch Metall *apud* Bastos (2005) propõe fatores de correção para a força específica de corte de acordo com a velocidade de corte adotada (Tabela 4.2)

Tabela 4.2 – Fatores de correção para k_c de acordo com v_c

v_c	C
10...30	1,3
31...80	1,1
81...400	1
> 400	0,9

Fonte: Tabellenbuch Metall *apud* Bastos (2005).

Esses fatores são corroborados por Reichard (2000), que afirma que para velocidades entre 60 e 250 m/min, não há variação significativa na força de corte, e para velocidades inferiores, há um aumento da força de corte.

A Figura 4.5 mostra um exemplo de cavaco obtido durante os ensaios. A maior parte dos cavacos obtidos nos ensaios foi neste formato. O cavaco é contínuo, ou seja, não se quebrou durante a execução do ensaio e isso se refletiu nos dados obtidos não havendo picos de força nos gráficos dos sinais. Estes resultados validam a utilização do torno CNC como bancada de ensaios, pois devido a rigidez e constância na velocidade de corte garante um sinal sem picos e, assim, facilita a análise do sinal.

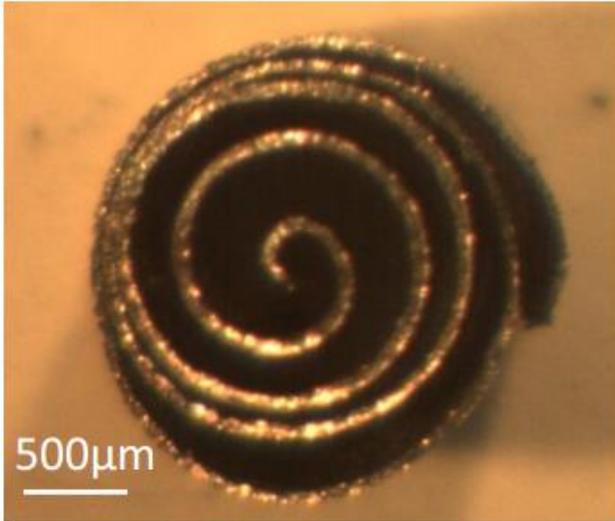


Figura 4.5 – Cavaco contínuo gerado no brochamento

4.2 INFLUÊNCIA DO ATRITO NO GUME SECUNDÁRIO

Utilizando a ferramenta “2”, foi possível analisar a parcela de atrito do gume secundário, conforme gráfico exibido na Figura 4.5.

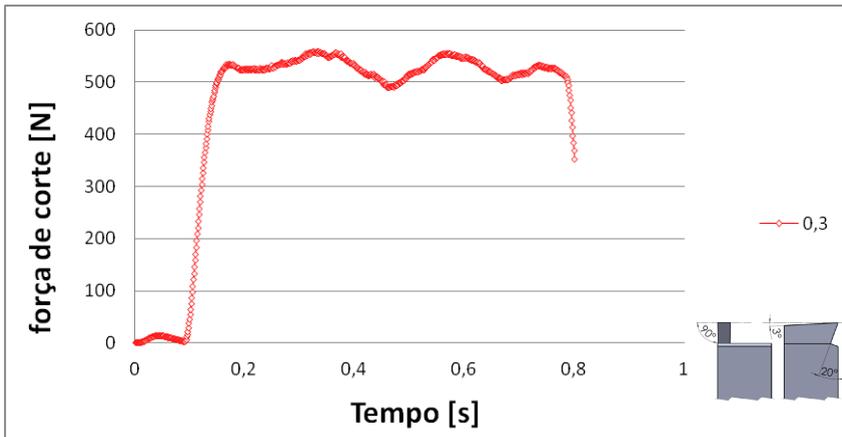


Figura 4.5 – Força de corte para profundidade de 0,3 mm, ferramenta 2

O gráfico da Figura 4.5 representa a aquisição durante o corte na profundidade 0,3 mm, com espessura de corte de 0,05 mm. O desvio padrão dos dados foi na ordem de 18 N, calculado entre os dados de 200 e 600, a fim de desconsiderar a entrada e saída da ferramenta pelo corpo de prova e um valor médio em torno de 508 N. O gráfico mostrado na Figura 4.6 evidencia a tendência da força de corte ao se penetrar em direção ao eixo do corpo de prova, que representa a média dos valores de força adquiridos (de 700 a 800 pontos) em cada profundidade de sulco onde foi realizado os ensaios (0,05 a 1,50 com incrementos de 0,05).

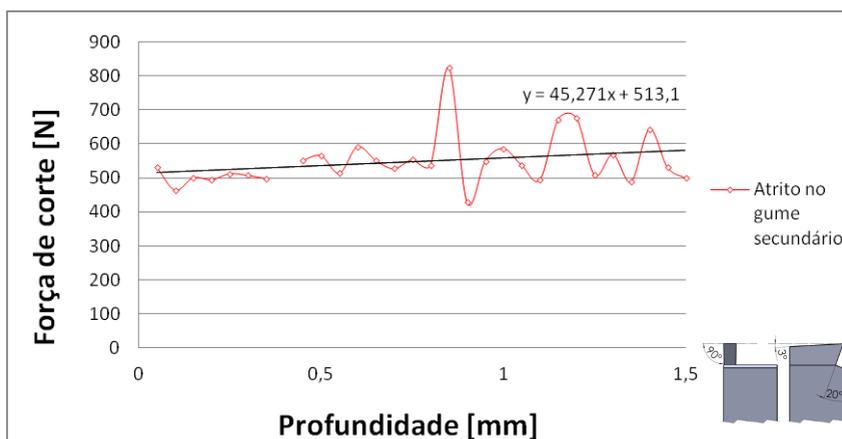


Figura 4.6 – Tendência da força de corte x profundidade de sulco, ferramenta com atrito no gume secundário

Como proposto, foi analisada a força para o passe da ferramenta sem corte de material, que resultou no gráfico da Figura 4.7.

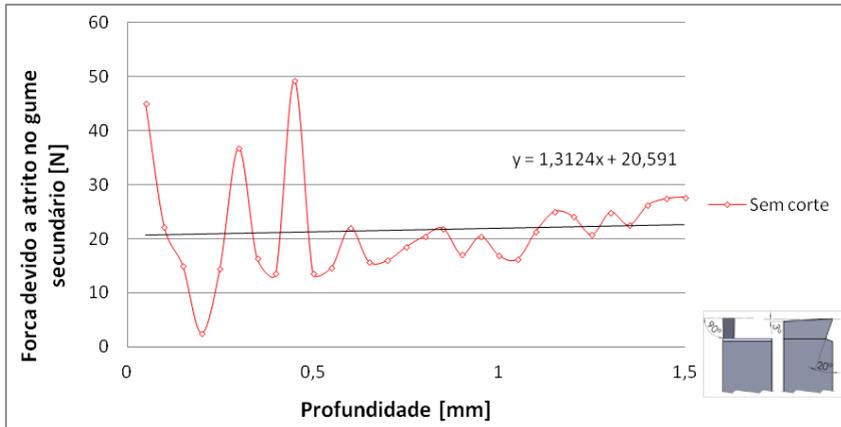


Figura 4.7 – Força de atrito no gume secundário na força de corte sem corte de material

Como se pode observar, não houve um aumento significativo na força de corte com o aumento da profundidade, demonstrando um efeito pouco intenso por parte do atrito no gume secundário, e sim somente uma contribuição de $y = 1,312x + 20,59$ N dentro da força total média de 547 N para espessura de corte de 0,05 mm, resultando em uma parcela de aproximadamente 21 N e um acréscimo de 1,3 N para cada aumento 1 mm na espessura de corte. Comportamento semelhante foi encontrado para força passiva nas mesmas condições. Conforme ilustrado na Figura 4.8 a força passiva com profundidade de 0,3 mm, com desvio de 6 N, calculado com os dados de 200 a 600 apresentou um valor médio de 190 N.

Na Figura 4.9, nota-se a tendência da força passiva com o aumento da profundidade de sulco, resultando numa parcela de 25 N para cada milímetro de profundidade. A Figura 4.10 apresenta a contribuição do atrito na força passiva, que foi de 26 N no total médio de 198 N, com uma tendência decrescente com o aumento da profundidade de sulco ($y = -17,78x + 26,21$), mostrando que o aumento da força passiva não teve como causa o atrito.

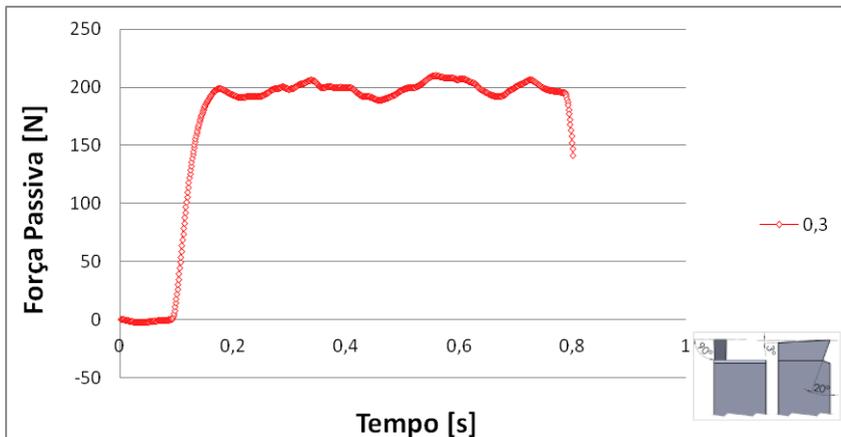


Figura 4.8 – Força passiva para profundidade de 0,3 mm, ferramenta 2

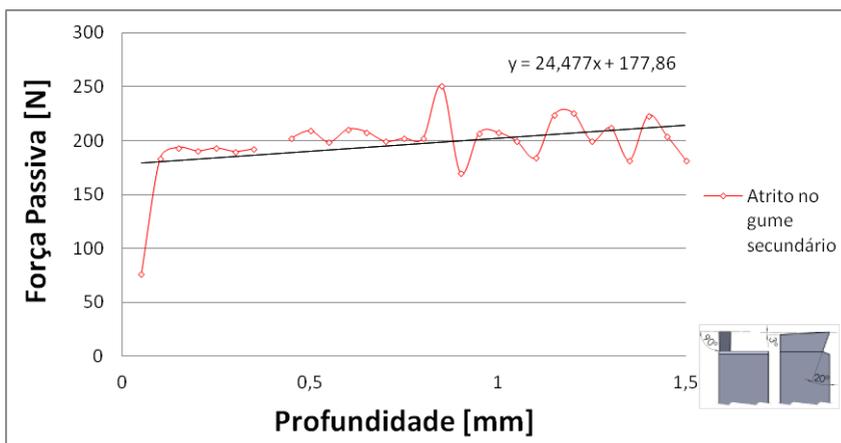


Figura 4,9 – Tendência da força passiva x profundidade de sulco, ferramenta com atrito no gume secundário

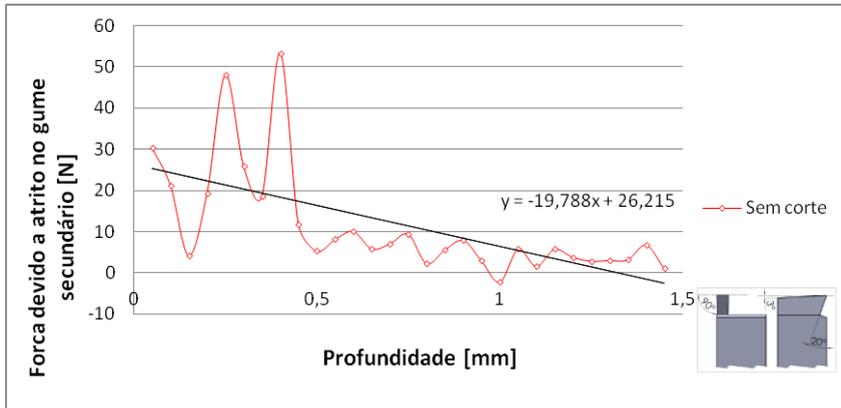


Figura 4.10 – Parcela de força de atrito no gume secundário na força passiva sem corte de material

4.3 INFLUÊNCIA DO ATRITO NO FLANCO SECUNDÁRIO

Se por um lado o atrito no gume secundário não apresentou uma influência significativa na força total de corte e de avanço, o atrito no flanco secundário se mostrou mais evidente e menos coadjuvante nos esforços de corte. A Figura 4.11 representa um ensaio para a profundidade de sulco de 0,3 mm, com ferramenta de ângulo de inclinação 90°. Esse ensaio apresentou um desvio padrão de 10 N, calculado com dados 200 a 600 e um valor médio de 494N.

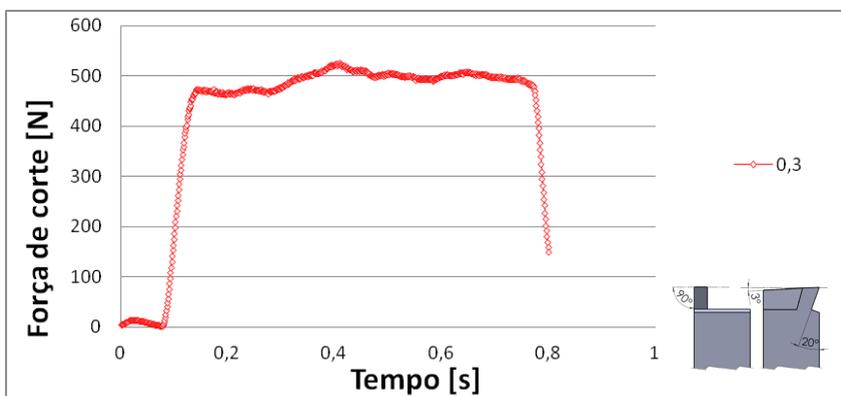


Figura 4.11 – Força de corte para profundidade de 0,3 mm, ferramenta 3

As Figuras 4.12 e 4.13 mostram uma maior influência do atrito no flanco secundário sobre a força de corte, ou seja, um aumento na força lida sem que haja um aumento na seção de corte. Isso se explica pelo fato de existir um aumento da área do flanco em contato com as paredes do sulco formado pelos passes sucessivos.

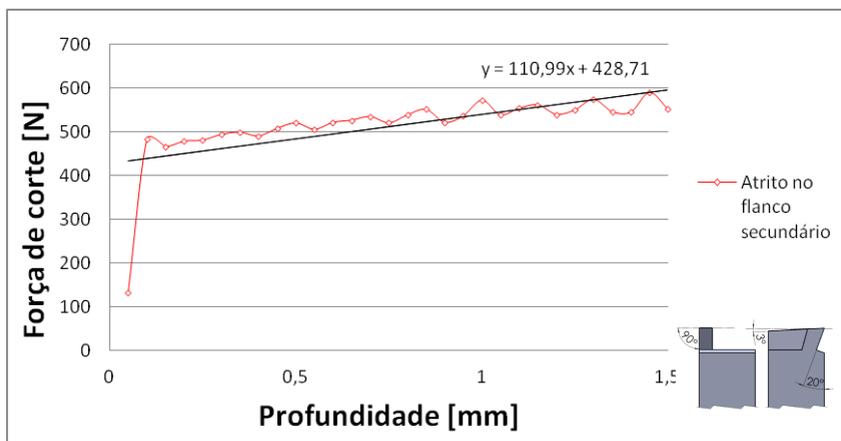


Figura 4.12 – Força de corte x profundidade de sulco, ferramenta com atrito no flanco secundário

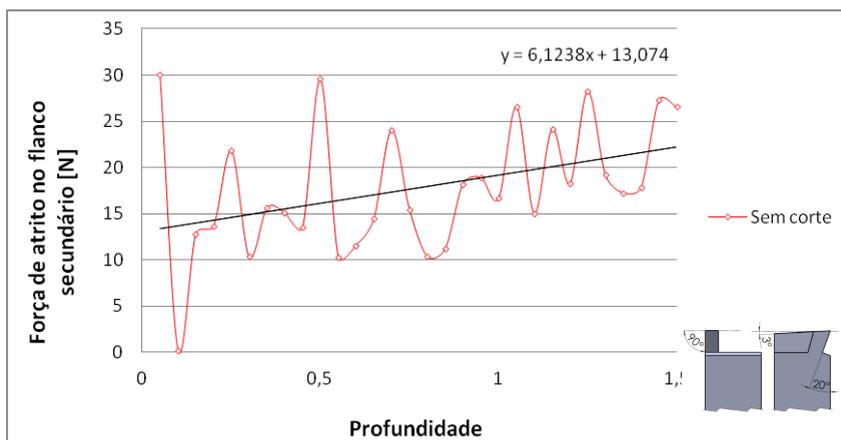


Figura 4.13 – Parcela de força de atrito no flanco secundário na força de corte sem corte de material

Apesar da leitura da força de atrito isolada apresentar dispersão de difícil interpretação (Fig 4.13), o reflexo do aumento do atrito, ou

simplesmente aumento na força lida sem que haja aumento na seção de corte mostrou um comportamento com tendência crescente (Fig 4.12). Esses dados indicam um aumento na força de corte devido ao atrito no flanco secundário na proporção $y = 110,99x + 428,71$ N, representando cerca de 110 N para cada incremento de milímetro na profundidade de penetração do corte, ou aumento da área de contato de atrito. Na força passiva, o comportamento foi análogo, porém não na mesma proporção. A Figura 4.14 os resultados medidos num ensaio para espessura de 0,3 mm, resultando numa força média de 199,1 N, com desvio padrão de 4 N, medidos entre os dados 200 e 600. A Figura 4.15 mostra a tendência crescente da força passiva com o aumento da profundidade de sulco, seguindo a relação $y = 38,856x + 177,06$ N, ou 39 N a cada milímetro de profundidade de sulco.

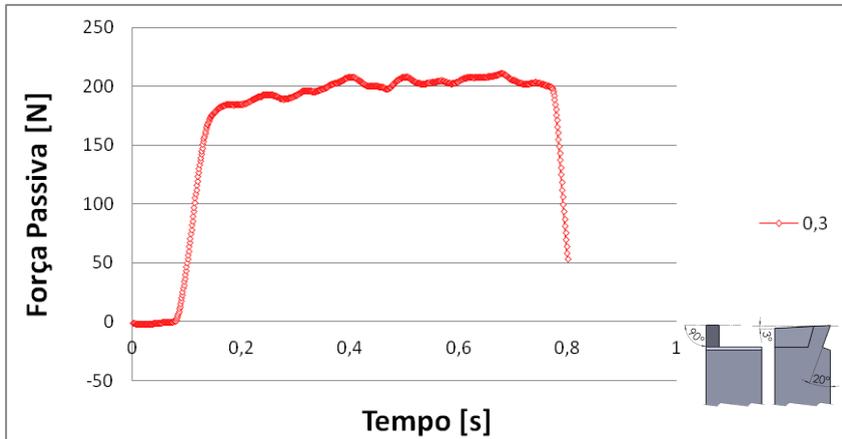


Figura 4.14 – Força passiva para profundidade de 0,3 mm, ferramenta 3

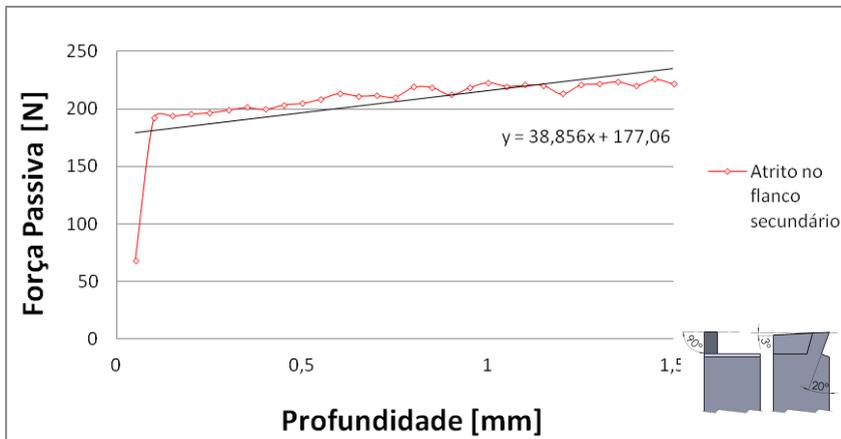


Figura 4.15 – Tendência da força passiva x profundidade de sulco, ferramenta com atrito no flanco secundário

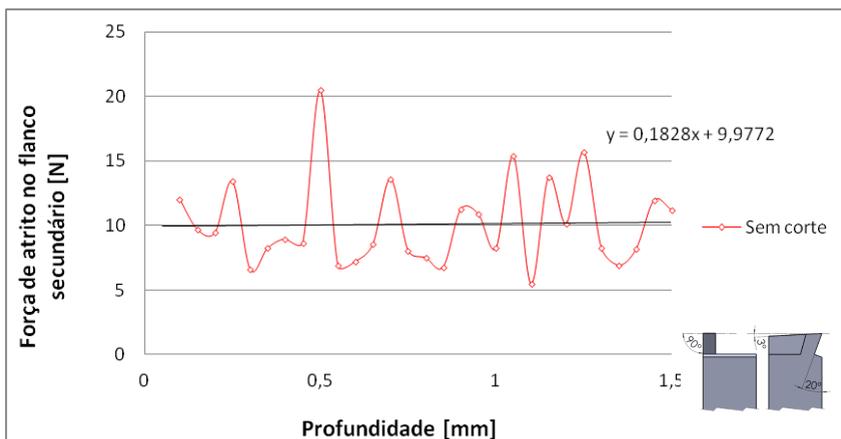


Figura 4.16 – Parcela de força de atrito no flanco secundário na força passiva sem corte de material

Uma questão que levantou dúvidas foi a do desgaste das ferramentas durante o ensaio e a provável influência sobre a força de corte, ou seja, levantou-se a hipótese de que o aumento da força de corte encontrado com o aumento da profundidade de penetração fosse devido à progressão do desgaste e não devido ao atrito nos flancos secundários. Para tanto, os ensaios foram duplicados, ou seja, ao término da primeira bateria de ensaios, eles foram repetidos na mesma sequência em que foram realizados os primeiros ensaios, e o que se observou foi que,

comparativamente, como se pode observar no gráfico da Figura 4.17 não houve variação na força de corte, o que leva a crer que não houve desgaste na ferramenta durante os ensaios, ou se houve algum desgaste, este não foi suficientemente grande a ponto de influenciar no valor da força de corte.

A Figura 4.17 compara os ensaios repetidos para a profundidade de sulco de 0,3 mm, mostrando que após os primeiros ensaios, com profundidades de 0,05 a 1,5 mm de profundidade de sulco, não houve variação na força de corte lida.

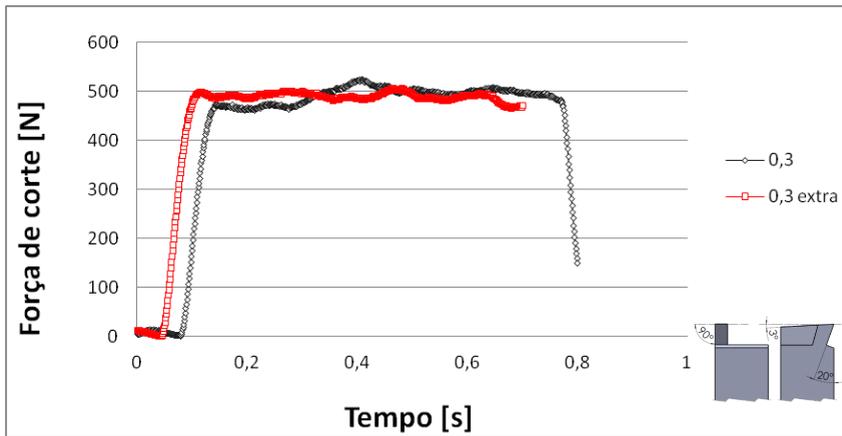


Figura 4.17 – Comparação da força de corte para análise de desgaste

4.4 INFLUÊNCIA DO ATRITO E DO PERFIL DO DENTE

A última ferramenta dos ensaios teve como objetivo avaliar a influência do atrito no gume secundário em adição com a influência do ângulo de inclinação do gume secundário, o que forma o perfil do dente de uma brocha. A Figura 4.18 mostra os valores obtidos no ensaio com profundidade de sulco em 0,3 mm, em comparação aos valores obtidos com as outras ferramentas, todas com espessura de corte de 0,05 mm. Para essa ferramenta, o valor médio da força de corte foi de 570 N, contra 507 N da ferramenta 2, e 495 N da ferramenta 3, com um desvio padrão de 10 N, calculado com dados do ponto 200 ao 600. O que já mostra uma força de corte maior.

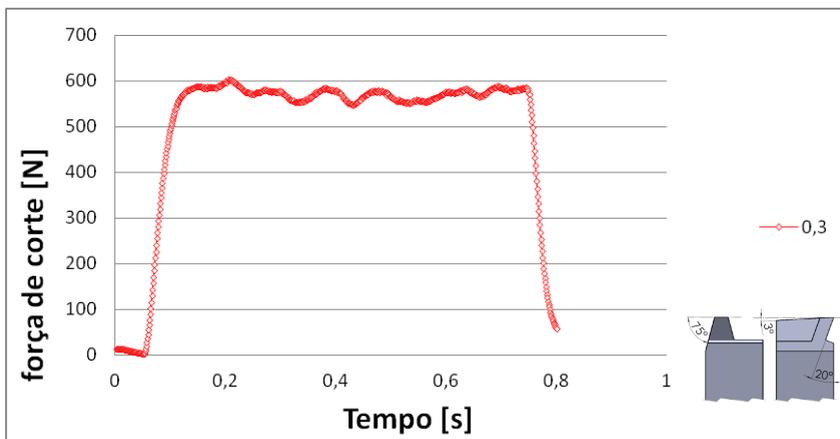


Figura 4.18 – Força de corte para profundidade de 0,3 mm, ferramenta 4

Com um ângulo de inclinação positivo, a influência do atrito no flanco secundário foi agravada, alterando a formação do cavaco. Se antes a seção do cavaco era retangular, para a nova configuração da ferramenta ele se tornou trapezoidal, como mostra a Figura 4.19.

Com essa seção de corte trapezoidal, a área da seção aumentou de 0,15 mm² para 0,15067mm², ou 0,045%. Além desse aumento de área de seção, o fato de se ter uma parede do sulco não mais perpendicular ao corpo do dente produz um corte adicional de material nesse parede além da seção de corte, como está ilustrado na Figura 4.17.

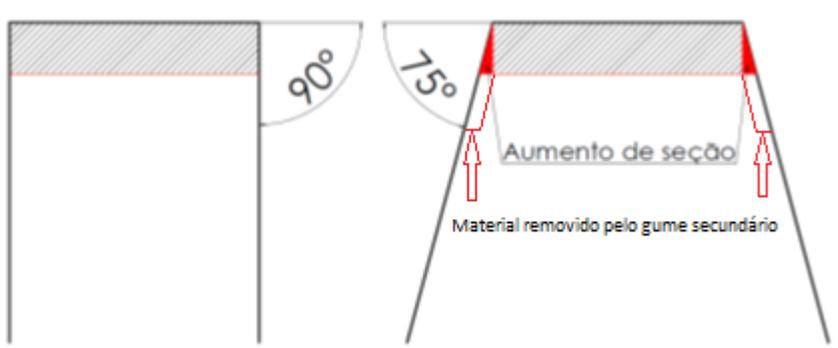


Figura 4.19 – Seções do cavaco

Esse comportamento é evidenciado pela Figura 4.20, onde ao se aumentar a profundidade do passe de ferramenta, há o aumento da área de atrito e aumento na seção de usinagem. Esse aumento na seção começa a

provocar um cavaco não retangular, e uma dificuldade em prever o comportamento da força de corte após certa profundidade de sulco, que nesses ensaios foi de 0,65 mm.

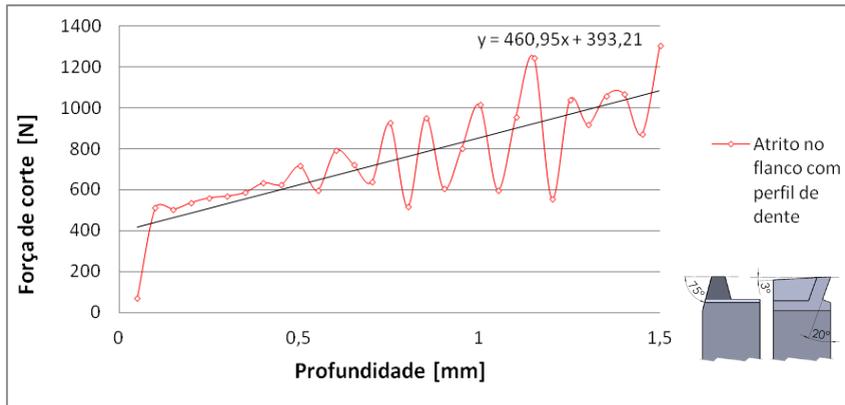


Figura 4.20 – Tendência da força de corte x profundidade de sulco, ferramenta com atrito no flanco secundário

Uma diferença entre ferramenta com ângulo de inclinação reto e outro menor (75°) foi a influência não mais linear do atrito durante o corte, mas sim exponencial ($y = 9,703e^{2,076x}$), pois, se já na ferramenta com ângulo reto, ao se aumentar a profundidade a área de atrito aumenta em duas dimensões, na ferramenta, na ferramenta com ângulo de inclinação menor esse efeito é intensificado pelo aumento em razão triangular do comprimento de gume secundário com o aumento da profundidade.

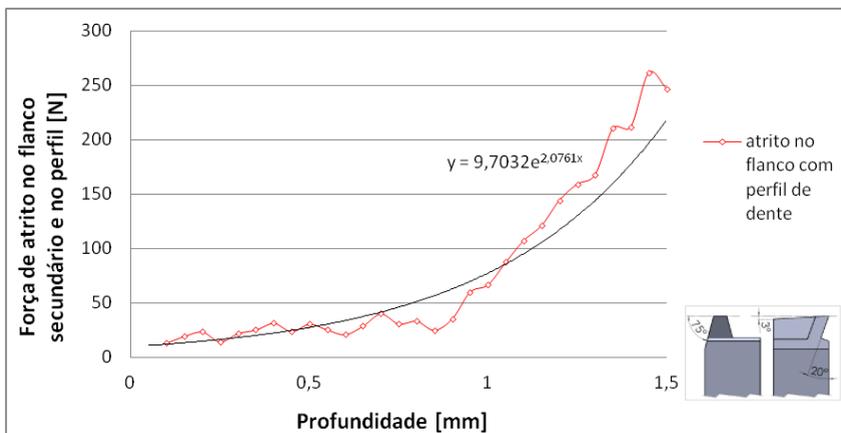


Figura 4.21 – Parcela de força de atrito no flanco secundário na força de corte sem corte de material

Na direção da força passiva, a força se comportou da mesma maneira. A medição da força de corte na profundidade resultou em força média de 231 N, com desvio padrão de 6 N, calculado entre os dados 200 e 600, diante dos valores de 190 N da ferramenta 2, e 200 N da ferramenta 1.

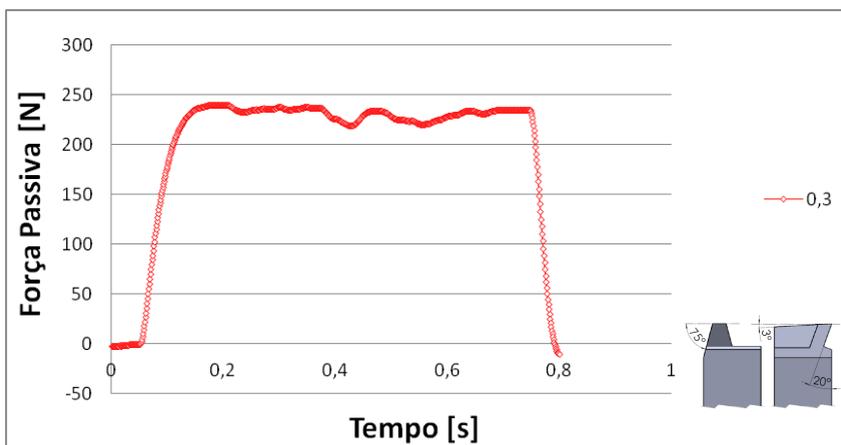


Figura 4.22 – Força passiva para profundidade de 0,3 mm, ferramenta 4

A tendência da força de corte refletiu também na força passiva, conforme evidenciado na Figura 4.23.

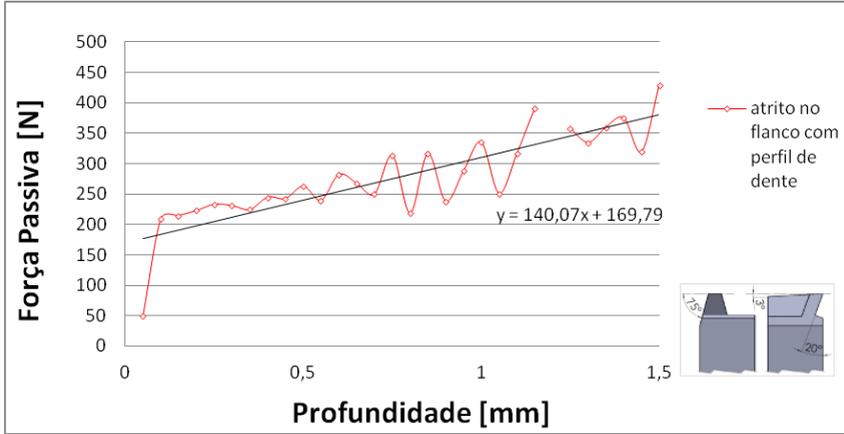


Figura 4.23 – Tendência da força passiva x profundidade de sulco, ferramenta com atrito no flanco secundário

O mesmo pode ser afirmado acerca da influência da força de atrito na direção do avanço. Com o aumento da profundidade de sulco, a contribuição seguiu a tendência de $y = 140,0x + 169,7$ N.

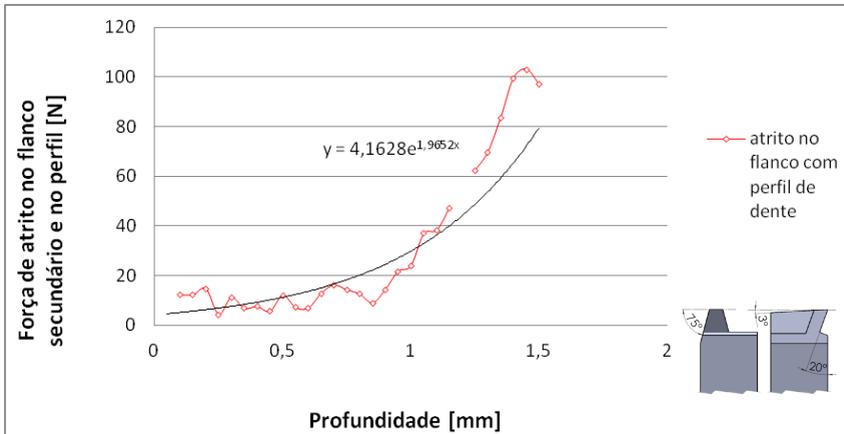


Figura 4.24 – Parcela de força de atrito no flanco secundário na força passiva sem corte de material

5 CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Ao término da análise dos ensaios, pôde ser feita uma avaliação criteriosa dos resultados, avaliando o alcance dos objetivos e a qualidade dos mesmos, bem como limitações e obstáculos encontrados durante as pesquisas e montagem da bancada. A respeito dela, as expectativas esperadas foram atendidas, pois se mostrou eficiente na simulação da operação de brochamento com a bancada, no controle e precisão do posicionamento e velocidade da ferramenta, bem como na aquisição de dados de força, requisitos para confiabilidade dos ensaios.

O coeficiente de Kienzle encontrado comprovou a influência da velocidade de corte nos esforços de usinagem, demonstrando a necessidade de medições diretas da força em condições de usinagem de brochamento para alimentação de modelos de força com precisão. Ensaio de torneamento para levantamento do coeficiente de Kienzle necessitam de fatores de correção, que estudos anteriores já aproximaram (Tabellenbuch Metall *apud* Bastos, 2005) para faixas de velocidades de corte diferentes, porém carece de maior entendimento na parte da influência do desgaste do gume e sua participação na formação de ângulos de saída efetivos.

O atrito no gume secundário se mostrou pouco influente nos ensaios, mantendo uma parcela praticamente constante no total desses esforços de corte. Esse ganho na resistência à passagem da ferramenta com o aumento do comprimento do gume secundário em contato com a peça foi insignificante em relação à ordem da força necessária ao corte de material. Para as ferramentas com atrito no flanco secundário, a contribuição dessa parcela foi mais evidente nos esforços de corte. Neste caso, o aumento do comprimento do gume em contato com a peça aumenta em duas dimensões a região de atrito, e conseqüentemente, esse atrito começa a afetar a força de corte e avanço à medida que, mesmo que a espessura de corte não mude, a penetração da ferramenta aumente. Por mais que as espessuras de corte usuais no brochamento sejam na ordem de décimos de milímetros, o número de dentes subsequentes determina uma penetração, na casa de milímetros para os dentes posteriores da brocha, tornando a influência do atrito nos flancos secundários cada vez mais significativos. Estes resultados comprovam a influência do atrito nos flancos secundários na força de corte o que possibilita, futuramente, se modelar empiricamente o aumento da força de corte com o aumento da área de contato do flanco secundário. No entanto, com os dados obtidos e para este cenário de ensaios, com ferramentas novas e com este par ferramenta-peça nas condições tribológicas em que foram feitos os ensaios já é

possível se prever o comportamento da força de corte e se utilizar esta predição na elaboração de um modelo empírico.

Particularmente em dentes de brochas com perfis de gumes não perpendiculares, como foi o caso da ferramenta 4, o aumento da profundidade de sulco altera a seção do cavaco formado. Essa alteração de seção retangular para trapezoidal, como foi o caso nesse trabalho, por exemplo, dificulta a formação do cavaco, desestabilizando o corte para espessuras de usinagem a partir de 0,5 mm.

A construção da bancada abre novas perspectivas para pesquisas de brochamento. Com esse sistema, é possível analisar vários parâmetros e seus reflexos nos esforços de corte. Como sugestão para futuros trabalhos pode-se analisar a forma cavaco gerado nos ensaios de força, para avaliar o índice de recalque no mesmo, como mostra a Figura 4.5.

Outro estudo promissor utilizando a bancada e o sistema de aquisição de forças é a análise do desgaste do gume. Com o auxílio de microscópio óptico disponível no USICON, ou microscópio eletrônico de varredura (MEV) disponível no laboratório central de microscopia eletrônica da UFSC (LCME), vai ser possível analisar o desgaste do gume e mudanças no ângulo efetivo de saída e as variações na força de corte e passiva propiciados por esse desgaste.

Outra sugestão para futuros trabalhos é a caracterização da microgeometria do gume da ferramenta e sua influência nos esforços de usinagem. Em função das pequenas espessuras de usinagem sabe-se da existência de uma forte influência da microgeometria do gume na formação do cavaco.

Há ainda, outros fatores de correção que podem ser levantados para uma alimentação confiável de modelos matemáticos de brochamento e que podem fazer uso da bancada desenvolvida, com a metodologia de medição direta de forças, como por exemplo, a influência do uso de revestimentos em brochas, bem como da utilização de meios lubri-refrigerantes, quantificando a diminuição, ou incremento de força necessária para realização do corte de material.

Finalizando, a estrutura da bancada permite uma adaptação para fixação de ferramentas de corte mais fiéis ao processo de brochamento. Sugere-se assim a utilização de vários dentes sucessivos permitindo a análise da força total no corpo de uma brocha e uma avaliação do incremento de esforços e suas proporções, lineares ou não, com o corte de dois ou mais dentes simultâneos.

REFERÊNCIAS

- ALBRECHT, P. **New development in the theory of the metal-cutting process: the ploughing**. ASME Journal of Engineering for Industry. 1960, Vol. 81, p. 348-358
- ALTINTAS, Y. **Manufacturing Automation: Metal Cutting Mechanics Machine Tool Vibrations and CNC Design**. Cambridge University Press, 2000.
- AMERICAN MACHINIST MAGAZINE. **Metal Cutting: Today's Techniques for Engineers and Shop Personnel**. McGraw-Hill, 244 p, 1979.
- ANDRADE, S. H. **Desempenho de diferentes revestimentos em brochas de aço rápido**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Universidade Estadual de Campinas. Programa de Pós Graduação da Faculdade de Engenharia Mecânica, Campinas, 2009.
- ASM. **Metals Handbook-Machining**. 9. ed. Editora ASM International, 1989. Vol. 16. 1089 p.
- ASTAKHOV, V. P. **Tribology of Metal cutting**. 1. ed. Elsevier, 2006, 426 p.
- AXINTE, D; GINDY, N. **Tool condition monitoring in broaching**, Wear 254 (3–4) (2003) 370–382.
- AZIZPOUR, M. J.; MAJD, H. M. **Wear mechanisms in high speed steel gear cutting tools**. World Academy of Science, Engineering and Technology, vol 69, 2010.
- BASTOS, C. M. **Modelagem e Simulação do Processo de Torno-brochamento de Virabrequins**. 2005. 121 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica), Universidade Federal de Santa Catarina, 2005.
- BOEIRA, A. M. G. **Modelagem e Simulação do Fresamento Externo Excêntrico de Virabrequins**. 2002. 125 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica), Universidade Federal de Santa Catarina, 2002.
- BOEIRA, A. M. G. **Modelagem e simulação de forças na furação com brochas helicoidais a partir de dados obtidos no torneamento de segmentos cilíndricos**. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2010.
- BOISSE, P; ALTAN, T.; LUTTERVELT, K. V. **Friction and Flow Stress in Forming and Cutting**. Kogan Page Limited, 2003.

BUDAK, E.; ALTINTAS, Y.; ARMAREGO, E. J. A. **Prediction of milling force coefficients from orthogonal cutting data**. Journal of Manufacturing Science and Engineering. Vol 18, p 216-224, 1996.

BUNSHAH, R. F. **Handbook of Hard Coatings: Deposition Technologies, Properties and Applications**. William Andrew Publishing, New York, 2001.

CHIAVERINI, V. **Aços e ferros fundidos**. Associação Brasileira, São Paulo, 1981.

DINIZ, A. E.; MARCONDES, F. C.; COPPINI, N. L. **Tecnologia da usinagem dos materiais**. 5. Ed. Editora Artliber, São Paulo, 2006.

DROZDA, T.; WICK, R. **Tool and manufacturing engineers handbook: machining**. 4. ed. Dearborn, Michigan: Society of Manufacturing Engineers, 1983, p. 7.1-7.37.

ETO, A. M. **Otimização da precisão em furos estampados por ferramenta combinada de punção e brochamento**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica – Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 2005.

GONÇALVES, Jr. A. A. **Metrologia – Parte 1**. Apostila, Laboratório de Metrologia e Automatização, LABMETRO, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2001.

GONÇALVES, D. A. **Modelagem e simulação de forças no brochamento**. Dissertação (Mestrado de Engenharia Mecânica) – Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico. Programa de Pós Graduação em Engenharia Mecânica, Florianópolis, 2009.

GONÇALVES, D. A. **Modelagem e simulação de forças no brochamento**. Apresentação de Power Point, Defesa de dissertação de mestrado – Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico, Florianópolis 2009b.

GÜNAY, M.; KORKUT, İ.; ASLAN, E.; SEKER, U. **Experimental investigation of the effect of cutting tool rake angle on main cutting force**. Journal of Materials Processing Technology. Vol. 166, p. 44-49, 2005.

HIOKI, D. **Usinagem dura do aço 100Cr6 com PCBN**. Dissertação (Mestrado de Engenharia Mecânica) – Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Florianópolis, 1998.

HOGMARK, S.; OLSSON, M. **Friction, Adhesion, Fundamentals, Wear Mechanisms in Metal Cutting**. First International HSS FORUM Conference, Aachen, Germany, 2005, 13p.

HSS Smart Guide – **Broaching**. First International HSS FORUM Conference, Aachen, Alemanha, 21p. 2005.

HUANG, Y. J. Optimal **integrated broaching manufacture process**. Dissertação (Mestrado de Ciências) – The Faculty of The College of Engineering and Technology. Ohio University, Ohio, 1989.

KISTLER. **Multicomponent dynamometer up to 5 kN**. Disponível em: www.kistler.com/br_en-br/13_Productfinder/App.9257B_BP/Product-finder.html. Acesso em: 15/05/2012.

KLOCKE, F. **Manufacturing processes 1 - Cutting**. Ed RWTH, Aachen, Germany, 2011

KÖKTÜRK, U.; BUDAK, E. **Optimization of Broaching Tool Design**. Intelligent Computation in Manufacturing Engineering - ICME, 2004.

KÖNIG, W.; KLOCKE, F. **Tecnologia da Usinagem com Ferramentas de Corte de Geometria Definida - Parte 1**. Traduzido e adaptado por Rolf Bertrand Schroeter e Walter Lindolfo Weingaertner do livro “Fertigungsverfahren – Drehen, Fräsen, Bohren”, 1997, 349 p

KOUNTANYA, R.; ENDRES, W. **A high-magnification experimental study of orthogonal cutting with edge-honed tools**. Proceedings of ASME International Mechanical Engineering Congress and Exposition. New York, 2001.

LEGUTKO, S., KLUK, P., STOIC, A. **Research of the surface roughness created during pull broaching process**. Metalurgija - Journal for Theory and Practice in Metallurgy, Vol 4,p. 245-248,2011

LIANG, S. **Mechanical engineering handbook – Modern manufacturing**. Ed Frank Kreith, CRC Press LLC, 1999

LIMA, C. C. de; MIRANDA, G. W. A. **Brochamento interno de articulação em aço ABNT 1045 forjado**. 4º Congresso Brasileiro de Engenharia de Fabricação. Estância de São Pedro, 2007.

MAKAROV, V.F., TOKAREV, D. I., TYKTAMISHEV, V.R. **High speed broaching of hard machining materials.** International Journal of Material Forming, Vol. 1, p. 547-550, 2008.

MANGONI, C. **Determinação teórico-experimental de forças e análise dinâmica por elementos finitos no fresamento de peças com baixa rigidez.** Dissertação (Mestrado de Engenharia Mecânica) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2004

MELLO, L., **Ferramenta Combinada de Puncionamento com Brochamento.** Monografia do Curso de Especialização em Engenharia de Materiais Metálicos, Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2001.

MO, S., AXINTE, D. A., HYDE, T. H., GINDY, N. N. Z. **An example of selection of the cutting conditions in broaching of heat-resistant alloys based on cutting forces, surface roughness and tool wear.** Journal of Materials Processing Technology. Vol. 60, p. 382-389, 2005.

ÖZTÜRK, O. **Modeling of broaching for optimization purposes.** Dissertação (Mestrado de Ciências) – Sabanci University, Turquia, 2003.

RAJAM, S. K. **Design and finite element analysis of the broaching tools.** Dissertação (Mestrado de Ciências) - The Faculty of The College of Engineering and Technology. Ohio University, Ohio, 1997

REICHARD, A. **Fertigungstechnik I.** Handwerk und Technik G.m.b.H, Hambur, 2000. 422 p

SAJEEV, V., VIJAYARAGHAVAN, L., RAO, U. R. K. **An analysis of the effects of burnishing in internal broaching.** International Journal of Mechanical Engineering Education, Vol 28, n° 2, 1997

SANTOS, S. C. e SALES, W. F. **Aspectos Tribológicos da Usinagem dos Materiais.** 1. ed. São Paulo : Artliber Ltda., 2007.

SCHNEIDER, G. **Cutting Tool Applications.** 2ed. Broaches and Broaching, 2001, Cap 14.

SCHROETER, R. B. **Usinagem de Ultraprecisão de Elementos Ópticos Transmissivos..** Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica), Universidade Federal de Santa Catarina, 194 p, Florianópolis, 1997.

SHCHEDRIN, A. V., UL'YANOV, V. V., BEKAEV, A. A., CHIKHACHEVA, N. YU. Efficient hole broaching with regularized surface microgeometry of the deforming elements. Russian Engineering Research, Vol 29, N° 9, p 911-915, 2009

SHI, D., AXINTE, D. A., GINDY, N. N. **Development of an online machining process monitoring system: a case study of the broaching process.** The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. Vol. 34, p. 34-46, 2006.

STEMMER, C. E. **Ferramentas de corte II.** 3. ed. Florianópolis : UFSC, 2005. Vol. 2, p. 217-270.

STOCKER, W. M., HICKS, T. **Metal Cutting: Today's Techniques for Engineers and Shop Personnel.** McGraw-Hill Companies, 1979, 185p.

SUTHERLAND, J. W., SALISBURY, E. J. e HOGE, F. W. **A model for the cutting force system in the gear broaching process.** International Journal of Machining and Tools Manufacturing. Vol. 37, p. 1409-1421, 1997

TRENT, E. M. e WRIGHT, P. K. **Metal Cutting.** Butterworth-Heinemann, 4. ed. 464 p. 2000.

VALLE, P. D. **Avaliação da Influência da Minimização e Eliminação do Fluido de Corte no Processo de Fresamento de Topo Reto.** Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica). Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis 2001.

WALSH, R. A. **Handbook of machining and metalworking calculations.** The McGraw-Hill Companies, 2001, 379p.

ZOREV, N. N. **Metal Cutting Mechanics,** Pergamon Press, Oxford, 1966.

ANEXO 1

Tabela A1 – Características de brochamento para diversos materiais.

Metal	Trat. térmico ^a	Dureza [HRC]	Tolerância		Acabamento	
			mm	in.	µm	µin.
2618-T61 Al	G	70 HRB	0,05	0,002	0,80-1,15	32-45
2014-T6 Al	G	70 HRB	0,058	0,0023	0,80	32
Ti-6Al-4V	E	36-38	0,019	0,0007 5	0,61-0,80	24-32
Stellite 31	B	32	0,05	0,002	2,00	80
SAE 51410 (type 410SS)	H	32-36	0,05	0,002	1,60	63
Greek Ascolloy	I	32-38	0,025	0,001	0,89-1,07	35-42
Inconel	A	85 HRB	0,13	0,005	2,00	80
Inconel X	H	29	0,025	0,001	0,80	32
Timken 16-25-6	F	20-28	0,025	0,001	0,80-1,60	32-63
A-286	G	28-30	0,060	0,0024	0,80	32
		30-35	0,025	0,001	0,89	35
		32-38	0,015	0,0006	0,80	32
S-816	G	23-30	0,025	0,001	0,80-1,00	32-40
SAE 3310	E	20	0,25	0,010	1,60	63
SAE 9310	I	36-38	0,05	0,002	1,60	63
17-22A(S)	H	29-34	0,025	0,001	1,50	60
17-22A	H	35-40	0,075	0,003	...	...
SAE 9840	I	32-36	0,025	0,001	1,25	50
SAE 4130	I	32	0,013	0,0005	1,60	63
SAE 4140	I	25-29	0,05	0,002	0,80-1,60	32-63
SAE 434	I	38	0,05	0,002	1,14-1,60	45-63
M	A	24-28	0,02	0,0008	0,80	32
MS 544	...	40-47	0,025	0,001	0,75	30
Inconel 901	I	32-36	0,038	0,0015	1,60	63
René 41	G	40-42	0,060	0,0024	0,80	32
WAD 7823A	...	28	0,0076	0,0003	1,0-1,5	40-60
D-979	I	38-40	0,013	0,0005	1,50	60
EMS 73030	...	32-3	0,07	0,0028	1,60	63
M-308	...	36-38	0,060	0,0024	0,80	32
Chromolloy	...	31-32	0,10	0,004	0,80	32
PWA-682 (Ti)	...	34-36	0,025	0,001	0,80	32
Lapelloy	J	30-37	0,20	0,008	0,80	32
Type 303 SS	A	85 HRB	0,025	0,001	1,60	63
Type 304 SS	A	80-85 HRB	0,05	0,002	1,60	63

Type 403 SS	I	37-40	0,015	0,006	1,60	63
SAE 1010	D	60	0,025	0,001	0,75	30
SAE 1020	D	3-12	0,05	0,002	1,55-2,05	60-80
SAE 1037	I	15-20	0,0076	0,0003	1,60	30
SAE 1045	I	24-31	0,013	0,0005	...	...
SAE 1063	E	12-18	0,10	0,004	0,63-1,5	25-60
SAE 1070	E	5-10	0,05	0,002	0,71-1,5	28-60
SAE 1112	...	87 HRB	0,025	0,001	1,0-1,15	40-45
SAE 1145	C	13-18	...	...	1,25-2,5	50-100
SAE 1340	C	15-20	0,075	0,003	...	...
SAE 4047	C	8-15	0,05	0,002	1,5-2,0	60-80
SAE 5140	C	8-15	0,05	0,002	1,5-2,0	60-80
SAE 51200	D	25	0,013	0,0005	0,75	30
FoFo cinzento	B	90 HRB	0,075	0,003	2,0-2,5	80-100
FoFo KP-7	B	...	0,013	0,0005	3,20	125

Fonte: American Machinist Magazine (1979)

SS = Aço inoxidável

(a) Tratamento ou condição. A: Recozido, B: Fundido, C: Forjado, D: acabado à frio, E: acabado à quente, F: com alívio de tensões, G: Solubilizado e precipitado, H: Temperado e revenido ao ar, I: Temperado e revenido ao óleo, J: Temperado e revenido em salmora.

APÊNDICE A – Calibração da plataforma piezelétrica

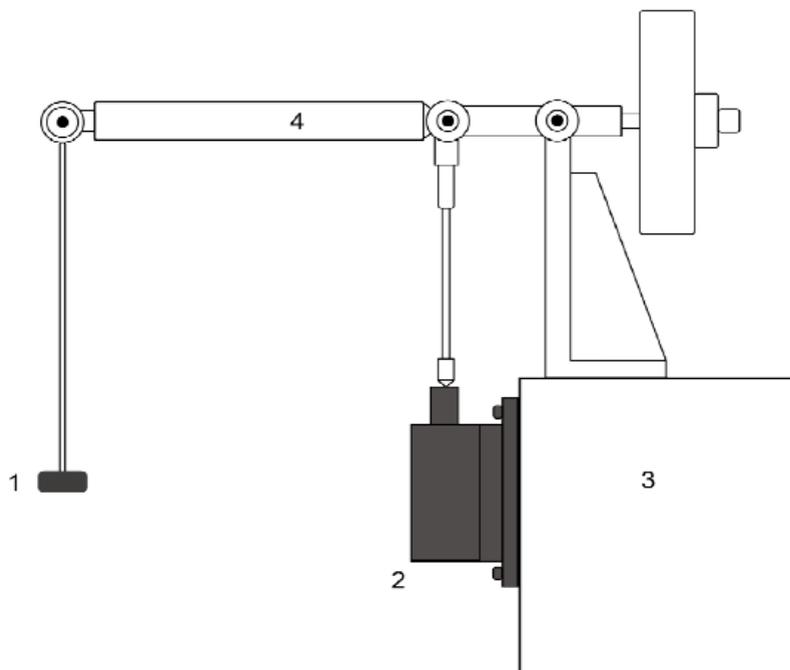


Figura 1 – Aparato para calibração da plataforma piezelétrica

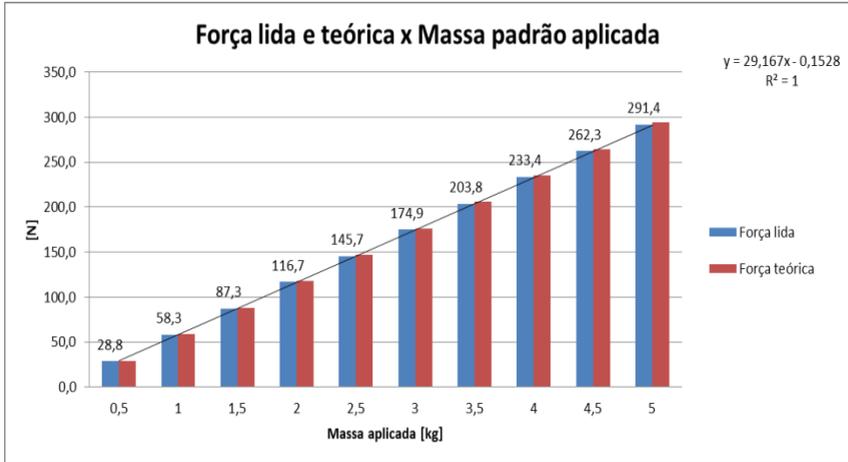


Figura 2 – Dados para calibração eixo X

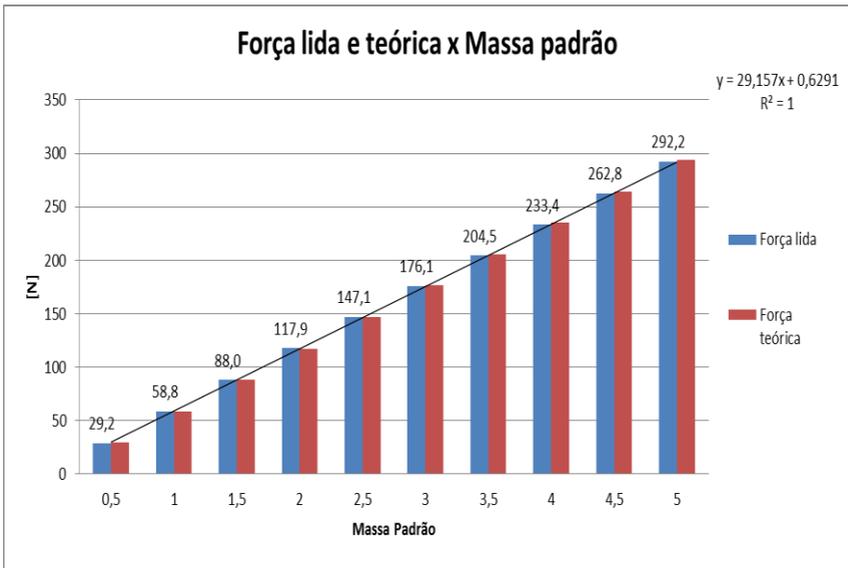


Figura 3 – Dados para calibração eixo Y