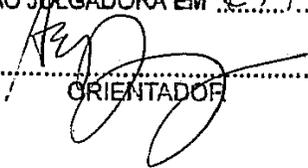


ESTE EXEMPLAR CORRESPONDE A REDAÇÃO FINAL DA
TESE DEFENDIDA POR SERGIO HENRIQUE
ANDRADE..... E APROVADA
PELA COMISSÃO JULGADORA EM 27.1.02.12009


.....
ORIENTADOR

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA
COMISSÃO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

Desempenho de Diferentes Revestimentos em Brochas de Aço Rápido

Autor: Sergio Henrique Andrade
Orientador: Anselmo Eduardo Diniz

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA
COMISSÃO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE FABRICAÇÃO

Desempenho de Diferentes Revestimentos em Brochas de Aço Rápido

Autor: Sergio Henrique Andrade
Orientador: Anselmo Eduardo Diniz

Curso: Engenharia Mecânica
Área de Concentração: Materiais e Processos de Fabricação

Dissertação de mestrado acadêmico apresentada à comissão de Pós Graduação da Faculdade de Engenharia Mecânica, como requisito para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Mecânica.

Campinas, 2009
S.P . – Brasil

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA
BIBLIOTECA DA ÁREA DE ENGENHARIA E ARQUITETURA - BAE - UNICAMP

An24d Andrade, Sergio Henrique
Desempenho de diferentes revestimentos em brochas
de aço rápido / Sergio Henrique Andrade. --Campinas,
SP: [s.n.], 2009.

Orientador: Anselmo Eduardo Diniz.
Dissertação de Mestrado - Universidade Estadual de
Campinas, Faculdade de Engenharia Mecânica.

1. Aço-ferramenta. 2. Metalurgia do pó. 3. Cobertura
(Engenharia). I. Diniz, Anselmo Eduardo. II.
Universidade Estadual de Campinas. Faculdade de
Engenharia Mecânica. III. Título.

Título em Inglês: Performance of differents coatings on high speed steel broachs
Palavras-chave em Inglês: Tool-steel, Metallurgy powder , Coating (Engineering)
Área de concentração: Materiais e Processos de Fabricação
Titulação: Mestre em Engenharia Mecânica
Banca examinadora: João Roberto Ferreira, Olívio Novaski
Data da defesa: 27/02/2009
Programa de Pós Graduação: Engenharia Mecânica

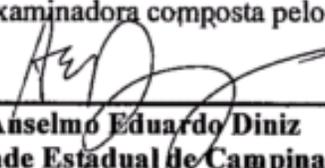
UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA
COMISSÃO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE FABRICAÇÃO

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO ACADEMICO

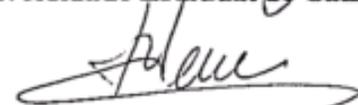
Desempenho de Diferentes Revestimentos em
Brochas de Aço Rápido

Autor: Sergio Henrique Andrade
Orientador: Anselmo Eduardo Diniz

A Banca Examinadora composta pelos membros abaixo aprovou esta Dissertação:



Prof. Dr. Anselmo Eduardo Diniz
Universidade Estadual de Campinas



Prof. Dr. João Roberto Ferreira
Universidade Federal de Itajubá



Prof. Dr. Olívio Novaski
Universidade Estadual de Campinas

Campinas, 27 de fevereiro de 2009

Dedicatória:

Dedico esse trabalho aos meus pais, Henrique e Célia, a minha querida esposa Débora e aos meus filhos João Vitor e Isabella.

Agradecimentos:

A elaboração deste trabalho só foi possível, devido a ajuda de importantes pessoas as quais agradeço:

A minha esposa pela ajuda e compreensão.

Ao professor Anselmo Eduardo Diniz pela oportunidade, pela grande capacidade de orientação e pelo incentivo na realização desse trabalho.

A empresa Schaeffler Brasil Ltda, divisão LUK Embreagens, por toda a estrutura cedida para a elaboração desse trabalho.

*Comece fazendo o que é necessário, depois
o que é possível, e de repente, você estará
fazendo o impossível.*

Resumo

ANDRADE, Sergio H. Desempenho de Diferentes Revestimentos em Brochas de Aço Rápido, Campinas,: Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, 2009. 99 P. Dissertação (Mestrado).

O aço rápido é um material que apresenta elevada resistência ao desgaste e elevada dureza a quente, tendo grande aplicação na construção de ferramentas de dimensões e formas complexas, tais como brochas. O presente trabalho avaliou a utilização de coberturas de materiais mais resistentes ao desgaste em brochas de aço rápido no brochamento interno de perfil, utilizando como corpo de prova o componente do conjunto de disco de embreagem denominado cubo de embreagem, fabricado em aço DIN C45. Foram realizados ensaios variando-se três tipos de revestimentos, TiN, TiCN e AlCrN, e dois tipos de substratos, o aço rápido convencional M2 e o aço rápido sinterizado. Foram medidos o desgaste e a vida da ferramenta, a pressão no sistema hidráulico da brochadeira e a dimensão do perfil interno do corpo de prova. A análise dos resultados permitiu concluir que as brochas com cobertura apresentaram uma maior vida, quando comparado com as brochas sem cobertura, mesmo quando a brocha é reafiada e não recoberta, trabalhando sem cobertura na superfície de saída. Entre as coberturas, o TiCN e AlCrN foram que apresentaram melhor rendimento, apesar da pequena vantagem da cobertura de TiCN, não foi possível afirmar estatisticamente que existe diferença entre as duas coberturas. A utilização da cobertura, ao contrário do esperado, causou aumento na pressão do sistema hidráulico da brochadeira para os três tipos de cobertura. Não ocorreu grandes diferenças, em relação à vida da ferramenta, quando comparou-se as brochas com substratos de aço rápido convencional e o sinterizado. Ficou constatado que a dimensão do perfil não sofre grande variação durante uma vida da ferramenta.

Palavra Chave: brochamento, cobertura PVD, aço rápido sinterizado.

Abstract

ANDRADE, Sergio H. Performance of different coatings on high speed steel broachs, Campinas,: Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, 2009. 99 P. Dissertação (Mestrado).

The high speed steels is a material with high wear resistance and high hot hardness, with large application to made tools with complex shape and dimension. The present work evaluated the application of wear resistance materials on high speed steel broach in broaching of profile, using like specimen a clutch component denominated hub, made DIN C45 steel. It has been made three different tests varying the coatings, TiN, TiCN and AlCrN, two different substrates, the conventional high speed steel M2 and the powder metallurgy high speed steel. Tool wear, tool life, pressure in the broaching machine hydraulic system and the profile dimension were measured. The analysis of the results allowed us to conclude that the broaches with coating led to a longer tool life than the condition without coating, the same happened when the broach was resharpened and didn't receive a new coating, working without coating in the rake face. Between the coatings, the TiCN and AlCrN have shown the best performances, although TiCN has a little advantage, it wasn't possible to say statistically that there is a difference between them. The use of coating, in the opposite was waiting, has cause the increase of the pressure in the broaching machining hydraulic system for the three kinds of coatings. Didn't occur much difference at the tool's life when comparing the conventional high speed steel and the powder metallurgy high speed steel substrates. We've come to the conclusion that the profile dimension doesn't suffer much variation during one tool's life

Key Words: broaching, PVD coating, powder metallurgy high speed steel.

Índice

| | |
|---|--------------|
| Lista de Figuras | xii |
| Lista de Tabelas | xvi |
| Lista Equações | xvii |
| Nomenclatura | xviii |
| Capítulo 1 | 1 |
| Introdução | 1 |
| Capítulo 2 | 3 |
| Brochamento | 3 |
| 2.1. Processo de brochamento. | 3 |
| 2.1.1. Brocha | 4 |
| 2.2 Tipos de brochas | 9 |
| 2.2.1 Brochas para tornos e centros de usinagem | 9 |
| 2.2.2 Brochas internas | 11 |
| 2.2.3 Brochas externas | 15 |
| 2.3 Fluidos de corte no brochamento. | 16 |
| 2.4 Forças de corte no brochamento. | 17 |
| Capítulo 3 | 22 |
| Tipos e mecanismos de desgaste | 22 |
| 3.1. Processo de corte. | 22 |

| | |
|---|-----------|
| 3.2. Mecanismos de desgaste. | 24 |
| 3.2.1. Desgaste abrasivo | 24 |
| 3.2.2. Desgaste por aderência e arraste | 25 |
| 3.2.3. Desgaste por deformação plástica | 27 |
| 3.2.4. Desgaste difusivo | 28 |
| 3.2.5. Fadiga e fratura | 29 |
| 3.2.6. Tipos de desgastes em brochas | 30 |
| Capítulo 4 | 32 |
| Materiais e Revestimentos de Ferramentas | 32 |
| 4.1. Cobertura de ferramentas | 32 |
| 4.1.1. Tipos de revestimentos | 33 |
| 4.1.2. Revestimentos nanoestruturados | 35 |
| 4.2. Substratos para brochas | 38 |
| 4.2.1 Aço rápido | 38 |
| 4.2.2. Aço sinterizado | 41 |
| 4.2.3. Metal duro | 44 |
| 4.3. Preparação de arestas | 44 |
| 4.3.1 Processo de fabricação de ferramentas inteiriças | 45 |
| 4.3.2. Defeitos na microgeometria de ferramentas de corte | 47 |
| 4.4. Estudo de casos | 49 |
| Capítulo 5 | 53 |
| Materiais, Equipamentos e Métodos Experimentais | 53 |
| 5.1. Material. | 53 |
| 5.1.1. Equipamentos e instrumentos utilizados. | 55 |
| 5.1.2. Ferramentas utilizadas. | 59 |
| 5.1.3. Dureza das brochas. | 62 |
| 5.2 Método para a execução dos ensaios. | 63 |
| Capítulo 6 | 65 |

| | |
|--|-----------|
| Resultados e discussões | 65 |
| 6.1. Vida das Brochas | 65 |
| 6.1.1. Conjunto de ensaios 1- Brocha de aço rápido M2 e aço rápido sinterizado. | 66 |
| 6.1.2. Conjunto de ensaios 2 – Brocha de aço rápido M2 com cobertura de TiN, TiCN e AlCrN. | 67 |
| 6.1.3. Conjunto de ensaios 3 – Brochas reafiadas sem receber nova cobertura. | 68 |
| 6.1.4. Conjunto de ensaios 4 – Brocha com aço rápido sinterizado e cobertura de TiCN. | 70 |
| 6.2. Dimensão do perfil interno | 71 |
| 6.3. Pressão no brochamento | 75 |
| 6.4. Desgaste no brochamento | 82 |
| 6.4.1. Desgaste das brochas sem cobertura | 84 |
| 6.4.2. Desgaste de brochas com cobertura de TiN, AlCrN e TiCN | 86 |
| 6.4.3. Desgaste de flanco em brochas sem cobertura na superfície de saída. | 89 |
| 6.4.3. Desgaste brochas sinterizadas com cobertura TiCN. | 92 |
| Capítulo 7 | 94 |
| Conclusões e sugestões para trabalhos futuros | 94 |
| Referências Bibliográficas | 96 |

Lista de Figuras

| | |
|---|----|
| 2.1: Brocha Cilíndrica Interna (HSS FORUM CONFERENCE, 2005). | 4 |
| 2.2: Nomenclatura e terminologia da brocha (SCHNEIDER, 2001). | 5 |
| 2.3: Obtenção do comprimento brochado (HSS FORUM, 2005). | 6 |
| 2.4: Preenchimento do canal da brocha pelo cavaco durante o brochamento (SCHNEIDER, 2001). | 7 |
| 2.5: Brocha com canais helicoidais (HORI, 2005). | 7 |
| 2.6: Cavacos gerados por brochas de canais convencionais e canais helicoidais (HORI, 2005). | 8 |
| 2.7: Quebra cavaco (HSS FORUM, 2005). | 8 |
| 2.8: Ferramenta para brochamento em tornos e centros de usinagem. | 10 |
| 2.9: Posicionamento da ferramenta em relação a peça a ser brochada. | 11 |
| 2.10: Formas produzidas por brochas internas (HSS FORUM, 2005). | 11 |
| 2.11: Brocha para rasgo de chaveta. | 12 |
| 2.12: Perfil do disco de turbina utilizado na indústria aeronáutica. | 12 |
| 2.13: Brocha montada (MILLERBROACH). | 13 |
| 2.14: Processo de brochamento de engrenagem interna (SUTHERLAND, SALISBURY, HOGE, 1997). | 13 |
| 2.15: Processo de corte de brochas de duas seções. | 14 |
| 2.16: Brocha plana (HSS FORUM, 2005). | 15 |
| 2.17: Esquema de uma Máquina de Brochar de Corrente. | 15 |
| 2.18: Peças usinadas com brochas externas (HSS FORUM, 2005). | 16 |
| 2.19: Forças de corte no corte ortogonal (OZTURK, 2003). | 18 |
| 2.20: Forças de corte no corte oblíquo (OZTURK, 2003). | 18 |
| 2.21: Geometria de formação cavaco. | 19 |

| | |
|---|----|
| 3.1: Distribuição de temperatura na ponta de uma ferramenta de HSS | 23 |
| 3.2: Força de corte x velocidade de corte e avanço (HOGMARK, OLSSON, 2005). | 23 |
| 3.3: Mecanismos desgastes em ferramenta de corte de aço rápido (HOGMARK, OLSSON, 2005). | 24 |
| 3.4: Desgaste abrasivo (HOGMARK, OLSSON, 2005). | 25 |
| 3.5: Desgaste por adesão em uma ferramenta de fresamento de aço rápido (HOGMARK, OLSSON, 2005). | 26 |
| 3.6: Deformação plástica em uma ferramenta de aço rápido (HOGMARK, OLSSON, 2005). | 28 |
| 3.7: Secção da superfície de saída de uma ferramenta de aço rápido após usinar um aço inoxidável austenítico (TRENT, 2000). | 29 |
| 3.8: Lascamento da aresta de corte em uma fresa caracol (HOGMARK, OLSSON, 2005). | 30 |
| 3.9: Dente lascado devido acúmulo de cavaco – falta de limpeza. | 31 |
| 4.1: Estrutura de camadas convencionais (CSELLE, 2003). | 35 |
| 4.2: Estrutura de camadas nanoestruturadas. | 36 |
| 4.3 Relação entre espessura da nanocamada e dureza (CSELLE, 2003). | 36 |
| 4.4: Aumento da dureza de revestimentos nanocompostos. | 37 |
| 4.5: Relação entre temperatura e dureza de alguns revestimentos. | 38 |
| 4.6: Microestrutura: a) aço rápido convencional, b) aço rápido | 41 |
| 4.7: Relação entre resistência a flexão e dureza de alguns materiais (ERASTEEL 2007). | 42 |
| 4.8: Propriedades comparativas entre aços convencionais e aços sinterizados. | 43 |
| 4.9: Teste de desgaste em brochas com diferentes substratos. | 44 |
| 4.10: Passos para a fabricação de uma ferramenta inteira. | 46 |
| 4.11: Exemplo da micro geometria da aresta de corte de uma fresa de topo de metal duro (RECH, 2005). | 46 |
| 4.12: Exemplo da micro geometria da aresta de corte de uma fresa tipo caracol de HSS (RECH, 2005). | 47 |
| 4.13: Típicos defeitos observados em fresas de topo inteiriças (RECH, 2005). | 48 |
| 4.14: Típicos defeitos observados em fresas tipo caracol (RECH, 2005). | 48 |
| 4.15: Efeito da rugosidade superficial dos dentes na vida da brocha | 49 |
| 4.16-Comparação do desgaste entre brochamento MQL com HSS-PM e cobertura com o brochamento convencional. | 52 |

| | |
|--|----|
| 5.1: Cubo de embreagem utilizado como corpo de prova. | 54 |
| 5.2: Dimensões de construção do perfil interno. | 54 |
| 5.3: Brochadeira Detroit. | 55 |
| 5.4: Apoio da peça na brochadeira. | 56 |
| 5.5: a)Puxador superior b) puxador inferior. | 56 |
| 5.6: Tridimensional ótica. | 57 |
| 5.7: transdutor instalado na brochadeira. | 58 |
| 5.8: Amplificador e software de medição. | 58 |
| 5.9: Dispositivo de medição do perfil interno. | 59 |
| 5.10: Detalhe das dimensões dos dentes da brocha. | 60 |
| 5.11: Desenho da Brocha. | 61 |
| 5.12: Valores de dureza HRC para brochas com e sem cobertura. | 62 |
| 6.1: Vida de brochas de aço rápido M2 e aço rápido sinterizados sem | 66 |
| 6.2: Comparação de brochas em aço rápido com coberturas de TiCN, AlCr e TiN. | 67 |
| 6.3: Comparação entre brochas sem cobertura e brochas com cobertura. | 68 |
| 6.4: Comparação de vida de brochas com cobertura total, brochas sem cobertura na superfície de saída e brochas sem cobertura. | 69 |
| 6.5: Gráfico comparativo de vida de brochas com cobertura de TiCN com substratos de aço rápido e aço sinterizado. | 70 |
| 6.6: Valores entre esferas do perfil com brocha coberta TiN. | 72 |
| 6.7: Valores entre esferas do perfil com brocha coberta AlCrN. | 72 |
| 6.8: Valores entre esferas do perfil com brocha coberta TiCN. | 73 |
| 6.9: Esquema de usinagem dos dentes da brocha. | 74 |
| 6.10: Esquema de usinagem dos dentes da brocha na presença de desgaste. | 74 |
| 6.11: Variação da pressão no sistema hidráulico da brochadeira com os carros movimentando em vazio. | 76 |
| 6.12: Pressão no sistema hidráulico da brochadeira com brochas sem cobertura e com cobertura de TiN, AlCrN e TiCN no início de vida da ferramenta. | 77 |
| 6.13: Pressão no sistema hidráulico da brochadeira com brochas sem cobertura e com cobertura de TiN, AlCrN e TiCN no final de vida da ferramenta. | 78 |

| | |
|---|----|
| 6.14: Comparação da pressão do sistema hidráulico da brochadeira para diferentes regiões de brochas com e sem cobertura, no início e final de vida. | 79 |
| 6.15: Comparação da pressão no sistema hidráulico da brochadeira com brochas sem cobertura e com cobertura TiCN – Brocha 1. | 80 |
| 6.16: Comparação da pressão no sistema hidráulico da brochadeira com brochas sem cobertura e com cobertura de TiCN- Brocha 2. | 81 |
| 6.17: Comparação da pressão do sistema hidráulico da brochadeira com brochas sem cobertura e brochas com cobertura de TiCN. | 82 |
| 6.18: (a) brocha sem cobertura com cavacos presos nos canais, (b) brocha com cobertura de TiCN sem cavacos nos canais. | 83 |
| 6.19: Média dos valores de desgaste VB para brochas sem cobertura com aço rápido M2 e aço rápido sinterizado. | 84 |
| 6.20: Desgaste de dois dentes distintos de brochas de aço rápido M2. | 85 |
| 6.21: Desgaste de dois dentes distintos de brochas de aço rápido Sinterizado. | 86 |
| 6.22: Média dos valores de desgaste VB para brochas com substrato de aço rápido M2 e cobertura de TiN, AlCrN e TiCN. | 87 |
| 6.23: Desgaste do dente de brochas de aço rápido M2 com cobertura AlCrN | 88 |
| 6.24: Desgaste do dente de brochas de aço rápido M2 com cobertura TiN. | 88 |
| 6.25: Desgaste do dente de brochas de aço rápido M2 com cobertura TiCN. | 88 |
| 6.26: Média dos valores de desgaste V_B para brochas com aço rápido M2 sem cobertura de TiN, AlCrN e TiCN na superfície de saída. | 90 |
| 6.27: Desgaste do dente de brochas de aço rápido M2 sem cobertura AlCrN na superfície de saída. | 91 |
| 6.28: Desgaste do dente de brochas de aço rápido M2 sem cobertura TiN na superfície de saída. | 91 |
| 6.29: Desgaste do dente de brochas de aço rápido M2 sem cobertura TiCN na superfície de saída. | 92 |
| 6.30 Gráfico da média dos valores de desgaste VB para brochas com substrato de aço rápido sinterizado com cobertura de TiCN. | 92 |
| 6.31: Desgaste dos dentes de brochas de aço rápido sinterizado com cobertura TiCN. | 93 |

Lista de Tabelas

| | |
|--|----|
| 3.1: Características de desgastes de brochas | 30 |
| 4.1: Características dos revestimentos | 34 |
| 4.2 : Composição e características dos aços rápidos (Chiaverine, 1981) | 40 |
| 4.3: Composição química dos aços ASP 2023 e 2030 (ERASTEEL) | 43 |
| 4.4: Métodos de preparação de arestas (CSELLE, 2005). | 45 |
| 4.5: Comparação de desgaste de brocha com e sem cobertura TiN. | 50 |
| 4.6: Comparação entre a vida de brochas com e sem cobertura TiN. | 50 |
| 5.1: Composição química aço C45. | 53 |

Lista Equações

| | |
|--|----|
| Cálculo do passo da brocha | 6 |
| Cálculo da força de corte | 19 |
| Cálculo da pressão específica de corte | 20 |
| Cálculo do ângulo de cisalhamento | 20 |
| Cálculo da força total por dente da brocha | 21 |

Nomenclatura

Letras Latinas

| | |
|-------|--|
| Al | Alumínio |
| b | Largura de corte |
| C | Carbono |
| Co | Cobalto |
| Cr | Cromo |
| F_f | Força de avanço |
| F_r | Força radial de corte |
| F_t | Força de corte tangencial |
| I | Inclinação da aresta de corte |
| j | Indicativo da direção da força |
| K | Coefficiente da força de corte |
| K_f | Pressão específica de corte na direção de avanço |
| K_t | Pressão específica de corte na direção de corte |
| L | Comprimento brochado |
| Mn | Manganês |
| Mo | Molibdênio |
| P | Passo do dente da brocha |
| P | Fósforo |
| Pb | Chumbo |
| Ra | Rugosidade média |
| Ry | Rugosidade máxima |
| S | Enxofre |

| | |
|----|-----------------------|
| Si | Silício |
| T | Profundidade de corte |
| Ti | Titânio |
| V | Vanádio |
| W | tungstênio |

Letras Gregas

| | |
|------------|--------------------------------|
| γ_0 | Ângulo de saída |
| β | Ângulo de fricção |
| η | Ângulo de escoamento do cavaco |
| Φ | Ângulo de cisalhamento |

Abreviações e Fórmulas Químicas

| | |
|-------|---|
| AlCrN | Nitreto de Cromo Alumínio |
| AlN | Nitreto de Alumínio |
| AlTiN | Nitreto de Alumínio Titânio |
| CBN | Nitreto cubico de boro |
| CNC | Comando numérico computadorizado |
| CrN | Nitreto de cromo |
| CVD | Chemical vapor deposition |
| CWT | Cold work tool steel |
| Gpa | Gigapascal |
| HB | Hardness Brinell (Dureza Brinell) |
| HRC | Hardness Rockwell C (Dureza Rockwell C) |
| HSS | High speed steel |
| HV | Hardness Vickers (Dureza Vickers) |
| MQF | Mínima quantidade de fluído |
| PM | Powder metallurgy |
| PVD | Physical vapor deposition |

| | |
|--------------------------------|-----------------------------|
| Reaf. | Reafiada |
| Sint. | Sinterizado |
| Si ₃ N ₄ | Nitreto de Silício |
| S/Cob | Sem cobertura |
| TiAlN | Nitreto de titânio Alumínio |
| TiCN | Carbonitreto de titânio |
| TiN | Nitreto de titânio |
| VB | Desgaste de flanco |
| VBmax | Desgaste de flanco máximo |

Capítulo 1

Introdução

O brochamento é um dos mais importantes processos de usinagem com alta capacidade de produção em massa. Perfis externos e internos podem ser produzidos por brochamento podendo ser ou não, furos circulares, quadrados ou de formas irregulares, rasgos de chaveta e dentes interno de engrenagens podem ser produzidos por esse processo. O processo de brochamento ainda oferece a vantagem de realizar o acabamento da peça em um curso, fazendo com que o tempo de brochamento seja curto. A processo de brochamento é estável e é possível produzir peças com tolerâncias apertadas, e rugosidades na faixa de R_y entre 8 e 10 μm . A ferramenta possui muitas arestas de corte em comparação com fresas e, como o volume de material usinado por um dente é pequeno, a vida útil da ferramenta é prolongada. Além disso, a usinagem é muito fácil e não exige nenhuma habilidade especial .

A brocha é o item mais importante do processo de brochamento. Após a produção da brocha, o único parâmetro que pode ser alterado durante o ciclo de brochamento é a velocidade de corte. Todos os outros parâmetros de corte dependem do projeto da brocha, fazendo com que a geometria da ferramenta seja de grande importância no processo de brochamento. A brocha tem um conceito único que une desbaste, semi-acabamento e acabamento em uma única ferramenta.

O processo de brochamento compete favoravelmente com outros processos como a furação, o fresamento, a conformação e o alargamento. Apesar da brocha tender a ser uma ferramenta de alto custo, esse custo é justificado pela alta produção que esse tipo de ferramenta consegue produzir (SCHNEIDER, 2001).

O processo de brochamento passa por uma evolução favorecida pelas novas possibilidades de máquinas e materiais. Novos desenvolvimentos de aços sinterizados têm proporcionado alta produtividade e aumento da vida da ferramenta e a utilização de revestimentos tem aumentado ainda mais a vida das ferramentas, elevando a produtividade com o emprego de velocidades de corte cada vez maiores.

Este trabalho tem como objetivo analisar o processo de brochamento na usinagem do aço DIN C45, utilizado na construção de cubo de embreagem. As variáveis de entrada foram: 2 tipos de substratos, o aço rápido convencional M2 e o aço rápido sinterizado e 3 tipos de revestimento, TiN, TiCN e AlCrN. As variáveis de saída foram: vida da ferramenta, variação dimensional da peça brochada, pressão de brochamento e desgaste da ferramenta.

Para atingir os objetivos propostos o presente trabalho está dividido da seguinte forma:

Capítulo 1 – Introdução.

Capítulo 2 – Brochamento: Neste capítulo é feita uma revisão sobre o processo de brochamento, brochas e forças de corte no brochamento.

Capítulo 3 – Mecanismos de desgaste: Neste capítulo é feita uma revisão sobre os mecanismos de desgaste em ferramentas de aço rápido.

Capítulo 4 – Materiais e revestimentos de ferramentas: Neste capítulo é feita uma revisão de literatura sobre os materiais e revestimentos de ferramentas, procurando-se concentrar nos materiais e revestimentos utilizados em brochas.

Capítulo 5 – Materiais, equipamentos e métodos experimentais: Neste capítulo apresenta-se os materiais, ferramentas, máquinas e equipamentos utilizados nos experimentos e o planejamento experimental.

Capítulo 6 – Resultados e discussões: Neste capítulo é feita à análise e a discussão dos resultados obtidos nos ensaios realizados.

Capítulo 7 – Conclusões e sugestões para trabalhos futuros.

Capítulo 2

Brochamento

2.1. Processo de brochamento.

A ferramenta usada é que primeiramente distingue o processo de brochamento dos outros processos de usinagem. A brocha combina desbaste, semi-acabamento e acabamento em uma única linha.

O brochamento produz peças com alta velocidade, removendo uma grande quantidade de sobremetal, usinando do desbaste ao acabamento em apenas um passe, permitindo a usinagem de formas simples ou complexas. O custo de operação é outra vantagem do brochamento pois, apesar de o custo inicial da ferramenta ser geralmente alto em comparação aos outros processos de usinagem, o custo final por peça é baixo devido à alta taxa de produção (DE MOTTER, 2006).

O processo de brochamento pode ser executado em equipamentos manuais, semi-automáticos ou automáticos e não necessitam de funcionários altamente qualificados, reduzindo os custos operacionais. O brochamento pode produzir canais com baixa taxa de remoção de material, podendo ser utilizado em operações de acabamento, produzindo superfícies lisas semelhante às obtidas por outros processos de usinagem (DE MOTTER, 2006).

Existem dois tipos básicos de brochamento, o de superfície externa e o de superfície interna. No brochamento de superfície externa a ferramenta é puxada ou empurrada através da peça ou a peça se move através da ferramenta. O brochamento interno requer um furo inicial para que a brocha seja inserida. A ferramenta pode ser puxada ou empurrada através do furo

inicial. Qualquer perfil irregular pode ser produzido se todas as superfícies da seção a serem brochadas ficarem paralelas ao percurso da brocha (SCHNEIDER, 2001).

2.1.1. Brocha

Uma brocha é uma longa e reta ferramenta com múltiplos dentes, cujo diâmetro externo do dente cresce gradual e continuamente do dente frontal ao dente final. Cada dente da brocha remove somente uma pequena porção de material e a profundidade de corte total é distribuída por todos os dentes da ferramenta. As principais partes de uma brocha são mostradas na figura 2.1

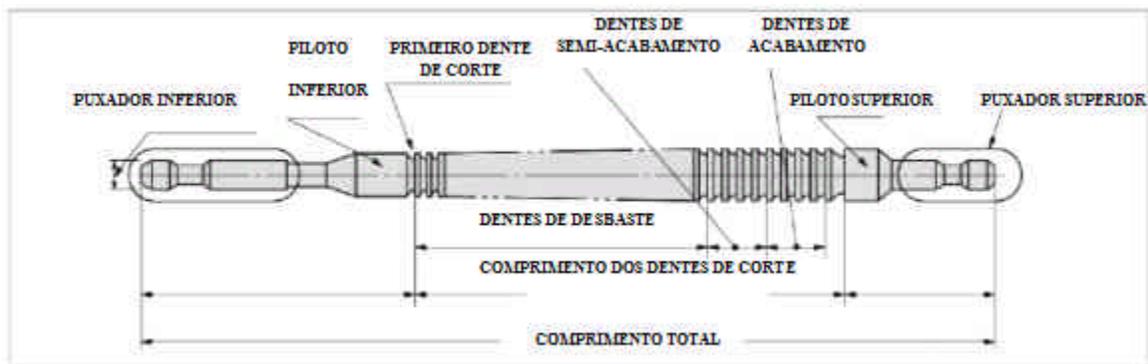


Figura 2.1: Brocha Cilíndrica Interna (HSS FORUM CONFERENCE, 2005).

Quando uma brocha interna de tração é usada, o puxador inferior e o piloto da brocha passam através do pré-furo da peça. Então o puxador inferior da brocha acopla no cabeçote de tração inferior da máquina brochadeira. O piloto inferior da brocha assegura o alinhamento da ferramenta com o pré-furo da peça e também tem a função de verificar a dimensão do pré-furo (SCHNEIDER, 2001).

O comprimento da brocha é determinado pela quantidade de sobremetal que deve ser removido e é limitada pelo curso da brochadeira (SCHNEIDER, 2001).

O piloto superior da brocha mantém a ferramenta alinhada até a passagem total da brocha pela peça. Em brochas cilíndricas o diâmetro do piloto superior é ligeiramente menor que o diâmetro dos últimos dentes de acabamento. (SCHNEIDER, 2001).

A nomenclatura e terminologia da brocha são mostrados na figura 2.2

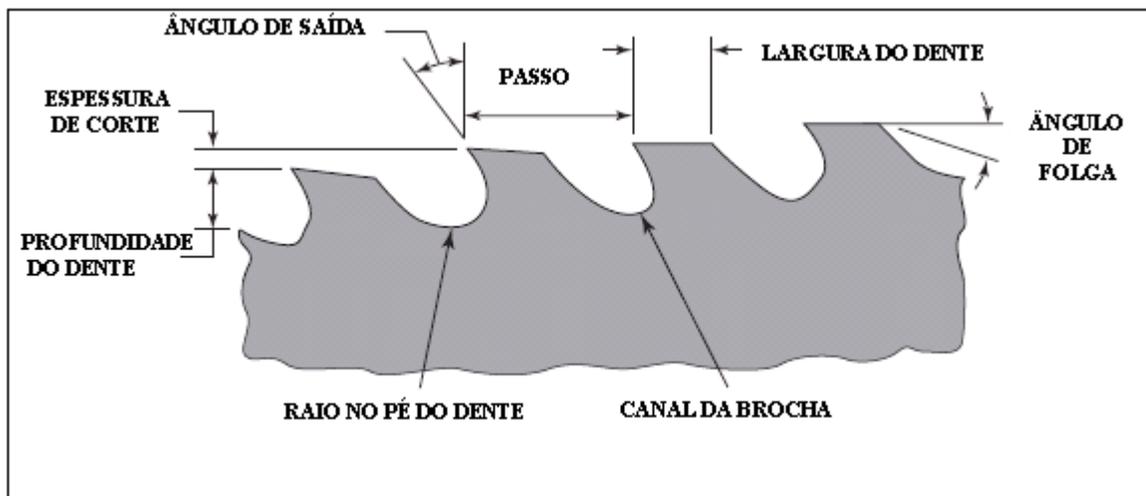


Figura 2.2: Nomenclatura e terminologia da brocha (SCHNEIDER, 2001).

Os dentes de corte da brocha são geralmente divididos em três seções ao longo da ferramenta: dentes de desbaste, dentes de semi-acabamento e dentes de acabamento. Os dentes de desbaste são os dentes com menores diâmetros da ferramenta. Os dentes subsequentes aumentam em diâmetro até o primeiro dente da seção dos dentes de acabamento. A diferença de tamanho dos dentes é geralmente maior na região de desbaste do que na região de semi-acabamento. Na região de acabamento todos os dentes são do mesmo tamanho (SCHNEIDER, 2001).

O ângulo de saída varia entre $0-20^\circ$ e é determinado pelo material da peça. Materiais frágeis como ferro fundido requerem ângulos de saída usualmente entre $5-10^\circ$. Algumas ligas de alumínio e aços laminados podem ter problemas de aderência de material da peça na brocha. Esse problema pode ser controlado com uma correta afiação, correto fluido de corte, ajustes da velocidade de corte, alterando a profundidade de corte do dente e a geometria da ferramenta (DE MOTTER, 2006).

A largura do dente suporta a tensão da aresta de corte. Sobre a largura do dente existe um ângulo de folga para redução do atrito. Os dentes de desbaste e semi-acabamento possuem esse ângulo de folga em todo o comprimento do dente. Já nos dentes de acabamento parte do comprimento logo após à aresta de corte é mantido com ângulo de folga igual a 0° para que a afiação não altere o tamanho da ferramenta. Essa fase plana varia de 0,2 à 0,7mm (SCHNEIDER, 2001).

A distância entre os dentes, ou passo, é determinada pelo comprimento de corte e pelo material da peça a ser brochada. Uma mudança no passo não tem efeito no perfil do dente, no volume do material a ser removido pelo dente, nem na força aplicada em cada dente. Porém, a força total do brochamento e a força do sistema diminuem com o aumento do passo. Isso é causado pela menor quantidade de dentes que cortam a peça simultaneamente. O volume disponível para o cavaco aumenta com o aumento do passo (OZTURK, 2003). Os dentes de desbaste devem ter um passo largo para acomodar o volume de cavaco gerado. Já nos dentes de acabamento, o passo deve ser o menor possível para reduzir o comprimento total da brocha, pois o comprimento da ferramenta influencia no tempo total do ciclo de usinagem. Para evitar que o cavaco obstrua o canal da brocha, o volume reservado ao cavaco deve ser 6 vezes maior que o volume do cavaco gerado. Preferencialmente o passo é calculado para que dois ou mais dentes cortem simultaneamente a peça, evitando flutuações da ferramenta e vibrações. O passo da brocha pode ser calculado conforme proposto pelo guia HSS do primeiro fórum internacional do HSS, conforme mostra a equação 2.1 (HSS FORUM, 2005):

$$P = 1,2 \text{ à } 2 L^{0,5} \quad (2.1)$$

P = Passo

L = comprimento brochado

Em peças com canais internos o comprimento brochado é obtido conforme a figura 2.3.

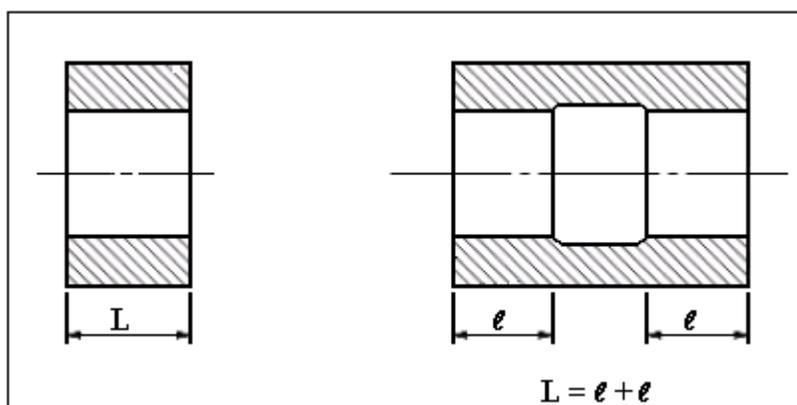


Figura 2.3: Obtenção do comprimento brochado (HSS FORUM, 2005).

A profundidade do canal para o alojamento do cavaco está relacionada com a profundidade de corte, passo dos dentes e material da peça. O raio na base do dente deve ser projetado para que o cavaco se enrole em forma de caracol, formando um cavaco com o menor diâmetro possível, ocupando menos área no canal da brocha (HSS FORUM, 2005). A figura 2.4 mostra como o cavaco ocupa o canal da brocha durante a operação de brochamento.

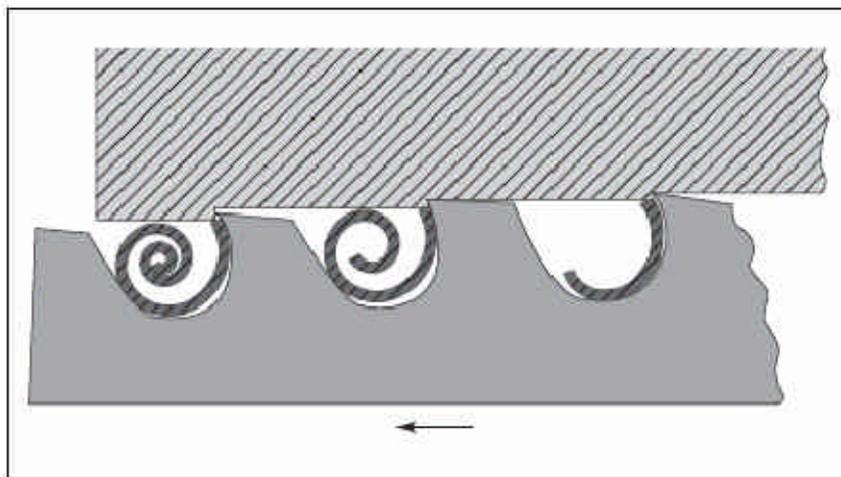


Figura 2.4: Preenchimento do canal da brocha pelo cavaco durante o brochamento (SCHNEIDER, 2001).

Os cavacos são itens indesejáveis e devem ser removidos do canal da brocha. Para facilitar a retirada do cavaco do canal da brocha foram desenvolvidas brochas com canais helicoidais, conforme figura 2.5.

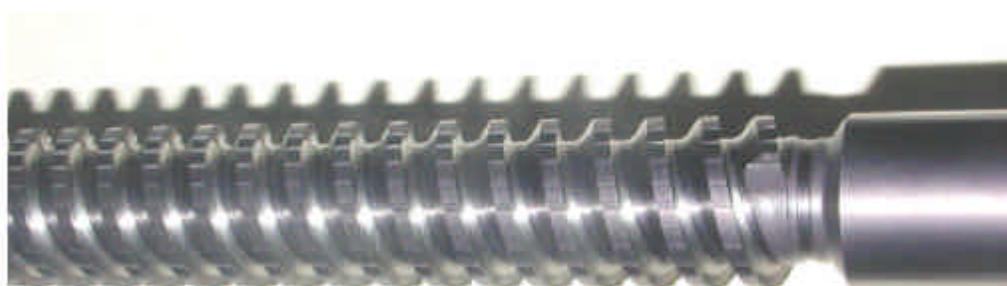


Figura 2.5: Brocha com canais helicoidais (HORI, 2005).

Quando uma brocha de canais helicoidais é usada, um cavaco completamente diferente é formado, que, como se fosse uma mola helicoidal, é facilmente descartado do canal da brocha. A figura 2.6 mostra cavacos gerados por brochas de canais convencionais e canais helicoidais.



a) Canais helicoidais



b) Canais convencionais

Figura 2.6: Cavacos gerados por brochas de canais convencionais e canais helicoidais (HORI, 2005).

Cada dente da brocha entra na peça a ser usinada e corta uma espessura fixa de material. O comprimento e a espessura fixa do cavaco produzido pelo brochamento criam uma carga de cavaco que é determinado pelo projeto da brocha e pela taxa de avanço. A carga e a taxa de avanço não podem ser alteradas pelo operador da máquina. Todo cavaco produzido deve ficar livre no canal da brocha conforme figura 2.4. O tamanho do canal é uma função da carga do cavaco e o tipo de cavaco produzido. Apesar da forma de cada cavaco depender do raio no pé do dente da brocha, os materiais frágeis produzem lascas e os materiais dúcteis ou maleáveis produzem cavaco em espiral (SCHNEIDER, 2001).

Canais chamados de quebra cavacos são usados em brochas para eliminar o empacotamento do cavaco, facilitando a remoção do cavaco do canal da brocha. A figura 2.7 mostra uma secção de brocha com quebra cavacos.



Figura 2.7: Quebra cavaco (HSS FORUM, 2005).

Os quebra cavacos são retificados nos dentes de desbaste e semi-acabamento, paralelos ao eixo da ferramenta, são construídos de forma que não exista um alinhamento dos canais, fazendo com que cada canal do quebra cavaco seja seguido de uma aresta cortante. Os quebra cavacos são vitais em brochas cilíndricas. Sem quebra cavacos, a brocha pode produzir cavacos em forma de anel que se prendem no canal da brocha e, eventualmente, poder causar a quebra da ferramenta (SCHNEIDER, 2001).

2.2 Tipos de brochas

Os dois principais tipos de brocha são as brochas de empurrar e as brochas de puxar ou tracionar. Uma segunda divisão é entre brochas internas e brochas externas.

Uma brocha de empurrar deve ser relativamente pequena, pois a ferramenta é uma coluna em compressão e pode “flambar” e quebrar sobre alta carga (SCHNEIDER, 2001). O brochamento com brochas de empurrar pode ser feito não somente em brochadeiras como também em centros de usinagem e tornos.

2.2.1 Brochas para tornos e centros de usinagem

Para pequenos lotes de peças que necessitam de rasgos de chaveta ou estrias não é economicamente viável o investimento em máquinas dedicadas e em ferramentas de alto custo, como é o caso das brochadeiras e brochas. Processos como a erosão elétrica ou química aumentam muito o custo da peça e geralmente são feito por empresas tercerizadas fora da empresa, interrompendo o fluxo de produção. Nesses casos o brochamento em tornos e centros de usinagem se apresenta como uma ótima opção, por ser mais barato que os processos de erosão e não possuir ferramentais de alto custo (HORN, 2006). As figuras 2.8 e 2.9 mostram uma ferramenta de brochamento para tornos e centros de usinagem.

Para a usinagem de rasgos de chavetas padronizados conforme norma DIN 138 ou 6885 a operação de brochamento pode ser executada em quase todos os tornos CNC. O brochamento de rasgos de chaveta não padronizados e que não exijam grande precisão dimensional, pode ser realizado sobrepondo os passes da ferramenta. Para o brochamento de rasgos precisos em eixos ou furos é necessário que o torno possua um eixo C no eixo árvore, para garantir a precisão

angular. No caso do brochamento em centros de furação ou centros de usinagem se faz necessário o travamento do fuso, para evitar a rotação da ferramenta durante o brochamento (HORN, 2006).

Para se obter rasgos de chaveta em furos não passantes, é necessário um canal de saída para a ferramenta no final do rasgo de chaveta. É também importante que no retorno da ferramenta, a mesma não toque no fundo do canal. Para isso deve-se afastar a ferramenta 0,7mm do fundo do canal ou até mesmo retirá-la do canal durante o retrocesso, evitando o atrito da ferramenta com a peça e permitindo a retirada do cavaco pelo líquido refrigerante (HORN, 2006).

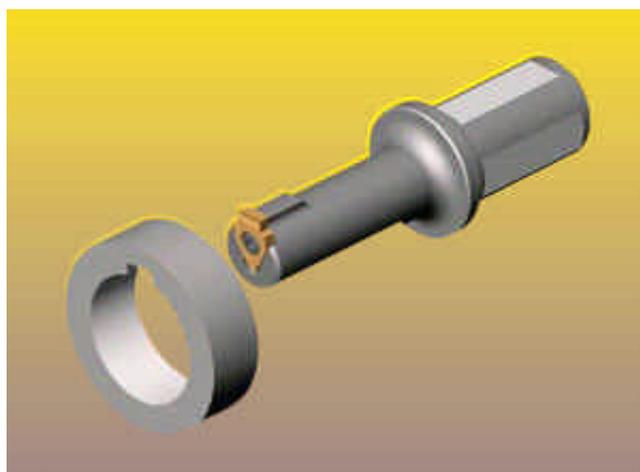


Figura 2.8: Ferramenta para brochamento em tornos e centros de usinagem.

Para evitar colisões da ferramenta com a peça deve-se atentar ao posicionamento da mesma no início do processo. Conforme a figura 2.9, para a usinagem de um rasgo de chaveta com largura de 10mm em um furo de 30mm de diâmetro, considerando uma segurança de 0,2mm da aresta de corte para a peça, a ferramenta deve ser posicionada em 13.95mm no eixo X da máquina (HORN, 2006).

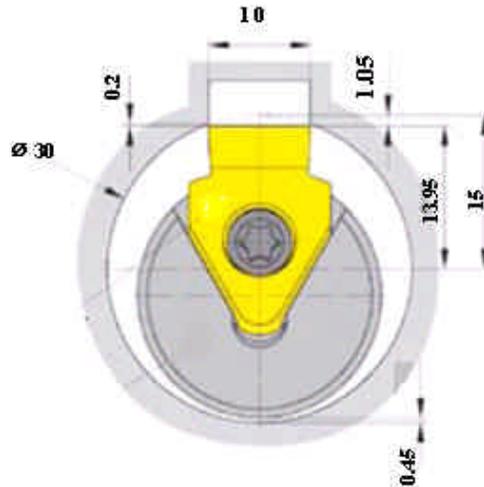


Figura 2.9: Posicionamento da ferramenta em relação a peça a ser brochada.

2.2.2 Brochas internas

Uma variedade de formas de furos podem ser brochadas, entre elas estão: furos quadrados, redondos, retangulares, octogonais, hexagonais e outras formas internas. Todas as formas a serem brochadas requerem um furo inicial para inserir a brocha (DE MOTTER, 2006). A figura 2.10 mostra uma variedade de formas que podem ser produzidas por brochas internas.

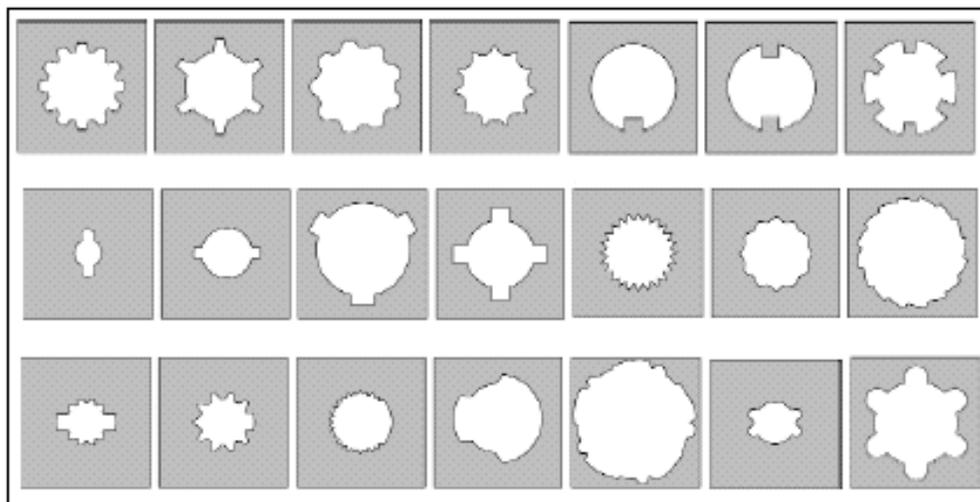


Figura 2.10: Formas produzidas por brochas internas (HSS FORUM, 2005).

A brocha utilizada para usinar rasgos de chaveta é uma estreita barra com dentes espaçados ao longo de sua superfície, conforme mostra a figura 2.11. Superfícies externas e

internas podem ser usinadas com esse tipo de brocha. Rasgos de chaveta internos necessitam de uma bucha ranhurada para alinhar o furo com a brocha, que é puxada através do furo guiado pelo rasgo (SCHNEIDER, 2001).



Figura 2.11: Brocha para rasgo de chaveta.

Brochas montadas são compostas por vários segmentos. A principal vantagem desse tipo de ferramenta é que seções desgastadas podem ser removidas, reafiadas ou substituídas com menor custo quando comparadas a brochas convencionais (SCHNEIDER, 2001). Outras vantagens das brochas montadas são: melhor precisão da peça brochada e a usinagem de formas complexas que não são possíveis de serem feitas com brochas sólidas. A figura 2.12 mostra um exemplo de um perfil de forma complexa, utilizado na construção de disco de turbina na indústria aeronáutica.. As brochas montadas possuem a desvantagem de terem um comprimento maior que as brochas sólidas (HSS FORUM, 2005). A figura 2.13 mostra uma brocha montada.

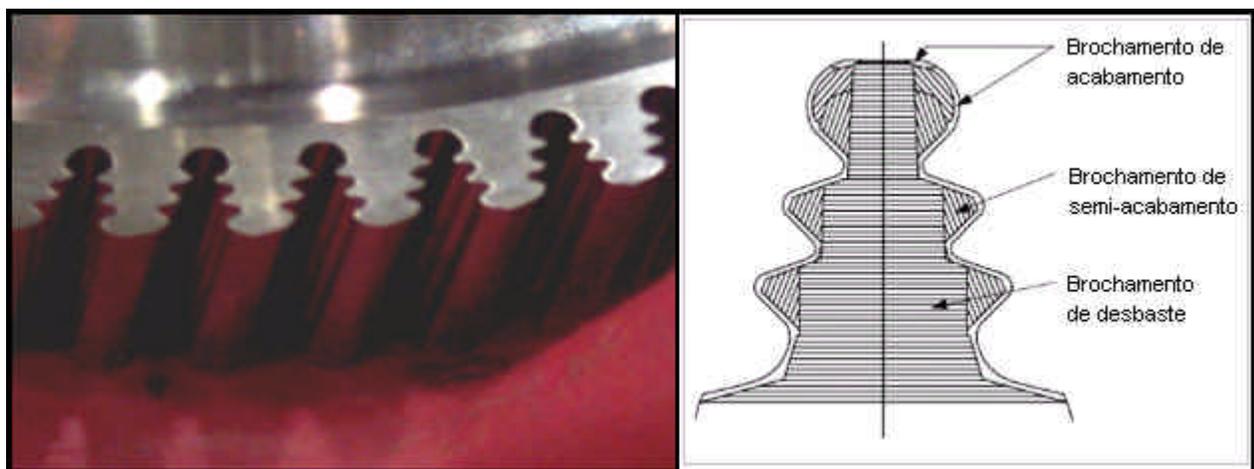


Figura 2.12: Perfil do disco de turbina utilizado na industria aeronáutica.

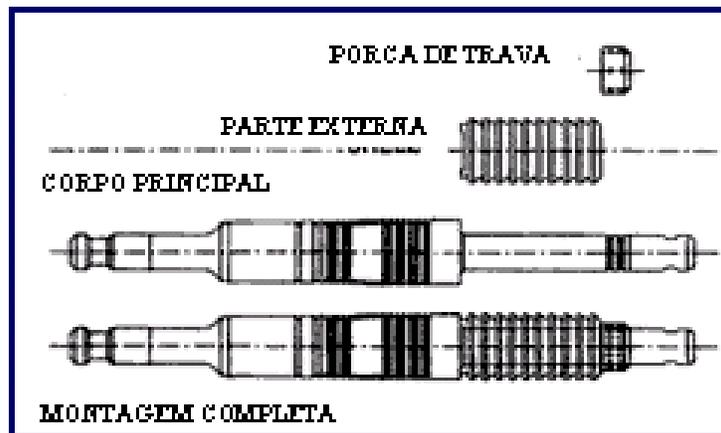


Figura 2.13: Brocha montada (MILLERBROACH).

Engrenagens internas podem ser produzidas por brochamento. Como é evidente na figura 2.14, para o brochamento de engrenagens internas, a brocha é puxada verticalmente através da peça para gerar os dentes da engrenagem. Adicionalmente para gerar a hélice da engrenagem, a brocha também é rotacionada. Para isso a brocha tem um desenho especial que coloca os diversos dentes seguindo a inclinação da hélice da engrenagem.

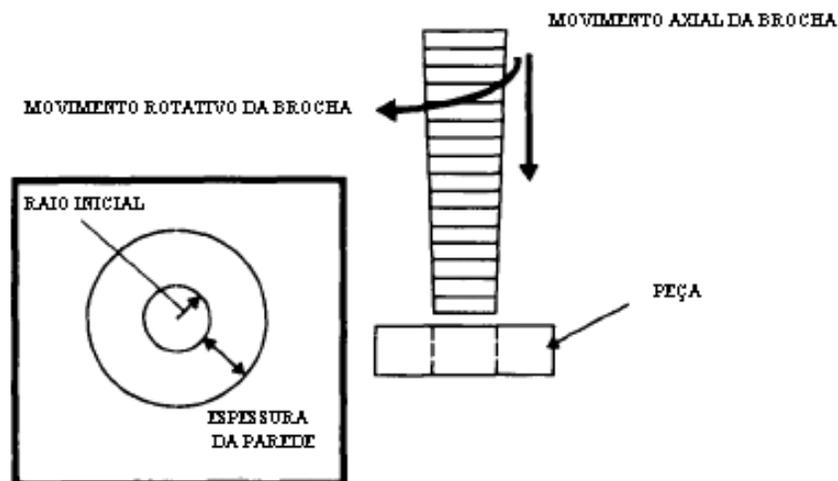


Figura 2.14: Processo de brochamento de engrenagem interna (SUTHERLAND, SALISBURY, HOGE, 1997).

O procedimento para se obter a geometria interna da engrenagem envolve o uso de três tipos de dentes de brocha, que são:

- Dentes de desbaste. Esse tipo de dente remove a maioria do material localizado entre os dentes da engrenagem a ser brochada. A geometria desse dente é em envolvente.
- Dentes de acabamento da crista da engrenagem. Esses dentes são responsáveis por gerar a forma final da crista do dente da engrenagem. Por essa razão são também responsáveis por gerar o diâmetro menor final da engrenagem
- Dentes de acabamento. Esses dentes são responsáveis para geral a forma final dos flancos dos dentes da engrenagem. A forma desses dentes também é baseada em uma geometria envolvente (SUTHERLAND, SALISBURY, HOGE, 1997).

Usinar perfis em peças com paredes finas pode ser um problema. Durante a operação, as paredes da peça se expandem com a passagem da brocha, retornando após a passagem da ferramenta, deixando um perfil incorreto na peça. Uma brocha de corte e recorte seria uma solução para o problema. Esses tipos de brochas possuem áreas de alívio após a seção frontal de corte. A frente da ferramenta corta o perfil seguido de uma seção de dentes de recorte que garantem a precisão dimensional da peça (DE MOTTER, 2006).

No brochamento por corte convencional, o perfil é formado por corte sucessivos, com incrementação de topo ou radial dente a dente. Na exigência de um perfil evolvente com maior precisão, a brocha pode ser construída de duas seções, a primeira de desbaste com corte convencional e a segunda com corte no perfil, de forma plena, com incrementação de perfil com os flancos retificados o que melhora a qualidade do perfil brochado (HURTH INFER, 2007). A figura 2.15 mostra o processo de corte desse tipo de brocha.

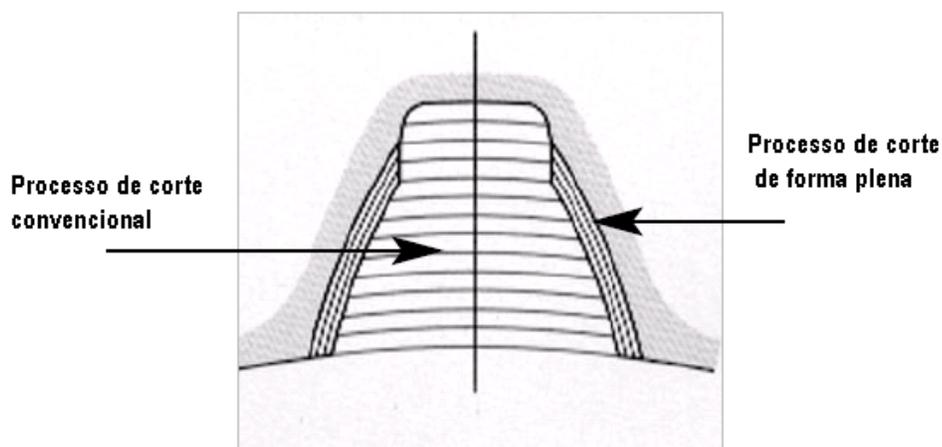


Figura 2.15: Processo de corte de brochas de duas seções.

2.2.3 Brochas externas

As brochas utilizadas para remover material de uma superfície externa são comumente conhecidas como brochas planas. Para usinar, tais brochas são passadas sobre a peça ou as peças são passadas pela ferramenta em uma máquina horizontal, vertical ou de corrente para produzir superfícies planas ou contornos. A figura 2.16 mostra uma brocha plana e a figura 2.17 mostra o esquema de uma brochadeira de corrente.

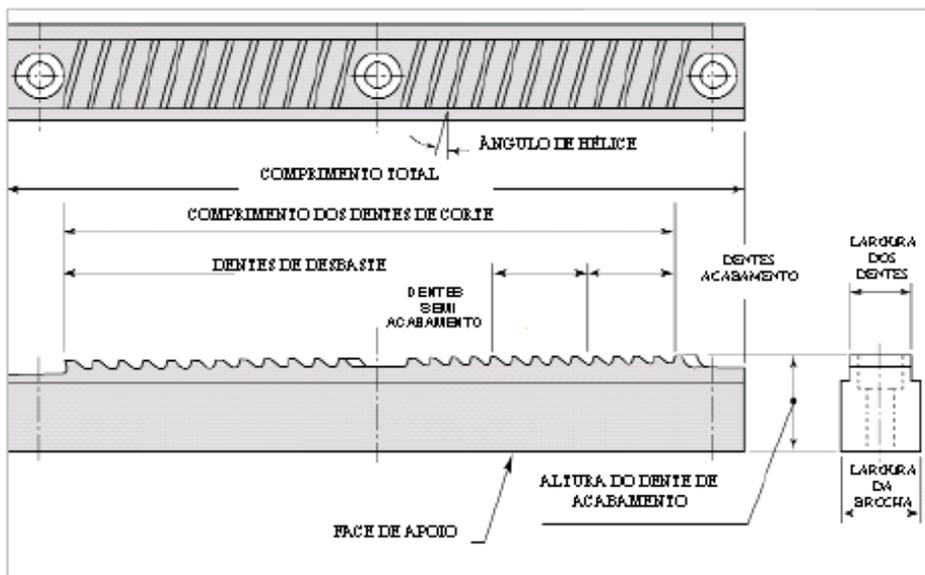


Figura 2.16: Brocha plana (HSS FORUM, 2005).

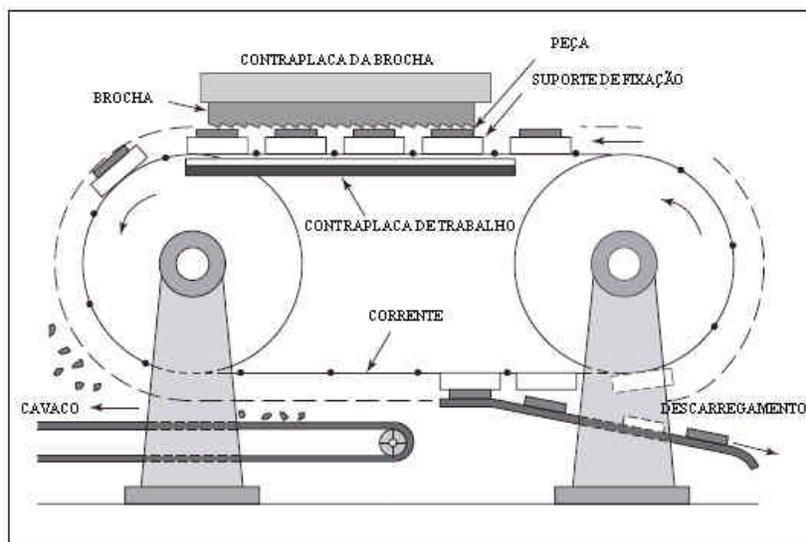


Figura 2.17: Esquema de uma Máquina de Brochar de Corrente.

Brochamento com insertos de metal duro são freqüentemente utilizados para usinar peças em ferro fundido. Este tipo de brocha é utilizada na usinagem de blocos de motores devido sua alta capacidade de remoção de cavaco, podendo reduzir o custo de produção em varias aplicações (SCHNEIDER, 2001).

Brochas planas são ferramentas simples utilizadas para produzir superfícies planas. Uma única brocha plana pode ser usada para produzir superfícies planas com diferentes larguras e profundidades, necessitando para isso pequenos ajustes na brocha, na fixação ou na máquina (SCHNEIDER, 2001).

Brochas para canais são ferramentas utilizadas para abrir canais em peças. Ao contrário das brochas para superfícies planas, as brochas de canais não são muito flexíveis em relação à aplicação. O ajuste da profundidade pode ser feito facilmente, porém a largura do rasgo é função da largura da brocha. Quando o volume de produção é alto, as brochas de canais são geralmente mais rápidas e mais econômicas que o processo de fresamento. No brochamento, dois ou mais canais podem, muitas vezes, serem usinados simultaneamente. A figura 2.18 mostra exemplos de peças usinadas com brochas externas.

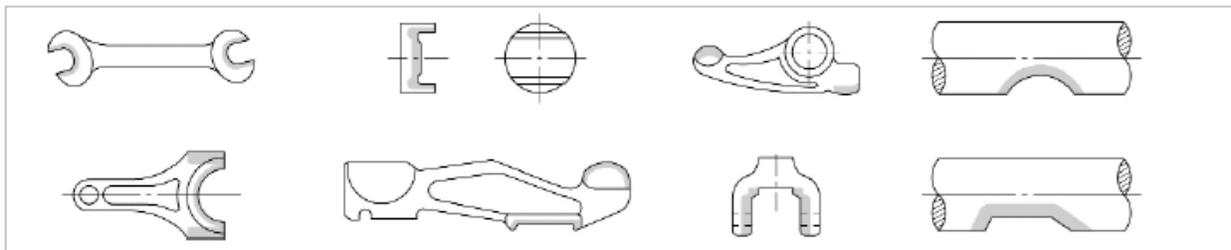


Figura 2.18: Peças usinadas com brochas externas (HSS FORUM, 2005).

2.3 Fluidos de corte no brochamento.

A boa refrigeração da peça durante o brochamento é fundamental para um melhor rendimento da ferramenta e pela boa qualidade do produto (HURTH INFER, 2005). A seguir tem-se algumas considerações a respeito de fluidos de corte no processo de brochamento.

- A refrigeração é essencial no brochamento. Reduzindo a temperatura em 50°C pode-se aumentar a vida da ferramenta em 50%. Uma lubrificação pobre pode até causar uma parada no processo de brochamento.
- O tipo de líquido refrigerante usado tem grande efeito no número de peças brochadas, precisão e eficiência do processo de brochamento.
- Líquido refrigerante com baixa lubricidade e durabilidade causam um desgaste rápido da brocha, gerando um acabamento superficial do perfil brochado inferior. Se a viscosidade for muito alta, cavacos ficam presos na brocha diminuindo a eficiência. Em geral alta viscosidade é recomendada mais para máquinas de brochamento horizontal do que máquinas verticais.
- Avançadas emulsões são muito usadas para melhorar a refrigeração no brochamento em alta velocidade de corte e para metais resistentes ao calor. O uso de emulsão é recomendado para evitar a necessidade de limpeza das peças e reduzir o perigo de incêndio (HSS FORUM, 2005).

Ótimos resultados podem ser alcançados com o uso da técnica de mínima quantidade de fluido, em que um volume mínimo de óleo é pulverizado em um fluxo de ar comprimido, junto com o uso de brochas de aço sinterizado com cobertura (HSS FORUM, 2005).

2.4 Forças de corte no brochamento.

Prever as forças durante a usinagem é muito importante para simular o processo de brochamento. É impossível calcular e simular outras importantes variáveis como a potência necessária, a tensão nos dentes da ferramenta, sem a informação da força de corte. A direção da força de corte depende da geometria da ferramenta e da direção de corte. No corte ortogonal a força é exercida em duas direções conforme mostra a figura 2.19. A primeira é a força de corte tangencial (F_t) em oposição à direção da ação de corte, a outra força é a força de avanço (F_f), a qual é paralela à direção de avanço que é radial. No corte oblíquo outra componente exerce força na ferramenta em uma terceira direção. Essa força é chamada de força radial de corte (F_r), (figura 2.20). Geralmente, no processo de brochamento a ferramenta é projetada para o corte ortogonal, pois para o corte oblíquo o projeto e a produção da brocha se tornam mais complexos, além de

aumentar o comprimento da ferramenta (OZTURK, 2003). A geometria de formação do cavaco pode ser vista na figura 2.21.

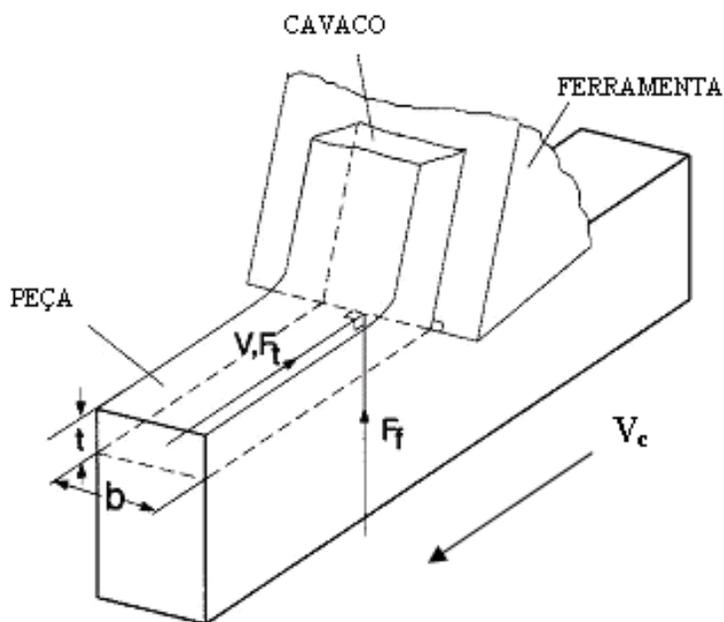


Figura 2.19: Forças de corte no corte ortogonal (OZTURK, 2003).

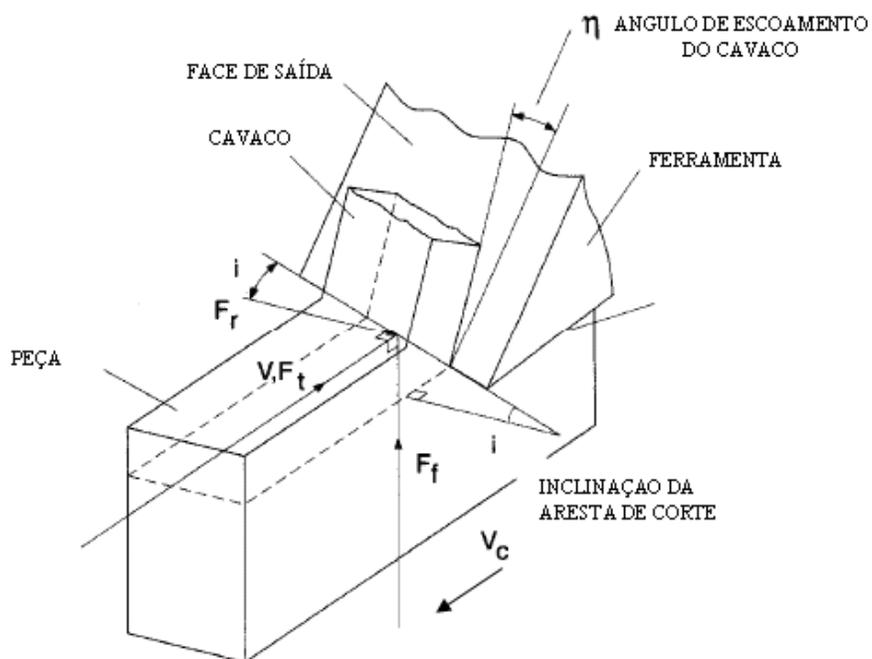


Figura 2.20: Forças de corte no corte oblíquo (OZTURK, 2003).

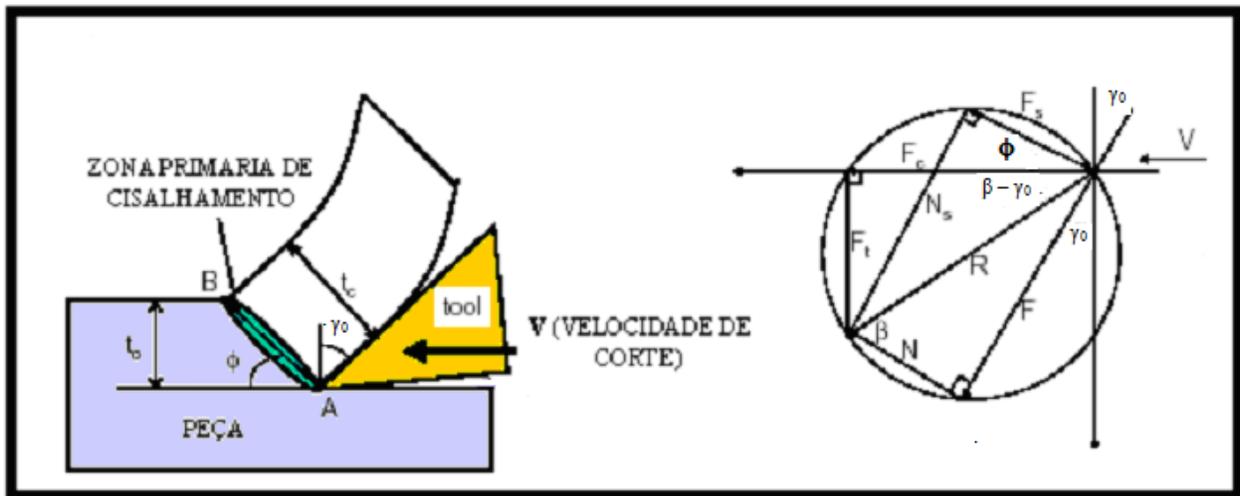


Figura 2.21: Geometria de formação cavaco.

De maneira geral, o cálculo da força em operações de usinagem está formulado conforme a equação 2.1. A força de corte pode ser calculada usando a área do material a ser usinada e o coeficiente da força de corte (K). A área de corte é calculada multiplicando a largura de corte (b) pela profundidade de corte (t). As dimensões b e t podem ser vistas na figura 2.19 (OZTURK, 2003).

$$F_j = K_j \cdot b \cdot t \quad (2.1)$$

Onde K é o coeficiente da força e j indica à direção da força (de corte ou de avanço)

O coeficiente de corte depende da combinação do material da peça e da ferramenta. Para diferentes combinações de material da peça e ferramenta a força de corte vai ser diferente.

A força de corte e a força de avanço podem ser calculadas usando as equações 2.1 desde que as pressões específicas de corte K_{tc} e K_{fc} sejam conhecidas. Essas pressões específicas podem ser conhecidas de forma experimental ou analiticamente calculadas conforme as equações 2.2 e 2.3.

$$K_t = \left[\tau_s \cdot \frac{\cos(\beta - \gamma_0)}{\sin(\phi) \cos(\phi + \beta - \gamma_0)} \right] \quad 2.2$$

$$K_f = \left[\tau_s \cdot \frac{\sin(\beta - \gamma_0)}{\sin(\phi) \cos(\phi + \beta - \gamma_0)} \right] \quad 2.3$$

Onde K_t e K_f são as pressões específicas de corte na direção de corte e avanço (normal) τ_s é a tensão de cisalhamento no plano de cisalhamento, ϕ é o ângulo de cisalhamento, β ângulo de fricção e γ_0 o ângulo de saída (OZTURK, 2003). O ângulo de cisalhamento pode ser calculado pelo princípio de mínima energia proposto por Merchant (1945), conforme mostra a equação (2.4).

$$\phi = \left[\frac{\pi}{4} - \frac{(\beta - \gamma_0)}{2} \right] \quad 2.4$$

O ângulo de saída depende da geometria da ferramenta sendo que o ângulo de fricção também depende da ferramenta e do material da peça usinada. O ângulo de fricção está geralmente entre 30° e 40°. O exemplo 2.0 mostra o cálculo de K_t e K_f para o material Waspaloy.

Geometria da ferramenta:

Ângulo de saída (γ_0) = 12°

Propriedades do material:

Tensão de cisalhamento (τ_s) = 1250 MPa

Ângulo de fricção (β) = 35°

Substituindo os valores na equação 2.4.

$$= \left[\frac{\pi}{4} - \frac{(\beta - \gamma_0)}{2} \right] = 45 - \frac{(35 - 12)}{2} = 33,5^\circ$$

Substituindo os valores do ângulo de saída (γ_0), Tensão de cisalhamento (τ_s), ângulo de fricção (β) e de ϕ nas equações 2.2 e 2.3 temos que:

$$K_t = \left[\tau_s \cdot \frac{\cos(\beta - \gamma)}{\sin(\alpha) \cos(\alpha + \beta - \gamma_0)} \right] = 1250 \cdot \frac{\cos(35 - 12)}{\sin(33.5) \cos(33.5 + 35 - 12)} = 3777 \text{ N/mm}^2$$

$$K_f = \left[\tau_s \cdot \frac{\sin(\beta - \gamma)}{\sin(\alpha) \cos(\alpha + \beta - \gamma_0)} \right] = 1250 \cdot \frac{\sin(35 - 12)}{\sin(33.5) \cos(33.5 + 35 - 12)} = 1603 \text{ N/mm}^2$$

Quando a força de avanço e a força tangencial são encontradas, a força total por dente pode ser encontrada facilmente com a equação (2.5).

$$F = \sqrt{F_t^2 + F_f^2} \quad (2.5)$$

Para calcular a força total do brochamento, deve-se multiplicar a força total por dente pela quantidade de dentes que estão em contato com a peça durante o brochamento.

Capítulo 3

Tipos e mecanismos de desgaste

3.1. Processo de corte.

Para entender os mecanismos de desgaste no corte de metais é necessário ter uma compreensão básica das severas condições de contato que ocorrem na interface ferramenta de corte / material de trabalho, conforme mostra a figura 3.1. O modelo adotado ilustra o corte ortogonal, mas se aplica a qualquer operação de corte, inclusive torneamento, fresamento, serramento, furação, rosqueamento, brochamento etc. Um perfil de temperatura característico é estabelecido por cisalhamento plástico do material de trabalho e do deslizamento deste contra o flanco e a superfície de saída da ferramenta. As principais fontes de calor estão localizadas na zona de cisalhamento primária no cavaco que está se formando e no contato de atrito entre o cavaco e a ferramenta (zona de cisalhamento secundária). Conseqüentemente, a temperatura mais elevada ocorre na superfície de saída a alguma distância da aresta de corte (HOGMARK, OLSSON, 2005).

Ilustrar as forças e as tensões mecânicas que atuam na aresta de corte da ferramenta em uma figura não é tão fácil, pois elas mudam consideravelmente com a operação e os parâmetros de corte. No corte intermitente, elas também podem mudar completamente da entrada até a saída, durante os contatos de cada aresta (HOGMARK, OLSSON, 2005).

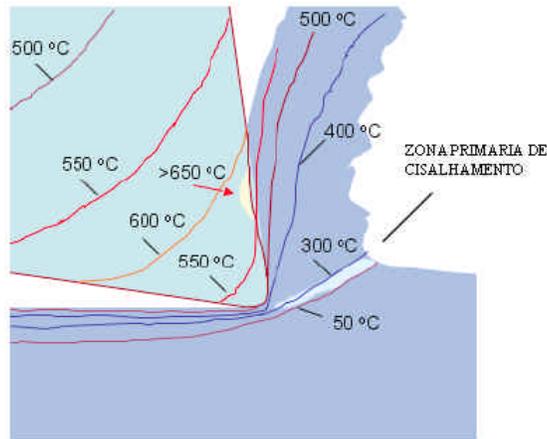


Figura 3.1: Distribuição de temperatura na ponta de uma ferramenta de HSS (HOGMARK, OLSSON, 2005).

Geralmente, a força de corte F está relacionada com a velocidade de corte e o avanço, conforme indicado na figura 3.2. Também se nota que um revestimento de ferramenta com baixo atrito pode diminuir a força de corte e, assim, gerar uma temperatura mais baixa na aresta de corte, o que pode ser utilizado para aumentar a produtividade (HOGMARK, OLSSON, 2005).

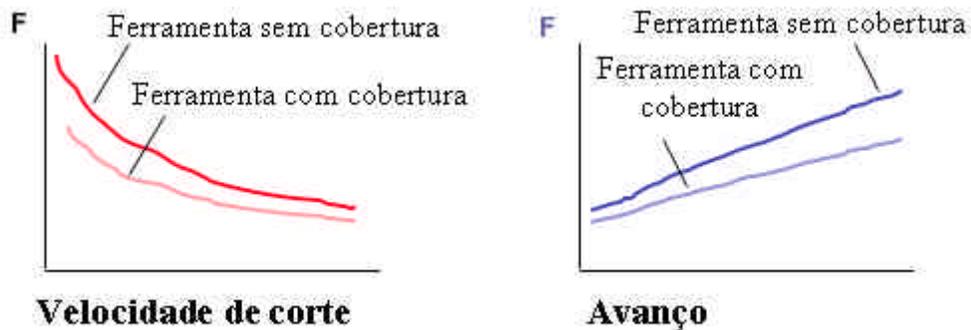


Figura 3.2: Força de corte x velocidade de corte e avanço (HOGMARK, OLSSON, 2005).

Com base no tipo de mecanismo de falha, sabe-se que as ferramentas de aço rápido são utilizadas próximas aos seus limites de resistência e fratura. Como a aresta de corte está forçando seu caminho pelo interior da peça, como uma cunha em propagação, ambas as superfícies da “trinca” aberta representam um metal muito reativo quimicamente. O fato de não haver acesso ao oxigênio externo ou a fluidos de corte nessa região significa que não há formação de filmes de óxido ou qualquer outra camada intermediária protetora. Conseqüentemente, a aresta de corte da ferramenta também é exposta a condições extremamente severas (HOGMARK, OLSSON, 2005).

3.2. Mecanismos de desgaste.

Utilizando o modelo de corte ortogonal, as características gerais do desgaste em uma ferramenta de corte de aço rápido são esquematicamente ilustradas na figura 3.3. Primeiramente dependendo da operação de usinagem, parâmetros de corte, material da peça a ser usinada e material da ferramenta, o desempenho da ferramenta é limitado pelo desgaste da ponta, desgaste de cratera, lascamento da aresta, desgaste de flanco ou uma combinação desses. O desgaste ocorre gradualmente por abrasão, difusão ou adesão, através da deformação plástica, ou através de pequenas perdas de material por discretos mecanismos de fratura, ou pela combinação deles (HOGMARK, OLSSON, 2005).

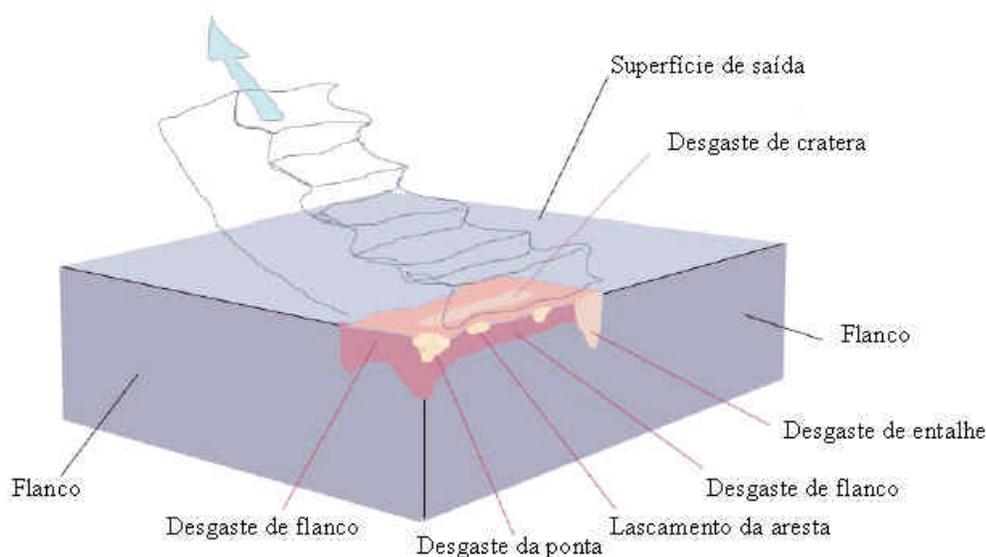


Figura 3.3: Mecanismos desgastes em ferramenta de corte de aço rápido (HOGMARK, OLSSON, 2005).

3.2.1. Desgaste abrasivo

O desgaste abrasivo domina o desgaste de flanco ou de cratera da aresta da ferramenta de aço rápido. Os sulcos na superfície da ferramenta, conforme mostra a figura 3.4, é uma combinação da ação de riscamento das partículas duras no material da peça com a proteção contra riscamento oferecida pelas fases de têmpera no material da ferramenta (HOGMARK, OLSSON, 2005). As setas da figura 3.4 apontam para saliências do aço rápido relativamente resistentes à abrasão. Também há evidência de fratura das arestas.

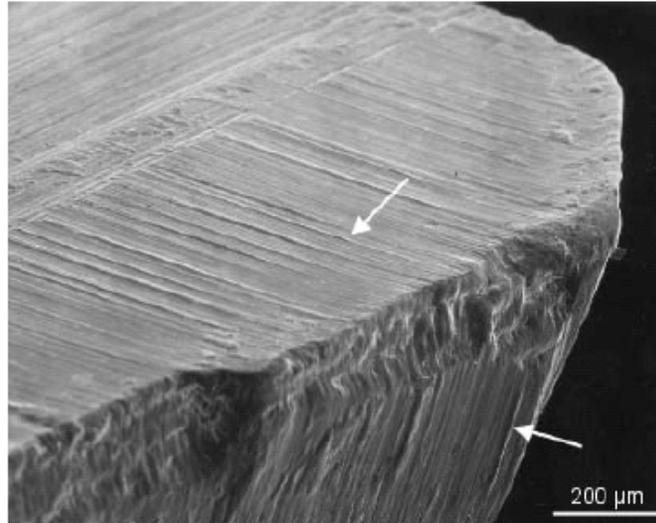


Figura 3.4: Desgaste abrasivo (HOGMARK, OLSSON, 2005).

O desgaste abrasivo envolve a perda de material da ferramenta causada pela presença de partículas mais duras que a ferramenta na peça. Estas partículas podem estar contidas na material da peça em formas de carbonetos e/ou nitretos. Normalmente, este tipo de desgaste se apresenta em forma de riscos paralelos à direção de corte, na superfície de folga e sobre a superfície de saída, na direção de escoamento dos cavacos (TRENT, 2000).

3.2.2. Desgaste por aderência e arraste

Quando se observa o mecanismo de desgaste no dente de uma fresa de aço rápido conforme mostra a figura 3.5a, inicialmente pode-se considerar que o mecanismo de desgaste é a abrasão. Porém uma ampliação maior, figura 3.5b, revela que o desgaste é uma combinação de desgaste por abrasão e desgaste por aderência (HOGMARK, OLSSON, 2005).

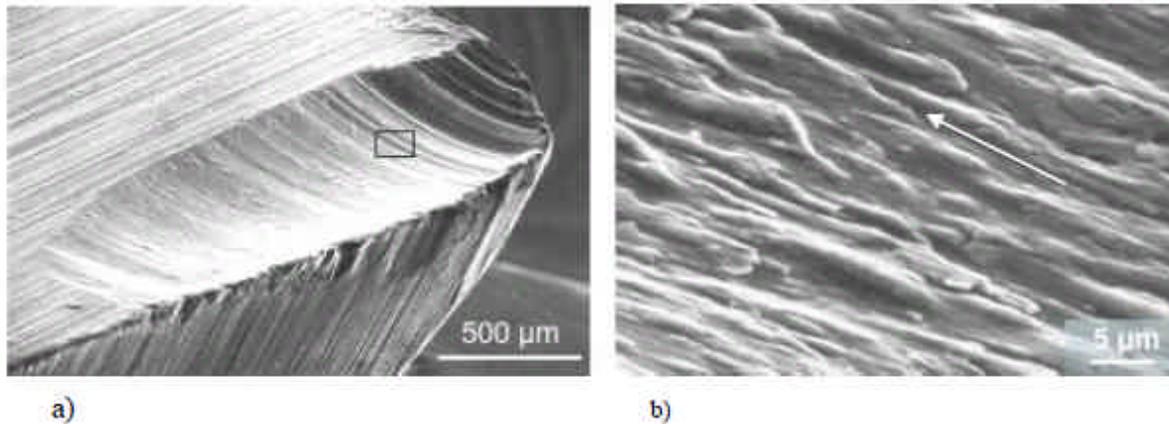


Figura 3.5: Desgaste por adesão em uma ferramenta de fresamento de aço rápido (HOGMARK, OLSSON, 2005).

Esse mecanismo de desgaste geralmente ocorre em baixas velocidades de corte, nas quais não existe deformação plástica ou difusão. Nesta situação, o fluxo de material sobre a superfície de saída da ferramenta se torna irregular. Além disso, a aresta postiça de corte também pode aparecer e, se ela for instável, o contato com a ferramenta se torna menos contínuo. Sob estas condições ocorre aderência de material do cavaco sobre a ferramenta e, quando este material é removido, fragmentos microscópicos são arrancados da superfície da ferramenta e arrastados junto ao fluxo de material adjacente à interface. Estes fragmentos, desgastam por abrasão as porções da ferramenta sobre as quais eles se arrastam (TRENT, 2000). Diniz, Marcondes e Coppini (2001) afirmam que a utilização adequada do fluido de corte e o revestimento de ferramentas com materiais de baixo coeficiente de atrito, como o nitreto de titânio, podem ajudar a reduzir este tipo de desgaste.

Em operações de corte contínuo, utilizando ferramentas de aço rápido, o mecanismo de aderência e arraste é usualmente uma forma lenta de desgaste e sua tendência é desaparecer em altas velocidades de corte, assim que o fluxo se torne laminar. No entanto, em operações em que há corte interrompido ou falta de rigidez da máquina-ferramenta, pode acontecer uma rápida deterioração da ferramenta. Importante destacar que o mecanismo de aderência e arraste é independente da temperatura (TRENT, 2000).

3.2.3. Desgaste por deformação plástica

Trent (2000) considera que a deformação plástica da aresta de corte não é propriamente um mecanismo de desgaste, uma vez que não existe perda do material da ferramenta. No entanto, a combinação de altas tensões de compressão, com altas temperaturas na superfície de saída, pode acelerar o processo de desgaste e reduzir a vida da ferramenta. A deformação plástica não é uniforme ao longo da aresta de corte e, freqüentemente, inicia-se no raio de ponta da ferramenta. Uma falha repentina iniciada por deformação plástica pode ser de difícil distinção em materiais que sofreram fratura frágil devido a sua baixa tenacidade. As ferramentas de corte são mais propensas a este tipo de desgaste quando a dureza do material da peça é alta e quando for este o fator limitante para a usinagem com ferramentas de aço rápido. A figura 3.6 mostra a deformação plástica sofrida na aresta cortante de uma ferramenta de aço rápido.

Outra forma de deformação plástica é a causada por cisalhamento em altas temperaturas e ocorre na superfície de saída da ferramenta. Na usinagem do aço e outros materiais com alto ponto de fusão, em altas velocidades de corte e altas taxas de avanço, é formada uma cratera próxima a aresta de corte. A formação da cratera se dá na região mais quente da superfície de saída e consiste de material da ferramenta cisalhado e empurrado em sentido contrário ao movimento do cavaco. Ensaio na usinagem do aço carbono, com ferramentas de aço rápido e $V_c = 183 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$ no intervalo de 30s, revelaram que o cavaco foi fortemente aderido à superfície da saída. Além disso, na sua análise metalográfica foi possível observar que a tensão requerida para cisalhar o material da peça na zona de fluxo, para uma taxa de deformação da ordem de 10^4 s^{-1} , é suficiente para provocar o cisalhamento do material da ferramenta que está em alta temperatura (TRENT, 2000).

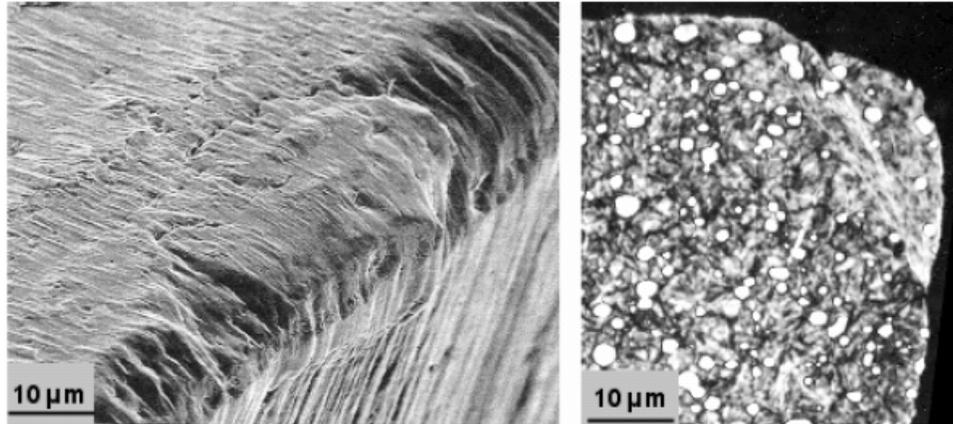


Figura 3.6: Deformação plástica em uma ferramenta de aço rápido (HOGMARK, OLSSON, 2005).

3.2.4. Desgaste difusivo

Este mecanismo envolve a transferência de átomos de um material para outro. As taxas de difusão aumentam rapidamente com a temperatura, praticamente dobrando com um incremento da ordem de 20°C. Existem fortes evidências de que o desgaste difusivo ocorre principalmente na zona de aderência, região localizada na superfície de saída, na usinagem de aços ou ligas com alto ponto de fusão em altas velocidades de corte. O desgaste difusivo é similar a um ataque químico sobre a superfície de saída da ferramenta. Por exemplo, a difusão de partículas de carboneto contidas em ferramentas de aço rápido, na usinagem do aço carbono, é pequena devido a sua baixa solubilidade. Entretanto, os átomos de ferro da ferramenta possuem grande facilidade de se transferirem para o material da peça ou do cavaco, o que diminui a dureza da ferramenta e facilita o desgaste abrasivo. A taxa do desgaste difusivo é muito dependente das interações metalúrgicas entre o material da ferramenta e da peça. Em baixas velocidades de corte e em ferramentas de aço rápido é relativamente pequena por causa das baixas temperaturas. Já nas altas velocidades, a taxa de desgaste é maior em razão das maiores temperaturas, mas nesse caso, a deformação plástica pode tornar-se preponderante.



Figura 3.7: Secção da superfície de saída de uma ferramenta de aço rápido após usinar um aço inoxidável austenítico (TRENT, 2000).

A figura 3.7 mostra a secção da superfície de saída de uma ferramenta de aço rápido com uma camada de material da peça (aço) aderido. Nessa posição, próximo onde o cavaco deixa a ferramenta, a temperatura era de aproximadamente 750° durante o corte. A difusão de elementos de liga da ferramenta na zona de fluxo causou modificações estruturais, que se mostra como um fluxo de partículas escuras, muito pequenas para ser identificada por microscópio ótico. Essas partículas são carregadas da ferramenta pelo fluxo de cavaco, da esquerda para a direita da figura (TRENT, 2000).

3.2.5. Fadiga e fratura

Grandes fraturas podem ocorrer, porém não é um evento comum de acontecer em ferramentas de aço-rápido. É mais comum ocorrer lascamentos na aresta de corte da ferramenta conforme mostram as figuras 3.8a e 3.9b. Nota-se que o lascamento parece ter se iniciado pelas marcas de retificação paralelas à aresta de corte (HOGMARK, OLSSON, 2005).

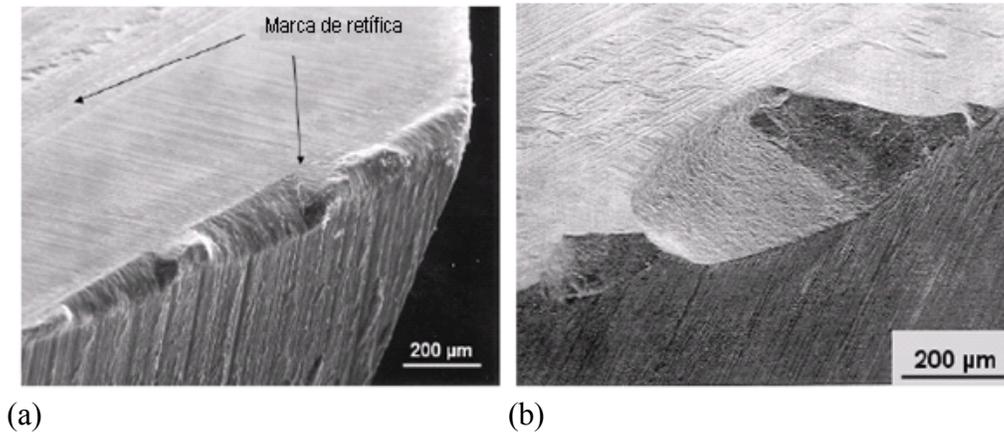


Figura 3.8: Lascamento da aresta de corte em uma fresa caracol (HOGMARK, OLSSON, 2005).

3.2.6. Tipos de desgastes em brochas

Os desgastes mais comuns de ocorrerem em brochas são os desgaste de flanco, desgaste de cratera e desgaste por deformação plástica. A tabela 3.1 mostra algumas características dos desgastes mais comuns em brochas e algumas ações para evitar ou minimizar o problema de desgaste (HSS FORUM, 2005).

Tabela 3.1: Características de desgastes de brochas.

| Desgaste de flanco | Desgaste de cratera | Deformação plástica |
|---|---|---|
| Modelo normal de desgaste | Deve ser limitado | Deve ser evitado |
| Reduza a velocidade de corte (Vc) | Reduza a velocidade de corte (Vc) | Reduza a velocidade de corte (Vc) |
| Utilize brochas de aço rápido sinterizado com cobertura | Use brocha com cobertura para evitar o desgaste químico | Aumente o fluxo de líquido refrigerante |
| Aumente o fluxo de líquido refrigerante | Checar o líquido refrigerante | Use brocha com cobertura |

Os cuidados com a limpeza da ferramenta durante o uso e no armazenamento são essenciais para a o aumento da vida útil da ferramenta. Por isso recomenda-se a utilização de escovas com cerdas de nylon na limpeza da ferramenta por mecanismos basculantes. Dessa forma a limpeza se realizará no sentido das costas dos dentes para frente. A figura 3.9 apresenta um exemplo de ferramenta utilizada sem a devida limpeza. Isso ocasionou o lascamento e desgaste prematuro dos dentes (HURTH INFER, 2005)

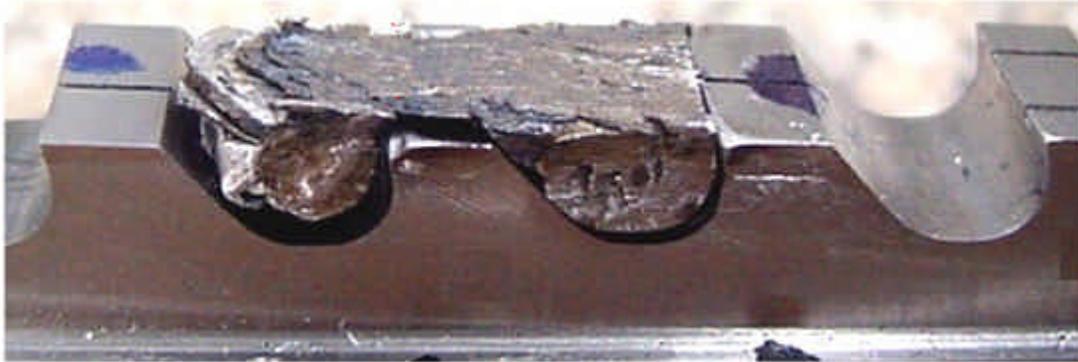


Figura 3.9:Dente lascada devido acumulo de cavaco – falta de limpeza.

Capítulo 4

Materiais e Revestimentos de Ferramentas

4.1. Cobertura de ferramentas

Na década de 60, o desenvolvimento dos processos de deposição química a vapor (CVD) e, mais adiante, a deposição física a vapor (PVD), disponibilizou comercialmente a cobertura de ferramentas de aço rápido com finas camadas de carbonetos ou nitretos metálicos. As camadas CVD em ferramentas de aço rápido são usualmente menores que 10 μ m de espessura. Equipamentos especiais são necessários para fazer a deposição a uma temperatura entre 850-1050°C com uma atmosfera de hidrogênio em uma câmara selada. Átomos de metal (Ex. Titânio) e não metal (Ex. Carbono ou nitrogênio) são introduzidos na atmosfera de gases compostos. Grãos muito finos de carbonetos ou nitretos metálicos são depositados e aderem fortemente na superfície da ferramenta (TRENT, 2000).

Devido à alta temperatura requerida pelo processo CVD, as ferramentas de aço rápido devem receber o tratamento térmico de tempera após a cobertura e devem ser tomados cuidados especiais para preservar intacta a fina camada de cobertura. O sistema de tratamento térmico a vácuo é usualmente empregado para aumentar a dureza da ferramenta. Esse tratamento pode alterar a precisão de forma das ferramentas, principalmente em formas grandes e complexas, e não pode-se fazer correções sem remover a cobertura. Para evitar esse tipo de problema o processo PVD é usualmente empregado em coberturas para aços rápidos. A temperatura nesse processo é menor, entre 400-600°C. Temperaturas baixas são possíveis devido aos átomos da cobertura serem ionizados e atraídos para a superfície da ferramenta, a qual está com potencial

negativo. Por causa das baixas temperaturas do processo PVD, o tratamento térmico da ferramenta pode ser feito antes do processo de cobertura (TRENT, 2000).

O processo PVD é feito sob alto vácuo a temperaturas que variam na ordem de 150° e 500°C. O material de revestimento sólido de alta pureza (metais como titânio, cromo e alumínio) pode ser evaporado pelo calor ou então bombardeado com íons (pulverização catódica) Ao mesmo tempo, é introduzido um gás reativo (por exemplo, nitrogênio ou um gás que contenha carbono), formando um composto com o vapor metálico que se deposita nas ferramentas ou nos componentes na forma de um revestimento fino e altamente aderente. Para atingir uma espessura de revestimento uniforme, as peças devem girar várias vezes a uma velocidade constante (OERLIKON, BALZERS, 2007).

As propriedades do revestimento (como dureza, estrutura, resistência química e resistência à temperatura, aderência) podem ser desta forma controladas com rigor. Os processos PVD contemplam evaporação por arco voltaico, pulverização catódica, galvanização iônica e pulverização iônica incrementada (OERLIKON, BALZERS, 2007).

4.1.1. Tipos de revestimentos

Os revestimentos separam a ferramenta do material da peça durante a usinagem e oferecem a possibilidade de substituir o fluido refrigerante. O substrato é responsável pela forma, resistência mecânica e rigidez da ferramenta. O papel da interface é garantir uma boa adesão do revestimento com o substrato. A adesão do revestimento depende das características químicas do substrato e das tensões térmicas na interface. Do revestimento se espera a redução do atrito para diminuir a quantidade de calor dissipada pela ferramenta, proteção térmica, proteção contra a difusão e resistência ao desgaste em altas temperaturas. Na superfície do revestimento não devem ocorrer interações mecânicas, químicas ou de tribologia com o material da peça (TÖNSHOFF, 1997). Em resumo, o máximo benefício do revestimento será atingido pela combinação de uma alta adesão aliada a uma alta dureza do revestimento, uma ótima acomodação da expansão térmica entre o revestimento e o substrato, a presença de uma interface dúctil entre o revestimento e o substrato, a presença de uma favorável tensão residual compressiva no substrato para resistir a propagação de trincas (MILLS, 1996) e também uma ótima estabilidade química com o material da peça e do cavaco.

A empresa Oerlikon Balzer do Brasil recomenda 3 tipos de coberturas para as operações de brochamento, quais sejam:

- Nitreto de titânio (TiN) . É denominado pela empresa Oerlikon Balzers como Balinit® “A”
- Carbonitreto de titânio multicamada gradual (TiCN): Revestimento com elevada dureza e boa tenacidade, resistente à abrasão, utilizado nas ferramentas sob alto carregamento mecânico. É denominado pela empresa Oerlikon Balzers como Balinit® “B” .
- Nitreto de cromo alumínio (AlCrN). Revestimento com altíssima resistência à abrasão e a temperaturas elevadas e constantes, alta resistência à oxidação. Revestimento livre de titânio. É denominado pela empresa Oerlikon Balzers como Balinit® Alcrona.

Os revestimentos, independentemente de como são classificados pelos diversos fabricantes, possuem propriedades similares. Portanto, a tabela 4.1, conforme o catálogo da empresa Oerlikon Balzers do Brasil (2007), mostra as características de alguns tipos de revestimentos.

Tabela 4.1: Características dos revestimentos.

| Nome do produto | Material do revestimento | Microdureza HV ⁴ | Coefficiente de atrito contra o aço (a seco) ⁴ | Tensão Interna (Gpa) ⁴ | Máxima temperatura de aplicação (°C) ⁴ | Cor do revestimento | Estrutura do revestimento |
|----------------------|--------------------------|-----------------------------|---|-----------------------------------|---|---------------------|---------------------------|
| BALINIT® A | TiN | 2300 | 0,4 | -2,5 | 600 | dourado | Monocamada |
| BALINIT® ALCRONA | AlCrN | 3200 | 0,35 | -3 | 1100 | azul-acinzentado | Monocamada |
| BALINIT® ALDURA | AlCr - based | 3300 | 0,35 - 0,40 | -3 | 1100 | azul-acinzentado | multilayer, dual |
| BALINIT® B | TiCN | 3000 | 0,4 | -4,0 | 400 | azul-acinzentado | multicamada, gradual |
| BALINIT® C | WC/C | 1000 / 2000 | 0,10 - 0,20 | -1,0 | 300 | preto acinzentado | lamelar |
| BALINIT® D | CrN | 1750 | 0,5 | -1,5 / -2,0 | 700 | cinza prata | Monocamada |
| BALINIT® DIAMOND | diamante policristalino | 8000 - 10000 | 0,15 - 0,20 | | 600 | cinza claro | Monocamada |
| BALINIT® FUTURA NANO | TiAlN | 3300 | 0,30 - 0,35 | -1,3 / -1,5 | 900 | cinza violeta | nanoestruturado |
| BALINIT® FUTURA TOP | TiAlN | 3300 | 0,25 | -1,3 / -1,5 | 900 | cinza violeta | nanoestruturado |
| BALINIT® G | TiCN + TiN | 3000 | 0,4 | -4,0 | 400 | dourado | multicamada, gradual |
| BALINIT® HARDLUBE | TiAlN + WC/C | 3000 | 0,15 - 0,20 | -1,7 / -2,0 | 800 | cinza escuro | multicamada, lamelar |
| BALINIT® HELICA | AlCr - based | 3000 | 0,25 | -3,0 | 1100 | copper | Multilayer |
| BALINIT® TRITON | DLC (a-C:H) | 2500 | 0,1 - 0,2 | | 350 | preto acinzentado | Monocamada |
| BALINIT® X.CEED | TiAlN | 3300 | 0,4 | -3,0 / -3,5 | 900 | azul-acinzentado | Monocamada |

4.1.2. Revestimentos nanoestruturados

Os revestimentos convencionais são depositados em monocamadas, monocamadas com camadas de adesão (geralmente TiN) para aumentar a aderência da camada com o substrato, em gradientes, com continua mudança de composição do substrato até à superfície e em multicamadas. A figura 4.1 mostra as estruturas de camadas convencionais.

Nas coberturas nanoestruturadas as três importantes estruturas são depositadas como:

- Nanogradientes (com mudança contínua da composição da camada do substrato até a superfície da camada)
- Nanocamadas (com espessuras de subcamadas na ordem de 3-10nm)
- Nanocompósitos (grãos nanocristalinos são embutidos em uma matriz amorfa)



Figura 4.1: Estrutura de camadas convencionais (CSELLE, 2003).

As diferentes estruturas podem ser combinadas em uma única camada conforme a necessidade da aplicação (CSELLE, 2003). A figura 4.2 mostra a estrutura de camadas nanoestruturadas.

Coberturas com nanogradientes usualmente começam com uma camada de adesão, na maioria das vezes TiN e vão mudando suas estruturas para uma composição com alta dureza e resistência ao desgaste (CSELLE, 2003).

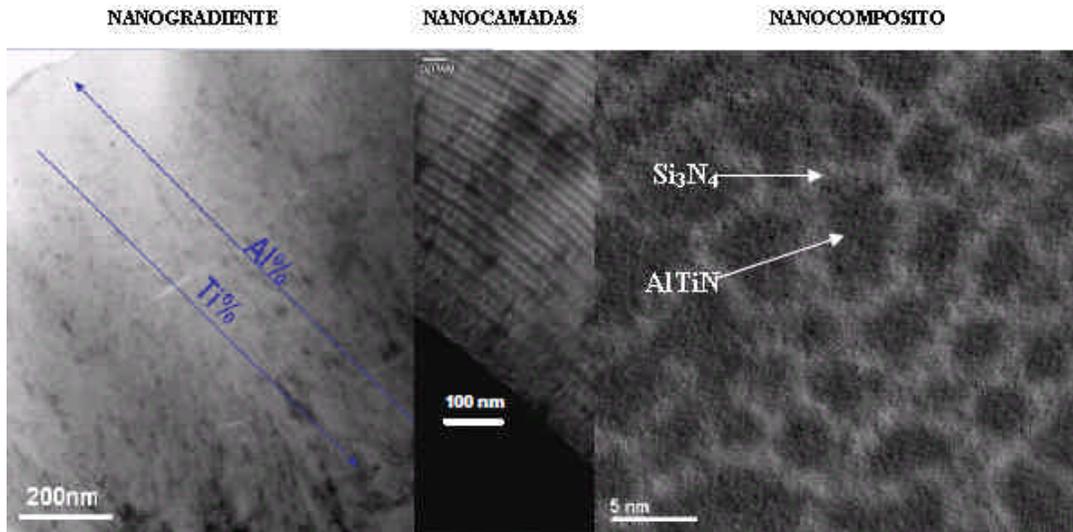


Figura 4.2: Estrutura de camadas nanoestruturadas.

As coberturas nanocamadas surgiram de um refinamento da técnica de multicamadas. Revestimentos com diferentes espessuras de nanocamadas apresentam durezas de camadas diferentes. A figura 4.3 mostra a variação da nanodureza em relação à espessura da nanocamada.

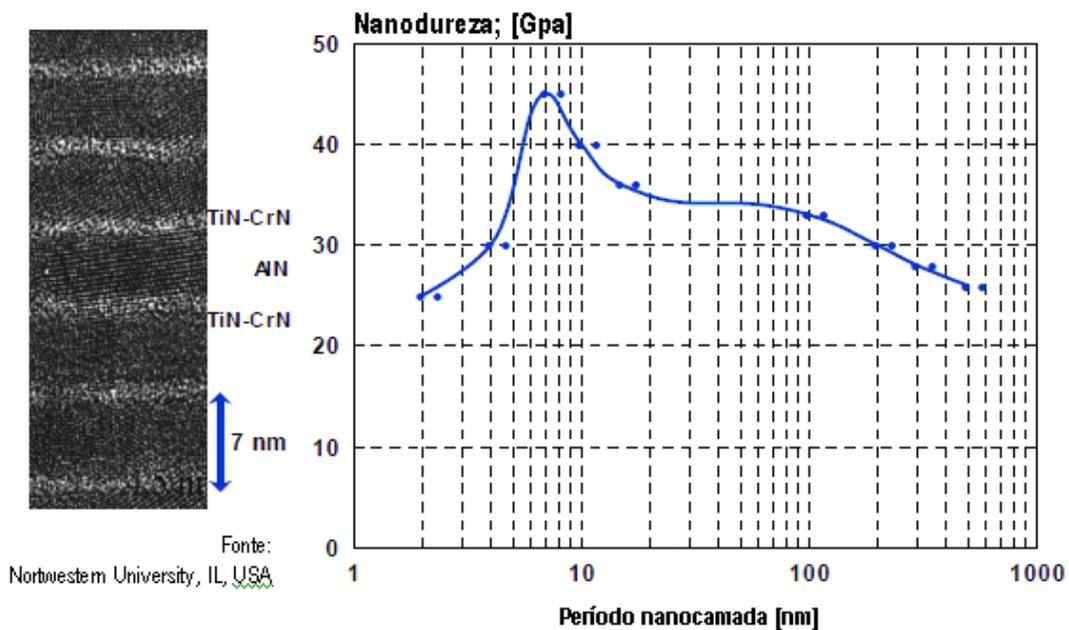


Figura 4.3 Relação entre espessura da nanocamada e dureza (CSELLE, 2003).

A alta dureza é alcançada através da forte diferença do módulo de Young das subcamadas do material. O aumento da dureza com a espessura da camada até 7 nm, conforme mostra a figura

4.3, pode ser explicado pela estrutura cúbica do cristal de AlN, o qual se torna hexagonal por volta de 10 nm. A dureza diminui com pequenas espessuras de nanocamadas, entre 6 – 7 nm. Isso é causado pela “áspera” interface entre as subcamadas (CSELLE, 2003).

Para se produzir nanocamadas é essencial o controle do sincronismo de cátodo e a rotação do substrato. Uma espessura de nanocamada constante é impossível de ser feita quando pequenas e grandes ferramentas de corte, insertos, moldes e matrizes são colocados no mesmo lote. Para coberturas em grandes séries as monocamadas podem alcançar grandes melhoras de desempenho (CSELLE, 2003).

Na deposição de diferentes tipos de materiais, componentes como Ti, Cr, Al e Si não se misturam completamente e duas fases são criadas. Em coberturas nanocristalinas os grãos de nanocristais de TiAlN ou AlCrN são embutidos em uma matriz amorfa de Si₃N₄, a qual fica melhor evidenciada em estruturas com alta quantidade de silício. Essa estrutura nanocomposta melhora significativamente características físicas e o desempenho da cobertura especialmente em usinagem em alta velocidade e corte a seco. Como mostra a figura 4.4 podemos fazer uma analogia dessa estrutura com o andar na areia da praia. Usualmente o pé afunda na areia seca, porém não afunda ou afunda muito pouco na areia molhada. Isso é devido aos espaços entre os grãos de areia serem preenchidos com água, fazendo com que a superfície ganhe resistência e conseqüentemente dureza (CSELLE, 2003, HNASER,2004).

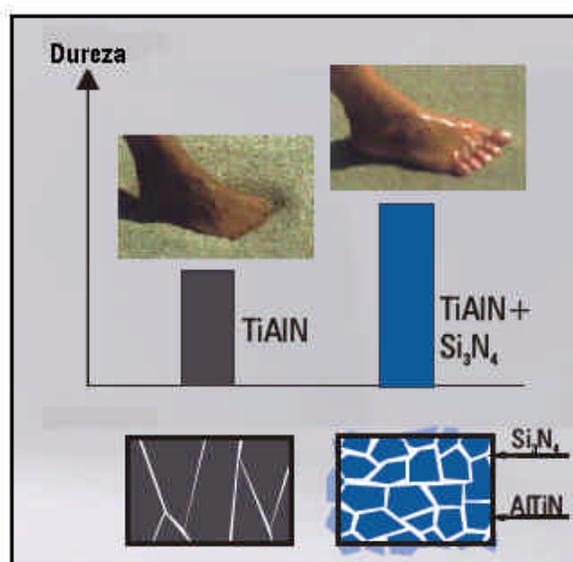


Figura 4.4: Aumento da dureza de revestimentos nanocompostos.

A mais importante vantagem do revestimento nanocomposto é sua resistência à temperatura. A figura 4.5 mostra a relação entre temperatura e dureza de alguns revestimentos. nACo® é marca registrada da empresa Platit AG para o revestimento nanoestruturado de AlTiN.

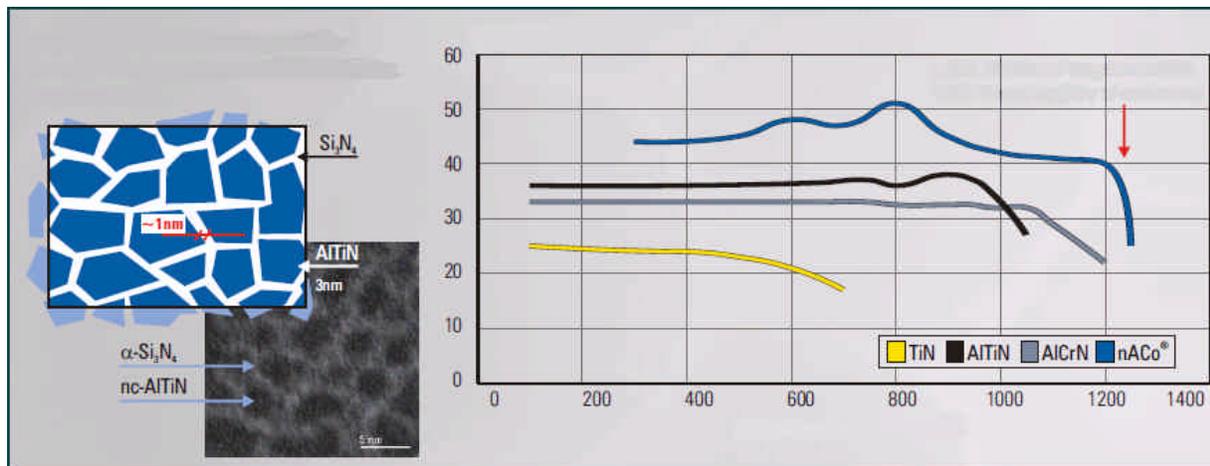


Figura 4.5: Relação entre temperatura e dureza de alguns revestimentos.

A redução brusca da dureza do revestimento nanocompósito ocorre aproximadamente de 200 à 300°C depois da cobertura de AlTiN e por volta de 100°C quando comparada com a cobertura de AlCrN. Existem indicações que a dureza após 1200°C decresce devido à difusão do cobalto do metal duro e não pela cobertura nanocomposta. A alta dureza e resistência a quente dessa cobertura faz com que ela possa ser usada não somente em substituição à revestimentos PVD como também em substituição a espessas camadas de CVD (HANSER, 2004).

4.2. Substratos para brochas

4.2.1 Aço rápido

O aço rápido é um aço ferramenta de alta liga de tungstênio, molibdênio, cromo, vanádio e nióbio, assim designado pois quando do seu desenvolvimento, em 1905, era o material de ferramenta que suportava as maiores velocidades de corte (DINIZ, MARCONDES, COPPINI, 2003).

É um material tenaz, de elevada resistência ao desgaste e elevada dureza a quente (se comparado com o aço carbono anteriormente usado para ferramentas), podendo ser utilizado até

temperaturas de corte da ordem de 600°C. A estrutura metalográfica do aço rápido no estado temperado é martensítica básica com carbonetos incrustados. A estrutura básica confere ao material a sua dureza a quente, a qual é tanto maior quanto mais elementos de liga são dissolvidos durante o tratamento térmico e permanecem dissolvidos depois. O tipo e o número de carbonetos duros que se formam são os responsáveis pela resistência à abrasão (DINIZ, MARCONDES, COPPINI, 2003).

A manutenção da dureza em temperaturas elevadas ocorre devido ao chamado endurecimento secundário. Os aços carbono e os aços liga apresentam queda da dureza com a elevação da temperatura, isso por causa do revenimento da martensita. Nos aços rápidos, a elevação da temperatura provoca a transformação da austenita retida em martensita e a precipitação de carbonetos, fenômeno que resulta no aumento da dureza (SANTOS, SALES, 2007).

Os tipos convencionais de aços rápidos estão representados na tabela 4.2. Em princípio, há duas categorias de aços rápidos: a categoria “T” que compreende os tipos predominantemente ao tungstênio e a categoria “M” que compreende os tipos predominantemente ao molibdênio.

Essas categorias, por sua vez, são divididas em duas subcategorias, contendo ambas cobalto. Tem-se pois os tipos ao W, indicados nas classificações AISI e SAE com a letra “T”, os tipos ao W-Co ainda indicados naquelas classificações com a letra “T”, os tipos ao Mo e ao Mo-Co, ambos indicados nas classificações AISI e SAE com a letra “M”. Como se pode verificar na tabela 4.2, todos os tipos de aço rápido contêm ainda cromo e vanádio (DINIZ, MARCONDES, COPPINI, 2003).

Tabela 4.2 : Composição e características dos aços rápidos (Chiaverine, 1981).

| Tipo de aço | Classificação SAE | % C | % Mn | % Si | % Cr | % V | % W | % Mo | % Co | Tenacidade | Resistência ao desgaste | Dureza a quente |
|-------------|-------------------|------|------|-------|------|------|-------|------|-------|------------|-------------------------|-----------------|
| ao W | T1 | 0.70 | 0.30 | 0.25 | 4.00 | 1.00 | 18.00 | - | - | Baixa | Muito boa | Muito boa |
| | 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 | Baixa | Muito boa | Excelente |
| | 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 | - | Baixa | Muito boa | Muito boa |
| | 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 | M6 | 0.80 | 0.30 | 0.25 | 4.00 | 1.50 | 4.00 | 5.00 | 12.00 | Baixa | Muito boa | Excelente |
| | 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 | | | |

Mais de 90% do consumo mundial de machos e mais de 60% de todas as fresas caracol são feitas de aço rápido. É exatamente na área do fresamento que acontece a verdadeira competição entre os materiais de corte. Nesse campo, o aço rápido perde cada vez mais participação de mercado para o metal duro, que predomina com 70% de utilização. A vantagem do aço rápido, em comparação ao metal duro e outros materiais de corte atuais, é a maior tenacidade e o preço baixo (THOMAS, 2005).

Na competição entre o aço rápido e o metal duro, materiais que pretendem estender suas áreas de aplicação, o aço rápido luta com novos materiais sinterizados e revestimentos modernos, enquanto o metal duro sólido invade o campo típico do aço rápido, por exemplo, na produção de microferramentas. No caso de fresas, há uma área em que as fresas de metal duro não podem penetrar, devido à tecnologia (dados de corte) e ao custo. Nessa importante área de aplicação especial, o aço rápido predomina, sendo que uma das principais vantagens do aço rápido é a realização econômica de ferramentas de corte com geometrias complexas para peças também complexas (THOMAS, 2005).

Alguns tipos de processo que utilizam ferramenta rotativas de pequeno diâmetro, ainda utilizam bastante materiais de ferramentas como o aço rápido, devido às altas rotações necessárias para se conseguir as velocidades de corte compatíveis com materiais mais nobres de ferramentas (DINIZ, MARCONDES, COPPINI, 2003).

4.2.2. Aço sinterizado

Os estudos e o desenvolvimento do processo de obtenção do aço rápido (HSS) sinterizado teve início por volta de 1965. O objetivo era melhorar as propriedades funcionais e o desempenho do HSS aumentando sua competitividade em relação ao metal duro. Os estudos e desenvolvimentos foram focados na produção de tarugos densos de HSS e produtos semi acabados trabalhados à quente, usando o seguinte processo: Fusão + atomização em gás inerte (nitrogênio) + encapsulamento do pó + prensagem isostática à quente. (GRINDER, 2005).

As pequenas gotículas de material se solidificam rapidamente durante o passo de atomização, a qual dá as partículas uma fina e uniforme microestrutura de carbonetos. Essa fina estrutura pode ser mantida após a prensagem isostática à quente e após trabalhos à quente. O PM HSS é um aço com microestrutura isotrópica fina e uniforme, livre de segregação. Os problemas severos e grosseiros de segregação de carbonetos em peças fundidas e forjadas são evitados no aço rápido sinterizado (GRINDER, 2005). A figura 4.6 mostra a estrutura de um aço rápido convencional e um sinterizado.

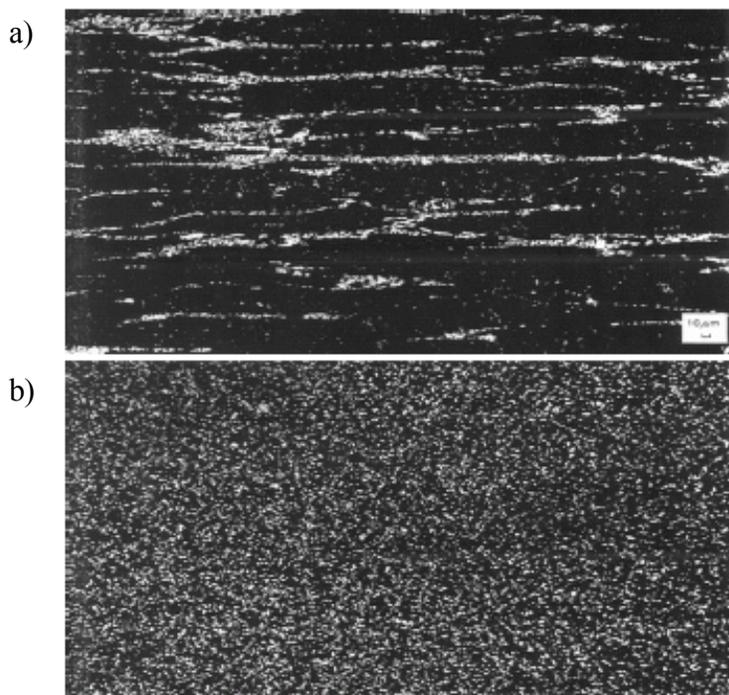


Figura 4.6: Microestrutura: a) aço rápido convencional, b) aço rápido sinterizado (GRINDER, 2005).

O aço sinterizado apresenta algumas vantagens, resultado da estrutura de carbonetos ultrafina e isenta de segregação (VILLARES, 2007). As principais características do PM HSS são:

- Facilidade de usinagem e alta retificabilidade
- Melhor resposta ao tratamento térmico
- Maior resistência ao revenimento
- Excelente capacidade dimensional após beneficiamento
- Elevada tenacidade em durezas elevadas
- Alta resistência ao desgaste
- Melhor resposta ao recobrimento com TiN

A figura 4.7 mostra a relação entre a resistência à flexão e dureza de alguns materiais incluindo PM HSS (ASP marca registrada de aços sinterizados da empresa Erasteel), HSS, CWT (Cold Work Tool Steel), metal duro e cerâmica (GRINDER, 2005).

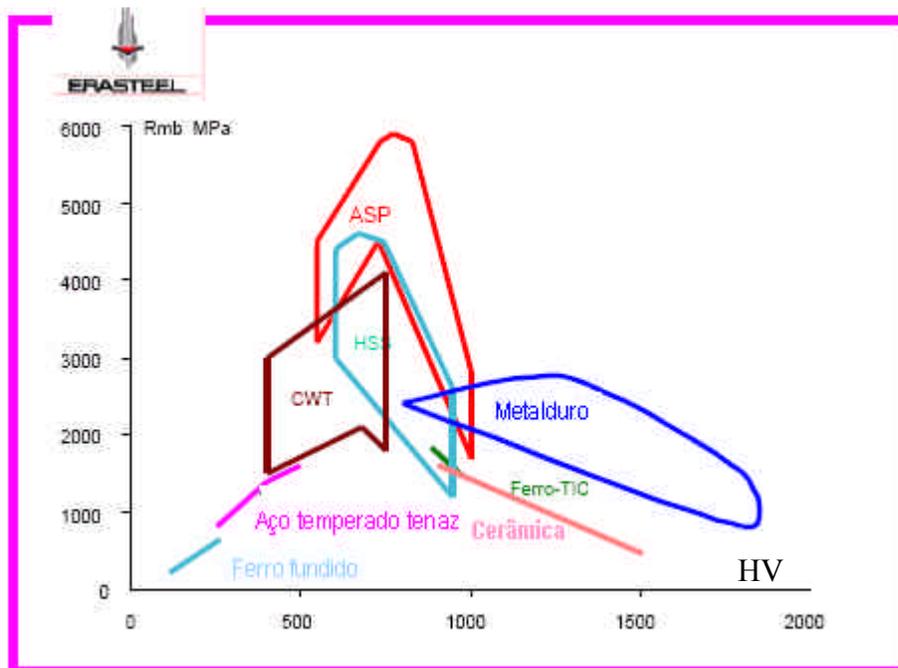


Figura 4.7: Relação entre resistência a flexão e dureza de alguns materiais (ERASTEEL 2007).

Os aços sinterizados mais indicados para a fabricação de brochas são o ASP 2023 e ASP 2030 (ERASTEEL) tendo como similares o SINTER 23 e SINTER 30 (VILLARES). Esses aços

também são indicados para a fabricação de outros tipos de ferramentas como: facas fellows, fresas caracol, machos, shavers, ferramentas para trabalho a frio, para conformação e corte. A tabela 4.3 mostra a composição química do aço ASP 2023 e ASP 2030.

Tabela 4.3: Composição química dos aços ASP 2023 e 2030 (ERASTEEL).

| TIPO DE AÇO | C | Cr | Mo | W | V | Co |
|-------------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| ASP 2023 | 1,3 | 4,2 | 5,0 | 6,4 | 3,1 | 0,0 |
| ASP 2030 | 1,3 | 4,2 | 5,0 | 6,4 | 3,1 | 8,5 |

A figura 4.8 mostra algumas propriedades comparativas entre aços convencionais e aços sinterizados da empresa Erasteel.

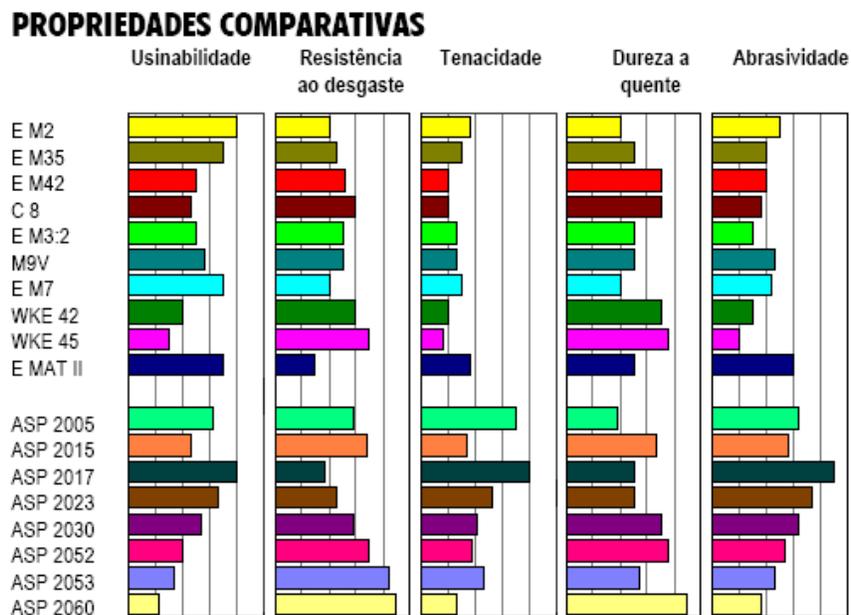


Figura 4.8: Propriedades comparativas entre aços convencionais e aços sinterizados.

Conforme Sarwar (1998) o uso do aço rápido sinterizado como substrato de ferramentas aumenta muito a qualidade da aresta de corte, levando a uma melhora significativa na vida da ferramenta. Este autor realizou testes com uma brocha para rasgo de chaveta com largura de 10mm, comprimento de corte de 30mm, com avanço por dente de 0,079 mm, usinando um aço liga 150M36. Conforme mostra a figura 4.9 as brochas fabricadas com aço sinterizado

apresentaram um rendimento superior à brocha fabricada com aço convencional M2, sendo que a maior diferença se deu quando comparado o desgaste do aço M2 com o aço sinterizado ASP 30.

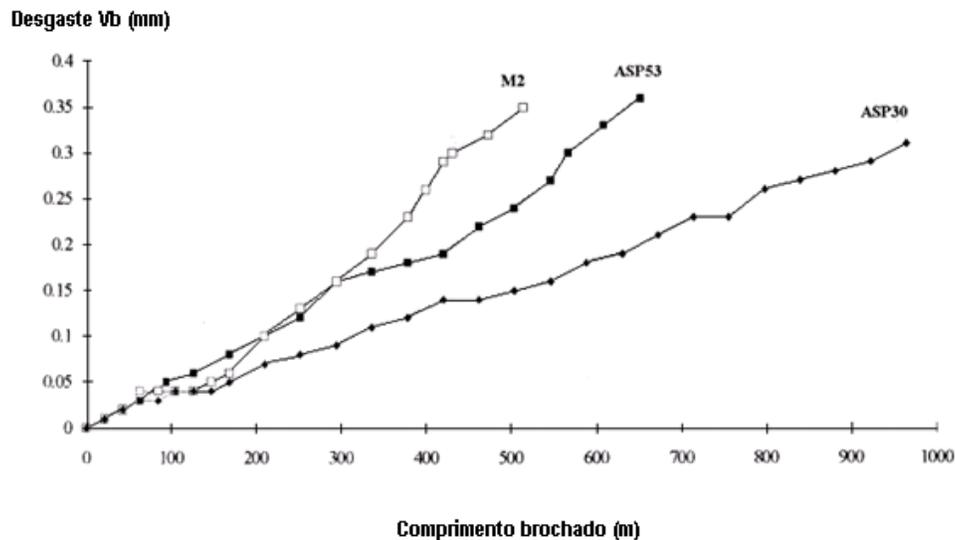


Figura 4.9: Teste de desgaste em brochas com diferentes substratos.

4.2.3. Metal duro

Além do aço rápido convencional e do aço rápido sinterizado, o metal duro também é utilizado na construção de brochas, porém num campo mais restrito, principalmente no brochamento em alta velocidade, para o acabamento de peças produzidas em material endurecido, que pode substituir a retificação. Velocidades e avanços do processo convencional inviabilizavam essas aplicações (HORI, 2005).

As brochas de metal duro, conhecidas também por Hard broach, são construídas de metal duro integral e possuem geometria de corte diferenciada da convencional. São utilizadas em máquinas especiais com altíssima velocidade de corte entre 60 e 80 m/min (ARTHUR KLINK, 2007)

4.3. Preparação de arestas

Para ferramentas de HSS, uma simples rebarba é de maior importância. Se a ferramenta com rebarba é revestida, a rebarba durante o primeiro corte quebra e a ferramenta continua a

usinagem na aresta sem a cobertura, comprometendo o rendimento da ferramenta. A opinião dominante é que para evitar esse tipo de problema a maioria das arestas de corte devem ser arredondadas com um pequeno raio bem definido (CSELLE, 2005). A tabela 4.4 sumariza alguns métodos de preparação de arestas e suas características.

Tabela 4.4: Métodos de preparação de arestas (CSELLE, 2005).

| Características | Brunimento com lima diamantada | Escovação | Polimento com pasta de diamante | Micro jateamento | Feixe de água | Tratamento com pó magnético |
|---------------------------|------------------------------------|--|--|--|--|---|
| Qualidade | Muito boa | Média | Boa | Média | Boa | Boa |
| Reprodutibilidade | Depende da pessoa | Boa | Boa | Média | Boa | Boa |
| Flexibilidade | Muito alta | Média | Baixa | Baixa | Média | Boa |
| Produtividade | Baixa | Média | Média | Boa | Alta | Média |
| Custo | Baixa | Média | Média | Média | Muito alta | Alta |
| Características especiais | típico para pequenos retificadores | Comum de ser usado em fresas de topo. Difícil de se usar em machos | Usado também para polimento de canais. Difícil para pequenos diâmetros | Usado também para polimento de canais. O jateamento pode ser a seco ou molhado | Somente para larga escala. É necessário proteção contra corrosão | Usado também para polimento de canais. É necessário desmagnetização |

Esses processos além de serem usados na preparação da aresta também podem ser adequados para processar a superfície da área de corte e canais. Por exemplo, alguns grandes fabricantes de ferramentas, escovam ou fazem o polimento de ferramentas de laminar roscas de alto desempenho. Antes da cobertura, irregularidades nos canais e nas arestas de corte são balanceadas. As arestas de laminação se tornam uniformemente circulares, o que é uma vantagem em um processo de conformação plástica, como é o caso da laminação de roscas. Depois da cobertura, gotículas resultantes do processo de revestimento são removidas, contribuindo para um melhor escoamento do material conformado da peça (CSELLE, 2005).

4.3.1 Processo de fabricação de ferramentas inteiriças

O processo de fabricação de ferramentas inteiriças é um processo bem conhecido do usuário final, já que um grande número de usuários tem que cuidar da reafiação de ferramentas caras como fresas tipo caracol e brochas. Usualmente ferramentas são retificadas diretamente em barras de metal duro ou HSS pré-endurecido. A preparação da aresta é usualmente feita por micro jateamento ou por escovação (RECH, 2005). A figura 4.10 mostra os passos para a

fabricação de uma ferramenta inteira. A figura 4.11 e 4.12 mostram exemplos de micro geometria da aresta de corte de uma fresa de topo de metal duro e uma fresa tipo caracol de HSS.

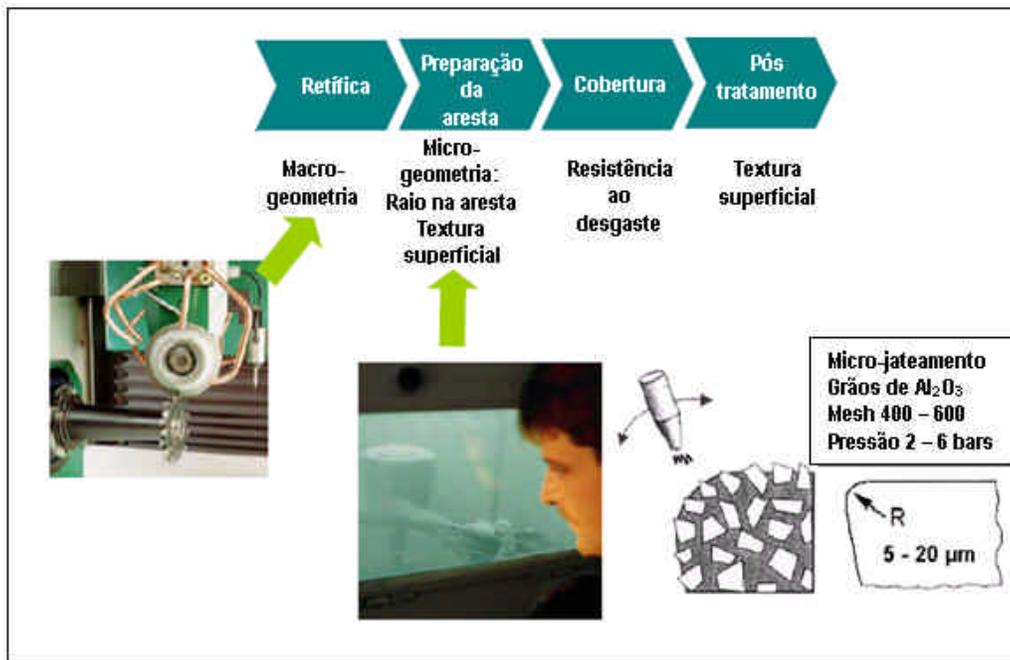


Figura 4.10: Passos para a fabricação de uma ferramenta inteira.

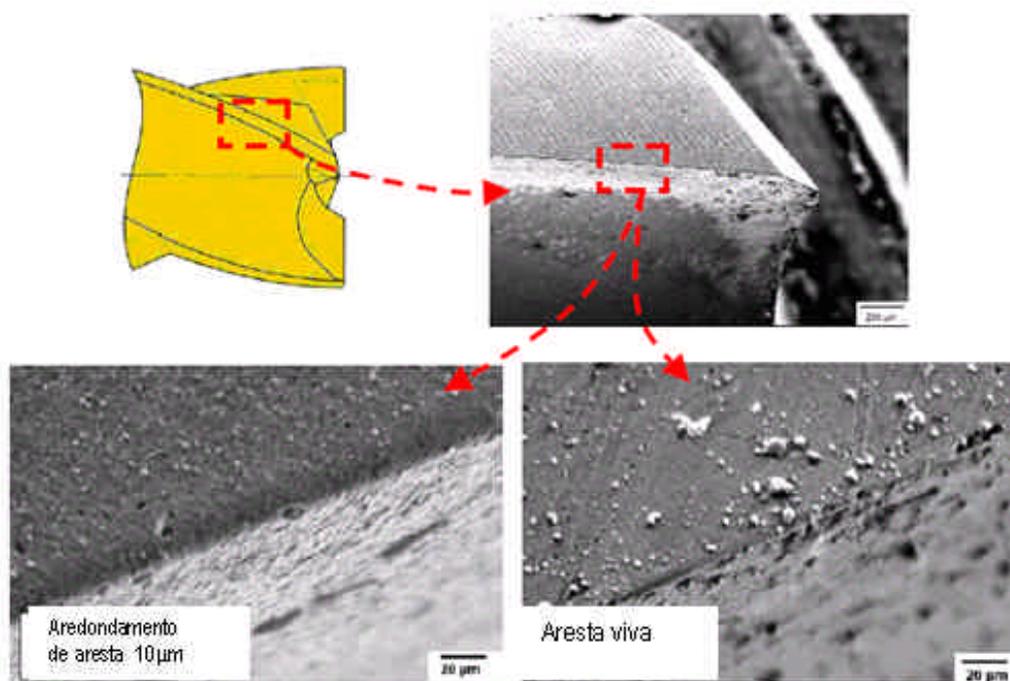


Figura 4.11: Exemplo da micro geometria da aresta de corte de uma fresa de topo de metal duro (RECH, 2005).

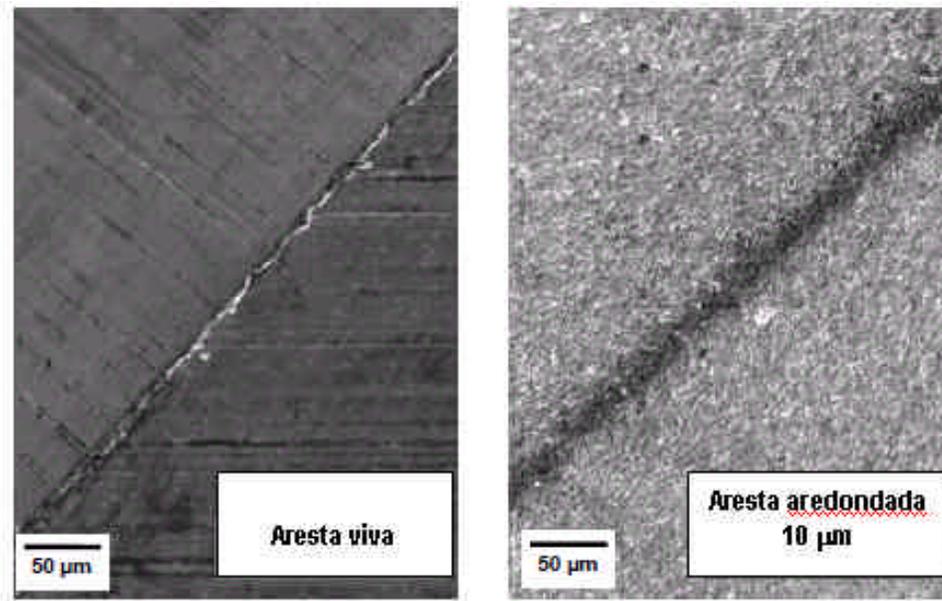


Figura 4.12: Exemplo da micro geometria da aresta de corte de uma fresa tipo caracol de HSS (RECH, 2005).

4.3.2. Defeitos na microgeometria de ferramentas de corte

Quando inspeciona-se a micro geometria de ferramentas de corte, especialmente ferramentas sólidas, pode-se observar uma variedade de defeitos tais como: micro quebras, rebarbas, queima, cobertura deficiente, rugosidade superficial deficiente. Esses defeitos ocorrem independentemente do substrato, HSS ou metal duro, e também independentemente do fabricante (RECH, 2005).

- Micro quebras são causadas principalmente pelo processo de retificação e pela manipulação da ferramenta entre cada passo do processo de fabricação. As micro quebras podem ocorrer tanto antes como após a fase de cobertura da ferramenta.
- Rebarbas são causadas exclusivamente pelo processo de retificação. É muito importante observar a presença de rebarbas na aresta de corte, sendo que as mesmas são muito problemáticas para o processo de preparação da aresta. As figuras 4.13 e 4.14 mostram defeitos típicos encontrados em fresas de topo inteiriças e fresas tipo caracol.

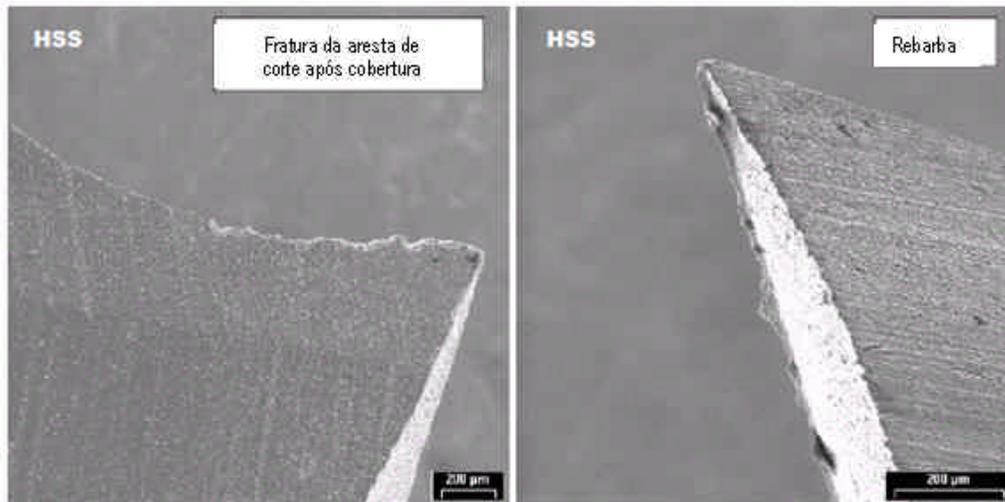


Figura 4.13: Típicos defeitos observados em fresas de topo inteiriças (RECH, 2005).

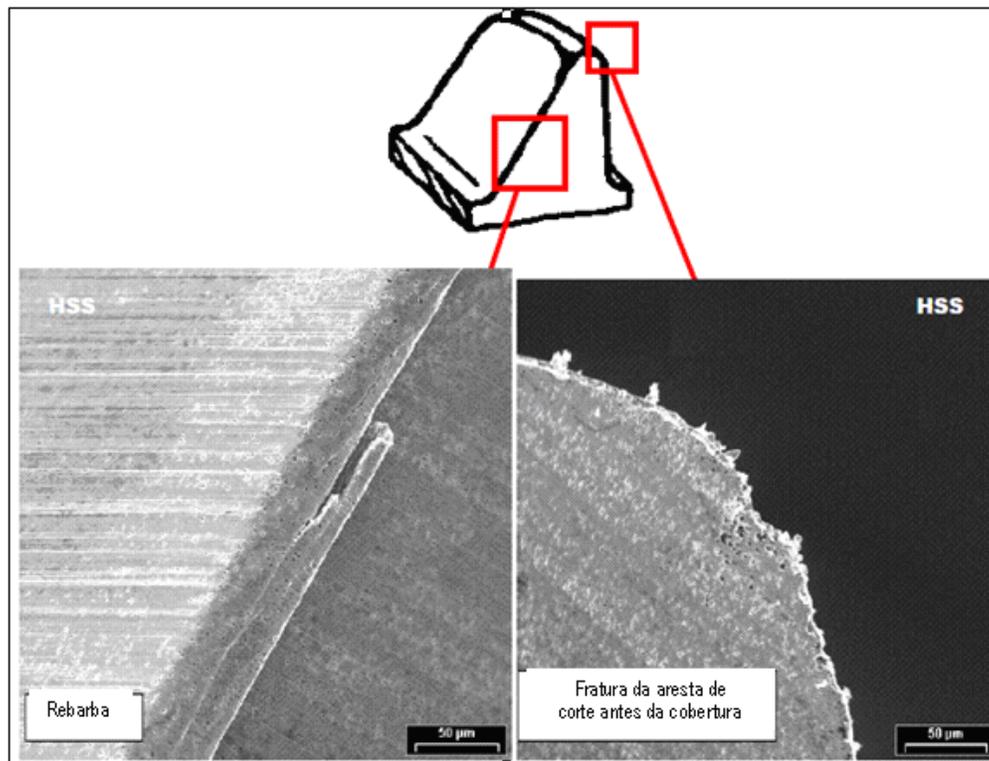


Figura 4.14: Típicos defeitos observados em fresas tipo caracol (RECH, 2005).

- Acabamentos superficiais ruins observados nas faces de ferramentas são causados geralmente por más condições de retificação. Quando a textura superficial é ruim, especialmente quando grandes ondulações são observadas, o processo de preparação da

aresta não consegue melhorar suficientemente a micro geometria e o resultado final é insatisfatório (REACH, 2005)

Conforme teste realizado por Sarwar (1998), houve um acréscimo considerável na vida de uma brocha melhorando o acabamento superficial dos seus dentes, passando de uma retificação convencional dos dentes com rugosidade superficial de $0,8 \mu\text{m Ra}$ para retificação com rebolo de CBN, atingindo uma rugosidade no dente da brocha de $0,3 \mu\text{m Ra}$. A figura 4.15 mostra a comparação da vida da brocha com os diferentes processos de retificação.

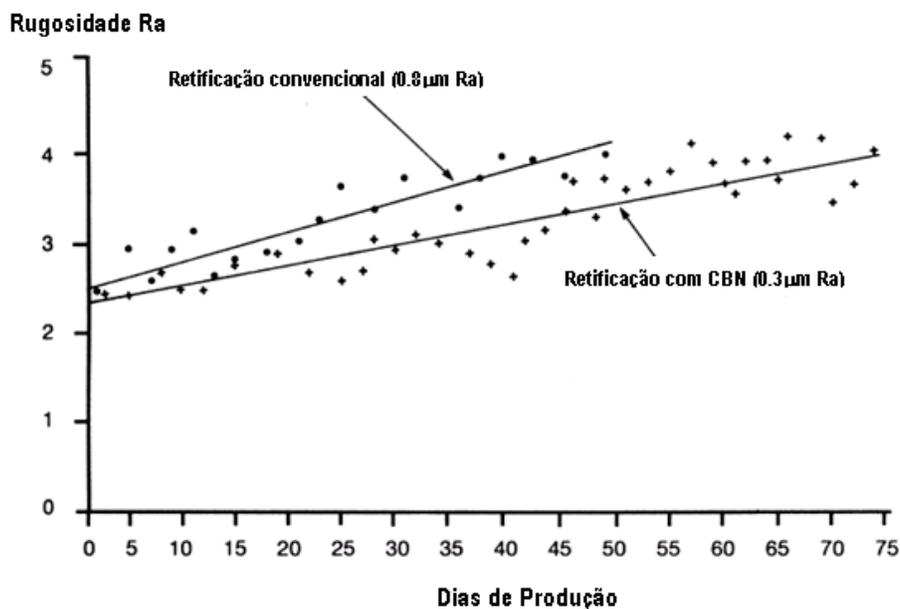


Figura 4.15: Efeito da rugosidade superficial dos dentes na vida da brocha (SARWAR,1998).

4.4. Estudo de casos

Conklin (1993) investigou os benefícios derivados da aplicação de camadas de TiN em brochas aplicadas através do processo PVD. Foram utilizados no experimento 4 brochas sem cobertura, que eram reafiadas a cada corrida de testes e quatro brochas revestidas com camadas de TiN através do processo PVD. As brochas tinham diâmetro de 100mm e comprimento de 660mm. Para o teste foi utilizado uma brochadeira vertical de 75 toneladas de força de tração. O

material da peça brochada era ferro fundido nodular. A tabela 4.5 mostra os resultados obtidos no experimento. Os testes foram realizados com o mesmo tipo de peça, em lotes e datas diferentes.

Tabela 4.5: Comparação de desgaste de brocha com e sem cobertura TiN.

| | Teste 1 | | Teste 2 | | Teste 3 | | Teste 4 | |
|------------------------------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|
| | Brocha sem cobertura | Brocha com cobertura |
| Quantidade de peças / vida | 720 | 1500 | 1500 | 2500 | 1000 | 1580 | 750 | 1250 |
| Desgaste total (mm) | 0.381 | 0.254 | 0.3048 | 0.1718 | 0.254 | 0.127 | 0.254 | 0.127 |
| Desgaste por peça (mm) | 0.00053 | 0.00017 | 0.00020 | 0.00007 | 0.00025 | 0.00008 | 0.00033 | 0.00010 |
| Redução do desgaste por peça (%) | | 68 | | 65 | | 68 | | 69.2 |

Os resultados do estudo indicam uma clara vantagem no uso da brocha com revestimento de TiN. O teste 1 mostra um aumento de 720 para 1500 peças com a brocha revestida de TiN e no teste 2 de 1500 (sem revestimento) para 2500 (com revestimento). Os testes 3 e 4 mostram um aumento no número de peças produzidas de 1000 para 1580 e de 750 para 1250 respectivamente. No mesmo tempo, a redução da porcentagem de desgaste gerado na brocha por peça verificado no experimento foi de 68 a 69%.

Em um estudo realizado pelo instituto Alemão Karlsruhe (1990) para a empresa LUK Bühl fabricante de embreagens para o setor automotivo, foram realizados testes com brochas sem revestimento e com revestimento de TiN obtido através do processo PVD, ambas fabricadas em aço rápido SAE M2. A peça utilizada para o experimento foi um cubo de embreagens em aço DIN C45. A tabela 4.6 mostra os resultados obtidos no teste.

Tabela 4.6: Comparação entre a vida de brochas com e sem cobertura TiN.

| Ferramenta | Peças por afiação | | Número de afiações | Peças usadas por brocha | |
|-----------------------------------|-------------------|--------|--------------------|-------------------------|--------|
| | mínimo | máximo | | mínimo | máximo |
| Brocha fabricante 1 sem cobertura | 6500 | 8500 | 12 | 78000 | 102000 |
| Brocha fabricante1 com cobertura | 9000 | 13000 | 15 | 135000 | 195000 |
| Brocha fabricante 2 sem cobertura | 5500 | 7500 | 12 | 66000 | 90000 |
| Brocha fabricante2 com cobertura | 12000 | 16000 | 15 | 180000 | 240000 |

Os resultados, para o brochamento com ferramentas com e sem revestimento TiN, mostraram que as brochas com revestimento além de produzirem uma quantidade maior de peças por afiação apresentaram um quantidade maior de afiações por vida da brocha. Isso ocorreu para os dois diferentes fabricantes de ferramentas envolvidos no experimento. O estudo também concluiu que com a utilização de coberturas de TiN houve uma redução de custo da ordem de 20 a 25%.

Testes realizados pela Hurth Infer (2003), em um fabricante de autopeças, mostrou que a brocha revestida com uma camada de TiN apresentou vida da ferramenta, em número de peças, equivalente ao dobro da vida da brocha sem cobertura. A brocha sem cobertura produziu 20000 peças durante toda a vida da ferramenta, enquanto que a brocha com revestimento de TiN produziu 40000 peças. O teste consistia do brochamento de um perfil interno de cubos de roda fabricados de aço SAE 1045 com dureza entre 240 a 285 HB e comprimento do brochado de 52mm. Foram utilizadas brochas fabricadas em aço rápido SAE M2 com e sem revestimento de TiN, sendo que a cada afiação da brocha com cobertura a mesma não recebia nova camada de revestimento.

Os benefícios da combinação entre revestimentos duros e substratos de aço rápido sinterizado foi apresentado no HSS Forum Conference (2005) como uma ótima opção para melhorar o desempenho das brochas. No caso apresentado, no brochamento de uma peça em aço DIN C45 com comprimento de corte de 30mm a brocha fabricada em aço sinterizado com cobertura de TiAlN (Nitreto de Titânio Alumínio) e com mínima quantidade de fluido (MQF), trabalhando como uma velocidade de corte de 50m/min, 10 vezes maior que a utilizada com a brocha sem cobertura, apresentou uma vida da ferramental 25% superior, com melhor acabamento superficial, consumindo menor energia e reduzindo o custo por peça em 15%, quando comparado com uma brocha em aço rápido ao cobalto utilizando refrigeração convencional com óleo de corte.

Hori (2005) também analisou o uso em conjunto de revestimentos duros, aço rápido sinterizado e MQF no brochamento. MQF é o nome dado ao procedimento de se pulverizar uma quantidade mínima de óleo (menos de 60ml/h) em um fluxo de ar comprimido. Esta mistura ar-óleo, apesar de não possuir alta capacidade de refrigeração do processo, muitas vezes tem alta

capacidade de lubrificação da região de corte (DINIZ, MARCONDES, COPPINI, 2003). A figura 4.16 mostra a comparação do desgaste de flanco (V_B) entre o brochamento MQF, com o uso de brocha de aço rápido sinterizado revestida com TiAlN e o brochamento convencional com óleo clorado e uma brocha com aço rápido convencional M35. O teste foi realizado usando um corpo-de-prova de aço carbono S45C (200HB) até uma vida de 81 metros de comprimento, sendo a profundidade de corte por dente de 0,06mm. O resultado do teste mostrou que a brocha com substrato de HSS-PM com cobertura no brochamento MQL apresentou em 81 metros de comprimento brochado desgaste 50% inferior quando comparado com a brocha de aço rápido M35 e brochamento com refrigeração convencional de óleo clorado.

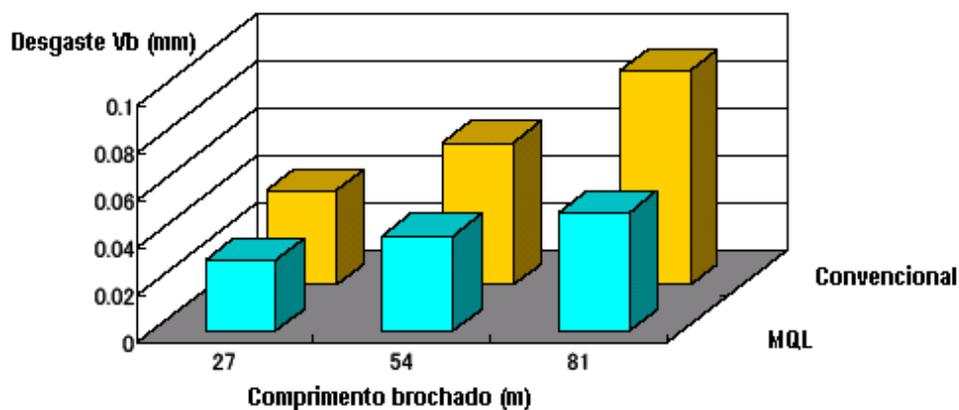


Figura 4.16-Comparação do desgaste entre brochamento MQL com HSS-PM e cobertura com o brochamento convencional.

Capítulo 5

Materiais, Equipamentos e Métodos Experimentais

5.1. Material.

Para os experimentos foram utilizados como corpos de prova o componente do conjunto de disco de embreagem denominado cubo de embreagem, fornecido pela empresa Schaeffler Brasil divisão LUK embreagens. O cubo de embreagem é fabricado em aço DIN C45 com dureza de 23 à 28 HRC, cuja composição química encontra-se na tabela 5.1.

Tabela 5.1: Composição química aço C45.

| C | Si | Mn | P | S | Pb |
|-------------|-------|-------------|------------|------------|----------|
| 0,42 - 0,50 | ≤ 0,4 | 0,50 - 0,80 | max. 0,045 | max. 0,045 | max. 0,1 |

Antes de sofrer o processo de brochamento a peça passa pelos seguintes processos:

- Torneamento em máquina CNC.
- Fresamentos dos dentes no diâmetro externo em máquina perfiladora.
- Tempera por indução nos dentes do perfil externo.
- Revenimento em forno de câmara.

A figura 5.1 mostra o cubo de embreagem utilizado como corpo de prova para os ensaios e a figura 5.2 mostra as dimensões de construção do perfil interno da peça.

A fabricação deste perfil interno usando o processo de brochamento foi o objeto de estudo desta dissertação, tendo os seguintes objetivos.

- Analisar a vida das brochas com a utilização de 2 tipos de substratos e 3 tipos de coberturas.
- Verificar a variação dimensional do perfil interno durante uma vida da brocha.
- Analisar a variação dos esforços de corte de brochas com e sem revestimento.
- Analisar os mecanismos de desgastes das ferramentas.

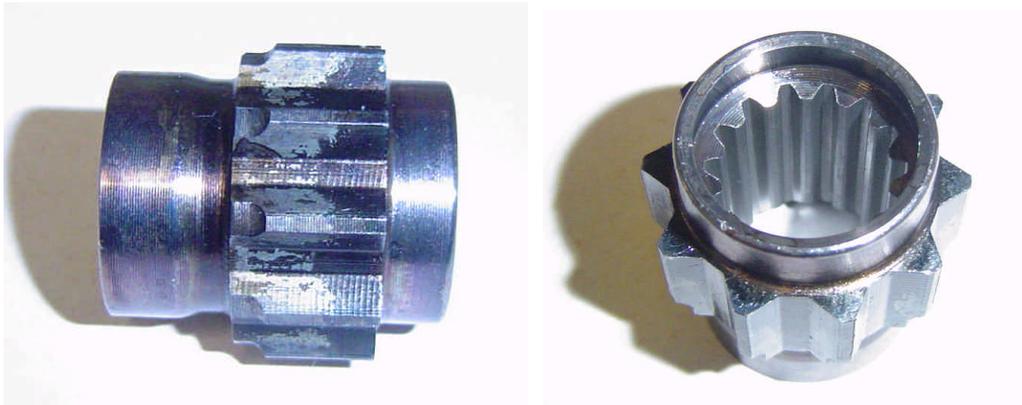


Figura 5.1: Cubo de embreagem utilizado como corpo de prova.

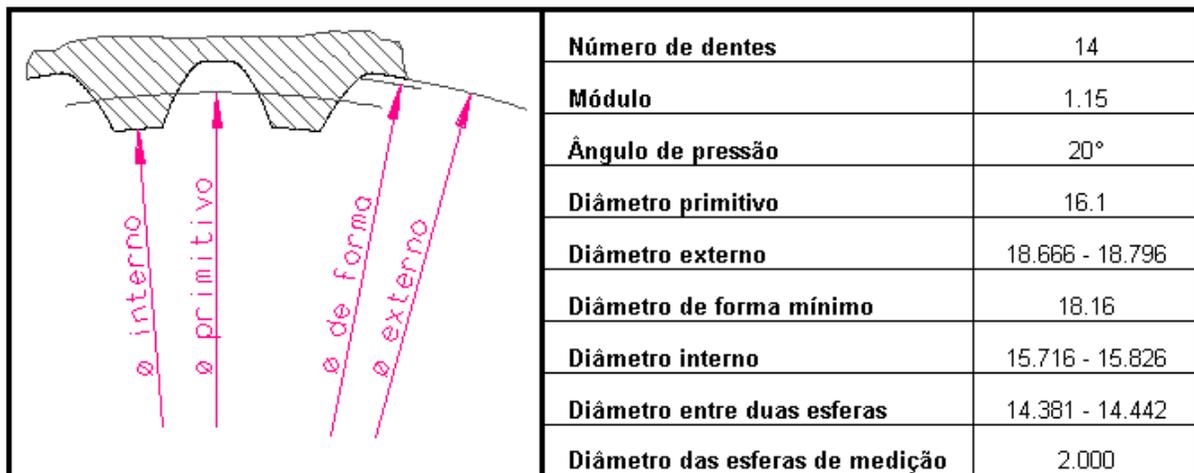


Figura 5.2: Dimensões de construção do perfil interno.

5.1.1. Equipamentos e instrumentos utilizados.

Os ensaios foram realizados nas instalações da empresa Schaeffler Brasil, divisão LUK embreagens no setor de usinagem. A máquina-ferramenta utilizada foi uma brochadeira vertical da marca Detroit modelo 15-480-PPD com máxima força de tração de 130 kN, avanço de 8m/min e curso máximo de brochamento de 1200 mm, conforme mostra a figura 5.3. A brochadeira possui sistema de refrigeração externa da peça com emulsão de 9% a 11% de óleo sintético Plantocool MH2030 do fabricante Fuchs do Brasil.



Figura 5.3: Brochadeira Detroit.

As peças não são fixadas na máquina sendo somente encaixadas em um apoio fixo que fica em uma base chamada de carrinho de alimentação. A peça deve ficar apoiada para que a brocha faça a centralização da peça durante o brochamento. O carrinho onde a peça está encaixada, após acionado por um comando via botão, leva a peça até a área de trabalho para a execução do brochamento. Após o brochamento a descarga da peça é feita automaticamente pela máquina. A figura 5.4 mostra como as peças ficam apoiadas na máquina.

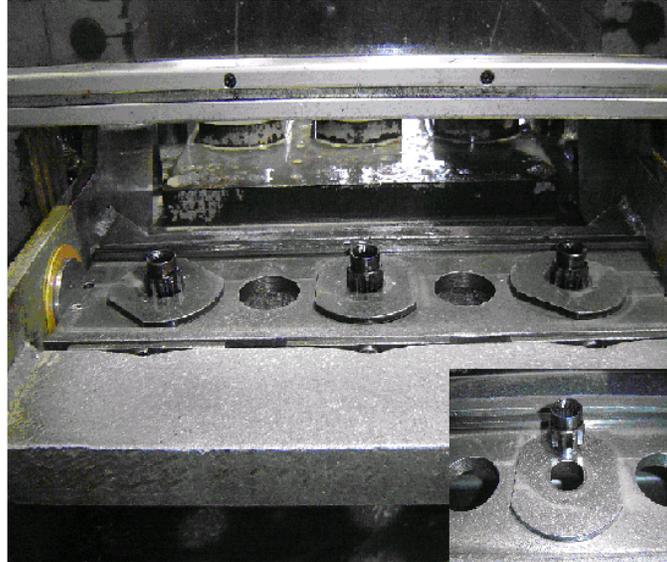
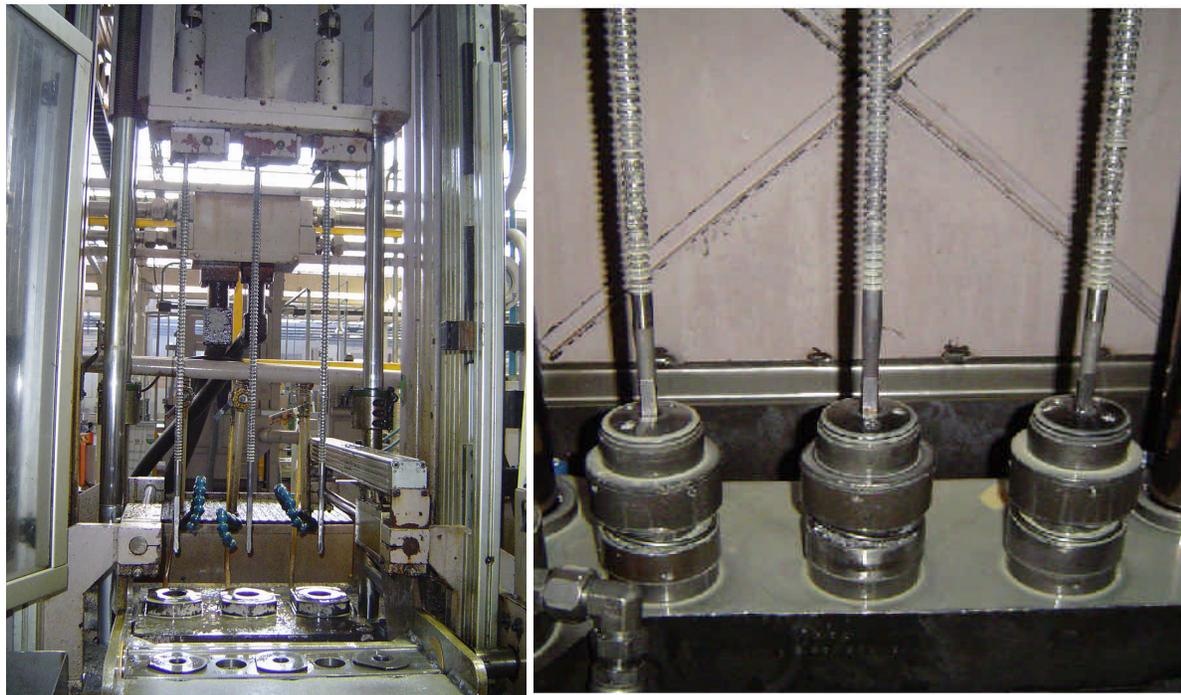


Figura 5.4: Apoio da peça na brochadeira.

As brochas foram fixadas na máquina pelos cabeçotes puxadores inferior e superior conforme mostra a figura 5.5.



a)

b)

Figura 5.5: a) Puxador superior b) puxador inferior.

As medições do desgaste de flanco máximo na superfície de folga das brochas ($V_{B \text{ Max}}$) e as fotos dos desgastes foram obtidas em uma máquina tridimensional ótica modelo Smartscod Zip do fabricante OGP de origem Norte-americana com capacidade máxima de ampliação de 202 vezes, conforme mostra a figura 5.6. Para a medição dos desgastes as brochas eram apoiadas sobre a mesa da tridimensional em dois blocos em “V”. Primeiramente o desgaste era medido junto a máquina com uma lupa graduada de ampliação de 8X e escala graduada de 0,1mm. Quando o critério de fim de vida da ferramenta era atingido, a brocha era levada à tridimensional ótica para a medição final. Quando a medição na tridimensional apresentava valores de desgaste inferiores ao critério estabelecido para o final de vida ferramenta, as brochas retornavam para a máquina para continuar a produzir até que os valores de desgaste definidos no critério de fim de vida fossem atingidos.



Figura 5.6: Tridimensional ótica.

Para analisar a influência nos esforços de corte das diferentes coberturas das brochas utilizadas nos experimentos, foi realizado o monitoramento do comportamento dos esforços de corte para as brochas com e sem cobertura. Devido à dificuldade de medir a força diretamente nas brochas, a variação da força foi verificada de forma indireta pelo aumento da pressão no sistema hidráulico da máquina, que é responsável pelo deslocamento de avanço da brocha. Para isso foi utilizado um transdutor de pressão da marca HBN código 1-P8AP/50B-001 conectado ao sistema hidráulico da máquina. Os dados de pressão captados pelo transdutor eram amplificados por um amplificador HBN Spider 8 e enviados para um PC conectado ao aparelho e registrados em um software de medição chamado Catman. A foto 5.7 mostra como o transdutor foi instalado na brochadeira e a foto 5.8 mostra o amplificador e o software utilizado para a medição da pressão.

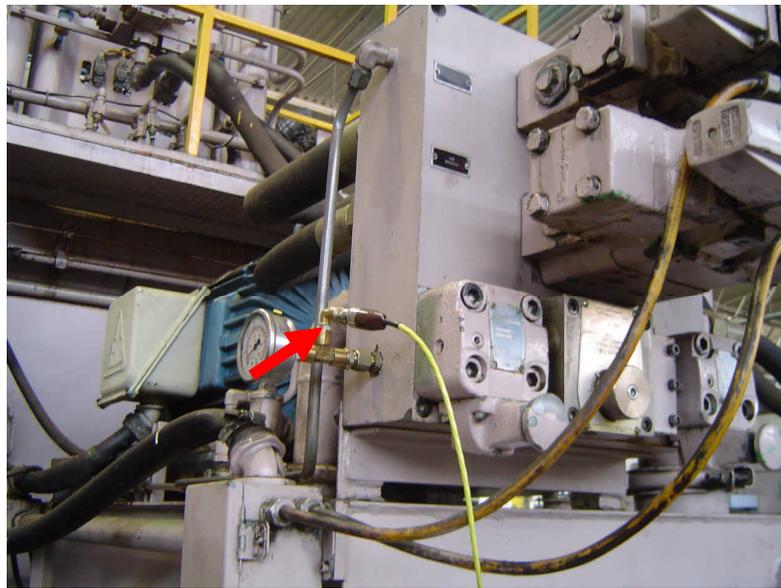


Figura 5.7: transdutor instalado na brochadeira.

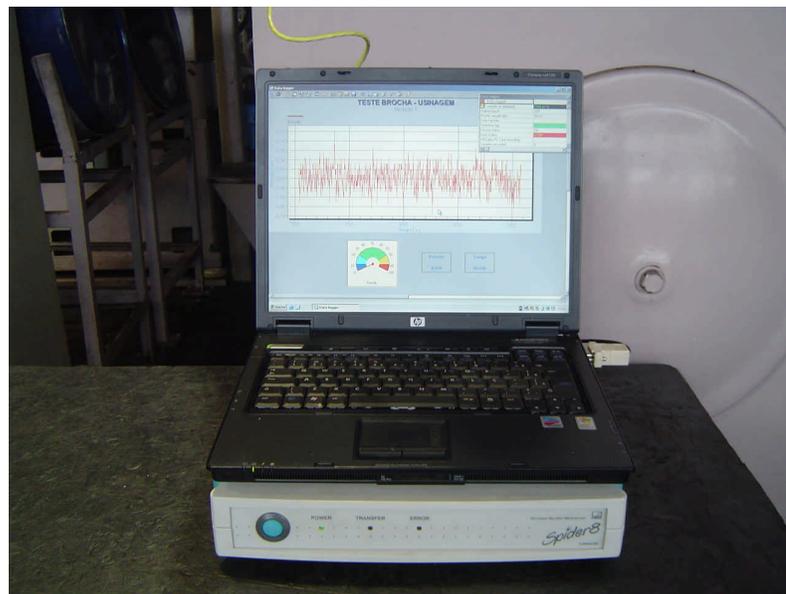


Figura 5.8: Amplificador e software de medição.

Para a medição do perfil interno da peça, entre esferas, foi utilizada uma base com relógio comparador digital com escala milesimal e ponta esférica conforme mostra a figura 5.9.



Figura 5.9: Dispositivo de medição do perfil interno.

5.1.2. Ferramentas utilizadas.

Os ensaios foram realizados com brochas especiais construídas conforme perfil pré-definido. O comprimento das brochas era de 950mm, sendo que 617,5mm são utilizados pelos dentes de corte. A região total de corte da brocha está dividida em quatro regiões.

Região 1 – possui 16 anéis de desbaste do diâmetro interno, esses anéis possuem 12 canais de quebra cavacos que são construídos de forma intercalada entre os anéis (conforme mostra a figura 2.7). Nessa região há um incremento ou aumento do diâmetro externo de 0,021mm de um anel para outro, com um avanço por dente de 0,0105mm .

Região 2 – essa região é utilizada como reserva da ferramenta. Ela garante que o diâmetro interno da peça seja produzido dentro das tolerâncias de projeto durante toda a vida útil da brocha. Os 4 anéis que formam essa região possuem o mesmo diâmetro externo e no início da vida da brocha somente o primeiro e eventualmente o segundo dente, quando na presença de deformações da peças e variações no dimensional da ferramenta, usinam a peça, calibrando a mesma conforme definido em projeto. Os demais dentes entram em operação gradativamente

com as afiações que ocorrem durante a vida útil da brocha. Nessa região há uma diminuição do ângulo de folga de 2° , utilizada na região 1, para 1° e os últimos 3 dentes ainda possuem ângulo de saída de 0° a uma distância de 0,5mm da aresta de corte, fazendo com que esses dentes só comecem a usinar após algumas afiações da brocha.

Região 3 – essa região é composta por 53 anéis, que são responsáveis pela usinagem dos dentes do perfil interno da peça. Nessa região o diâmetro externo da ferramenta aumenta a uma taxa de 0.057mm por anel, com um avanço por dente de 0.0285mm. Nessa área cada anel possui 14 dentes, que aumentam de altura conforme o avanço por dente, até atingirem a altura total do dente especificada em desenho. Porém, cada dente já deixa a largura final do dente do perfil usinado conforme o especificado. Assim, o dente da brocha do anel seguinte só usina a largura correspondente ao avanço por dente, não usinando a largura deixada pelo dente anterior que permanece inalterada.

Região 4 – da mesma forma que ocorre na região 1 essa região é utilizada com reserva da ferramenta para garantir o dimensional final da peça, os 4 dentes dessa região possuem o mesmo diâmetro externo. Os 4 últimos dentes da região possuem ângulo de folga de 0° com uma distância de 0,5mm da aresta de corte e 1° no restante do comprimento.

A figura 5.10 mostra em detalhe as dimensões dos dentes da brocha e a figura 5.11 mostra o desenho da brocha com indicação das regiões.

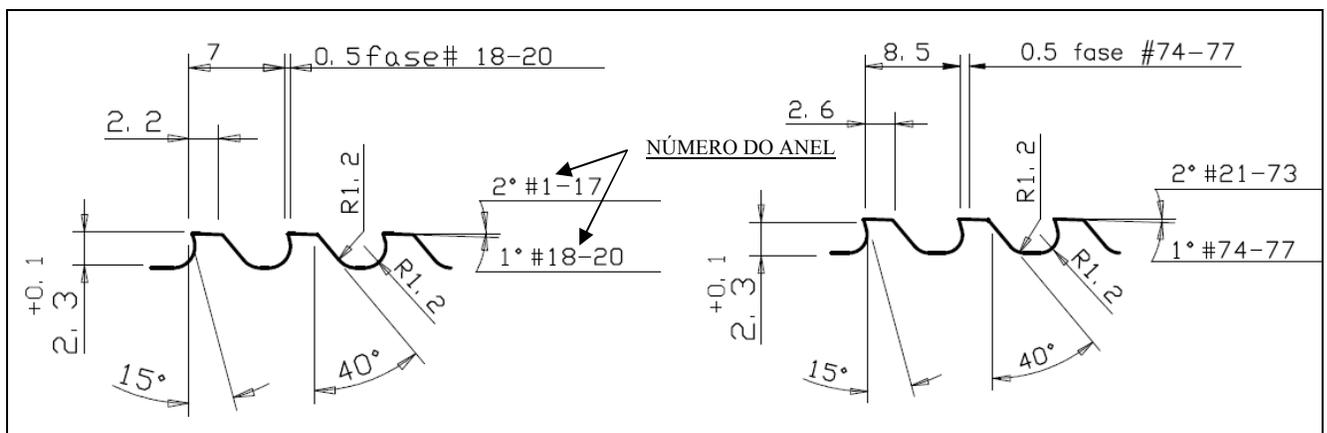


Figura 5.10: Detalhe das dimensões dos dentes da brocha.

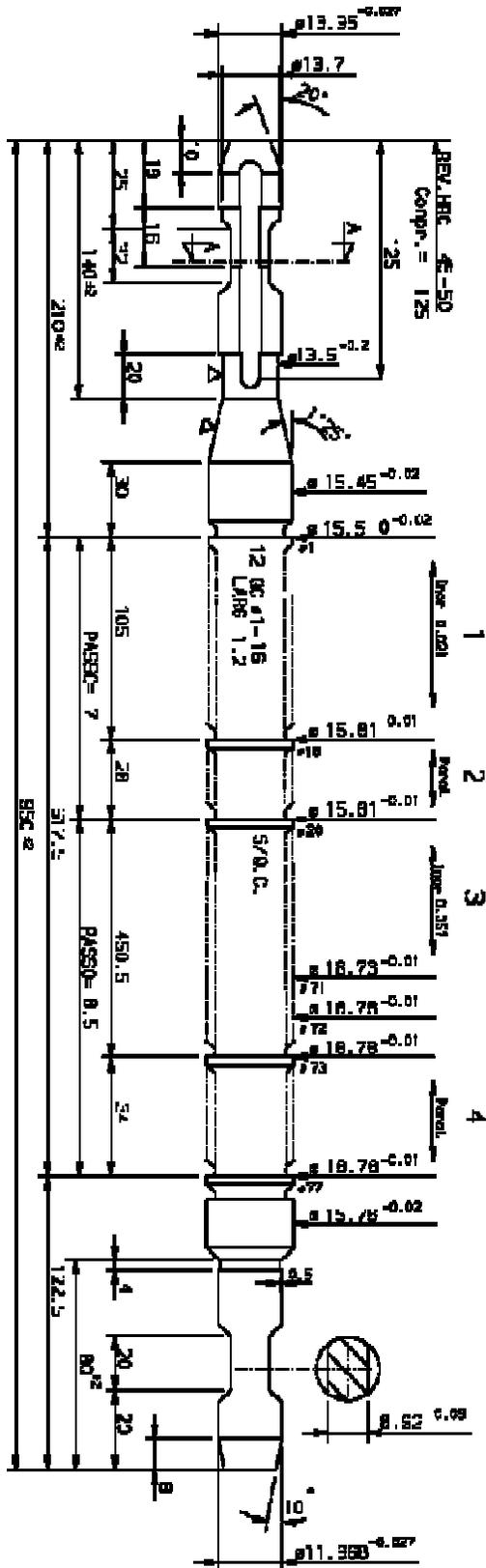


Figura 5.11: Desenho da Brocha.

5.1.3. Dureza das brochas.

A figura 5.12 mostra os valores de dureza encontrados nas brochas utilizadas nos ensaios. Esses valores correspondem aos valores de dureza do substrato das brochas, ou seja, a dureza do aço rápido M2 e o aço rápido sinterizado, já que não houve a possibilidade de medição de dureza só das camadas de revestimento devido à falta de equipamento que pudesse realizar essa medição.

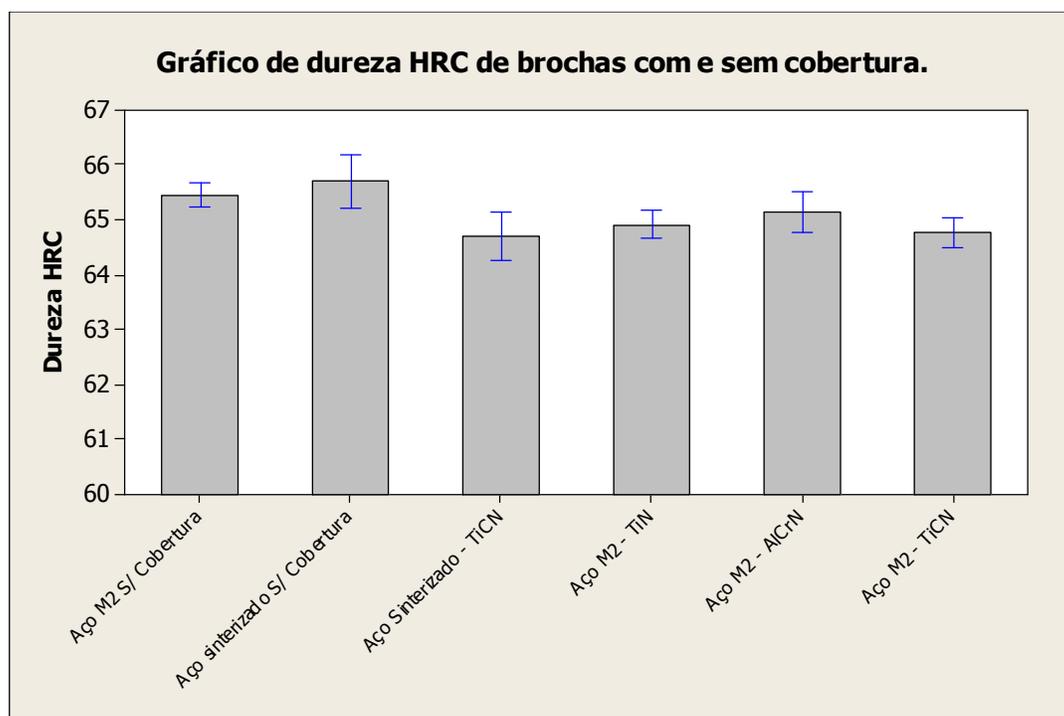


Figura 5.12: Valores de dureza HRC para brochas com e sem cobertura.

A figura 5.12 mostra que as durezas encontradas foram ligeiramente maiores para as brochas que não receberam qualquer tipo de cobertura, isso devido ao fato dessas brochas não terem passado pelo processo de revestimento PVD, utilizado para realizar a cobertura nas demais brochas, que aquece a ferramenta entre 400 e 600°. Esse aumento de temperatura causa a redução da dureza por revenimento no material da brocha.

5.2 Método para a execução dos ensaios.

Para a realização dos ensaios foram seguidos os seguintes procedimentos:

- A velocidade de corte utilizada foi de 8m/min.
- O brochamento foi realizado com refrigeração externa com emulsão de óleo sintético Plantocool da empresa Fuchs do Brasil e água, sendo que a concentração do óleo na água ficava entre 9 e 11%.
- Foram utilizadas 6 brochas diferentes. Duas brochas construídas com aço rápido sinterizado, uma sem cobertura e a outra com cobertura TiCN e quatro brochas construídas com aço rápido M2. Uma delas não recebeu cobertura e as outras três receberam cobertura diferentes: TiN, TiCN e AlCrN. As brochas eram reafiadas em sua superfície de saída, ao final de cada ensaio, sendo que para os ensaios das brochas com cobertura as ferramentas foram reafiadas e recobertas. Nas réplicas dos ensaios a mesma brocha recebeu sempre o mesmo tipo de cobertura.
- No terceiro ensaio de vida das brochas de aço rápido M2 com cobertura de TiN, TiCN e AlCrN foi medido o perfil interno da peça. A cada 1000 peças brochadas, uma peça era retirada para a medição de todos os vãos do perfil. As peças eram medidas entre esferas a uma altura fixa de 5mm da face, no lado da entrada da brocha na peça durante o brochamento.
- Um ensaio era considerado encerrado quando 20% dos anéis da brocha responsáveis pela usinagem do perfil da peça, ou seja 11 dentes, apresentavam pelo menos um dente com desgaste V_B igual ou superior a 0,15mm. A região de desbaste do diâmetro interno sempre apresentou desgaste superior quando comparado com a região de usinagem do perfil interno. Como essa operação de desbaste não define a dimensão final da peça, apesar de terem sido medidos os valores de desgaste dos dentes desta região, os mesmos não foram levados em consideração para definição do final do ensaio.
- A medição da pressão no brochamento foi realizada nas brochas em aço rápido M2 sem cobertura e para as brochas com cobertura TiN, TiCN e AlCrN. A pressão era medida a cada 1000 peças brochadas e foi realizada até o final de vida de cada ferramenta. Apesar

da máquina utilizada no experimento sempre trabalhar com 03 ferramentas ao mesmo tempo, para o teste só se trabalhou com uma brocha de cada vez.

- Para a determinação da dureza das brochas foram feitas 10 medições HRC. Não foi possível medir a dureza nos dentes, devido ao fato deles não possuírem uma área suficiente para a medição. Com isso a dureza foi realizada em 5 pontos no piloto inferior e 5 pontos no piloto superior da brocha (Ver figura 2.1), o mais próximo possível dos dentes da ferramenta. Desejava-se medir a dureza da camada de cobertura da brocha, porém isso não foi possível devido à falta de equipamento específico para a medição de micro dureza.
- Todos os ensaios foram realizados pelo menos 2 vezes. Quando o valor de vida da ferramenta diferia em mais de 20% do valor obtido em ensaio idêntico, um terceiro ensaio era realizado na mesma condição.

Capítulo 6

Resultados e discussões

6.1. Vida das Brochas

Foram realizados quatro conjuntos de ensaios para analisar a vida das brochas. No primeiro conjunto foi comparada a vida de brochas sem coberturas com dois tipos diferentes de material, o aço rápido convencional M2 e o aço rápido sinterizado ASP® 2030, que a partir de agora será descrito apenas como aço rápido sinterizado. Fez-se somente uma réplica nos ensaios deste conjunto devido à diferença entre as réplicas serem inferiores a 20%, conforme descrito anteriormente. No segundo conjunto de ensaios foi comparado a vida de brochas construídas em aço convencional M2 com três tipos diferentes de cobertura, TiN, TiCN e AlCrN. O objetivo desse conjunto foi definir qual cobertura teria o melhor rendimento para ser utilizada no quarto e último conjunto de ensaios, que será descrito logo a frente. No terceiro conjunto também foi analisado qual seria a redução no rendimento das ferramentas quando, ao final de uma vida, as brochas fossem reafiadas, porém sem receber nova cobertura, ficando com a superfície de saída do dente sem revestimento, fazendo com que o cavaco tivesse contato direto com o substrato da brocha durante o brochamento. No quarto conjunto de ensaios comparou-se os dois tipos de aço rápido, o M2 e o aço sinterizado, com a cobertura TiCN, que foi definida como a cobertura a ser utilizada neste ensaio devido aos resultados obtidos no segundo conjunto de ensaios descrito acima.

6.1.1. Conjunto de ensaios 1- Brocha de aço rápido M2 e aço rápido sinterizado.

Nesse conjunto de ensaios, como descrito anteriormente, foi analisado qual a influência da brocha fabricada com aço rápido sinterizado no rendimento da ferramenta, quando comparado com o aço rápido convencional M2.

Verificou-se que não houve uma diferença significativa na vida da brocha quando utilizado o aço rápido sinterizado, como mostra a figura 6.1.

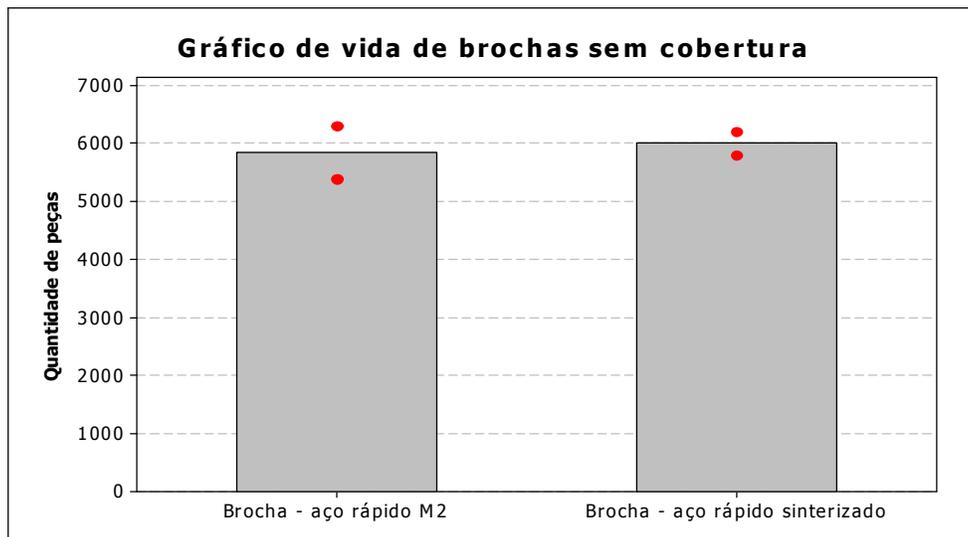


Figura 6.1: Vida de brochas de aço rápido M2 e aço rápido sinterizados sem cobertura.

Na figura 6.1, é possível se notar que em cada coluna da média dos valores existem dois pontos. Os pontos equivalem ao menor e ao maior valor obtido para cada ensaio e não ao desvio padrão, pois este perde um pouco de sentido, devido à quantidade reduzida de réplicas.

Analisando-se os resultados obtidos, apesar da brocha de aço sinterizado apresentar uma dispersão menor nos valores e média acima dos valores do aço rápido convencional, a diferença entre as médias é muito baixa, menor que 3%. Assim sendo, não é possível afirmar que a brocha de aço rápido sinterizado possui rendimento, em relação à quantidade de peças brochadas, melhor do que a brocha construída em aço rápido M2.

6.1.2. Conjunto de ensaios 2 – Brocha de aço rápido M2 com cobertura de TiN, TiCN e AlCrN.

A figura 6.2 mostra os resultados do segundo conjunto de ensaios, que comparou a vida de brochas construídas em aço rápido M2 com três diferentes tipos de cobertura, TiN, TiCN e AlCrN.

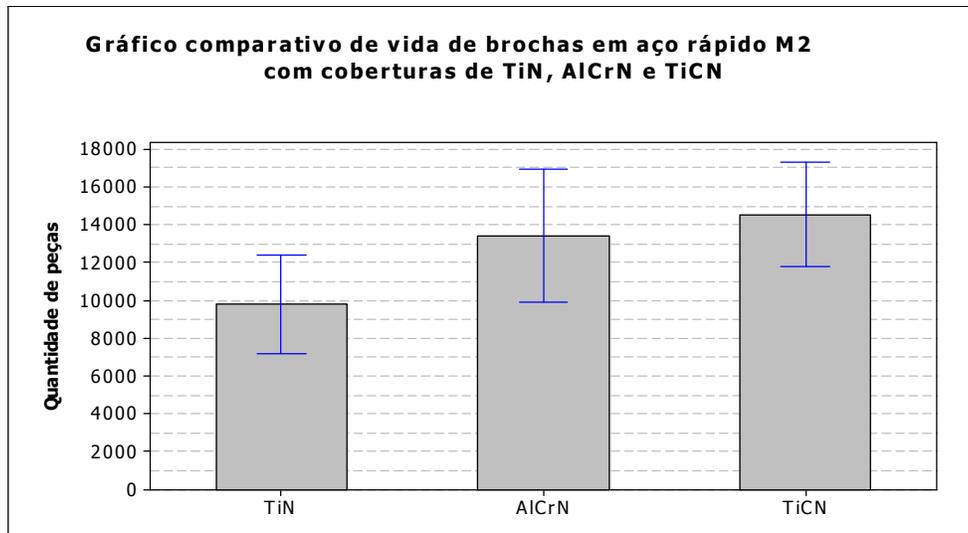


Figura 6.2: Comparação de brochas em aço rápido com coberturas de TiCN, AlCr e TiN.

Na figura 6.2 é possível verificar no primeiro momento que a brocha com cobertura TiCN apresentou, na média, o melhor rendimento entre as coberturas, principalmente quando comparada com a brocha de TiN. A brocha com TiCN atingiu vida, em quantidade de peças brochadas, 46% superior comparada com a brocha com cobertura de TiN. Quando a mesma brocha é comparada com a brocha que recebeu a cobertura de AlCrN essa diferença a favor da cobertura TiCN cai para apenas 8,5%. Através de um teste de hipótese, para comparação das médias, feito por um programa estatístico, com o desvio padrão apresentado pelas amostras, não é possível afirmar estatisticamente que as coberturas de AlCrN e TiCN, quando comparada a quantidade de peças usinadas, são diferentes. O menor rendimento da cobertura de TiN em relação as coberturas de AlCrN e TiCN pode ser explicado pela menor dureza que essa cobertura apresenta que, conforme o fabricante é de 2300HV, enquanto que a cobertura de TiCN apresenta dureza de 3000HV e a cobertura de AlCrN possui dureza de 3200HV.

Na figura 6.3 podemos observar os valores de vida em peças brochadas resultantes do ensaio 1, brochas sem cobertura, e ensaio 2, brochas com coberturas.

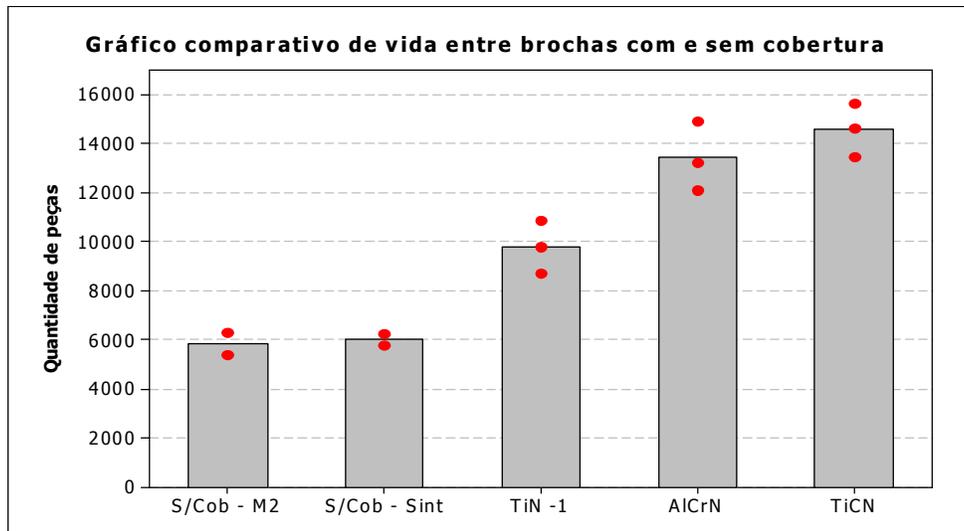


Figura 6.3: Comparação entre brochas sem cobertura e brochas com cobertura.

Conforme mostra a figura 6.3, as brochas que receberam cobertura apresentaram rendimento bem superior quando comparado com as brochas que não receberam cobertura. Mesmo a brocha com cobertura de TiN, que apresentou o menor rendimento entre as brochas com cobertura, apresentou um resultado médio de 68% superior quando comparado com a brocha M2 e 63% superior à brocha sinterizada, ambas sem cobertura. Quando essa mesma comparação é feita com as ferramentas com coberturas de AlCrN e TiCN no lugar da cobertura de TiN, a diferença aumenta expressivamente para 130% e 123% a favor da brocha com AlCrN e 149% e 142% a favor da brocha com cobertura de TiCN. Isso é facilmente explicado pelo grande aumento da dureza superficial das ferramentas causado pela aplicação dos revestimentos.

6.1.3. Conjunto de ensaios 3 – Brochas reafiadas sem receber nova cobertura.

O objetivo desse ensaio era verificar qual seria o comportamento das brochas, em relação ao número de peças brochadas por vida, quando ao término da vida, na qual a ferramenta recebeu cobertura total, a mesma fosse reafiada em sua superfície de saída sem receber nova cobertura,

fazendo com que o cavaco durante o brochamento tivesse contato direto com o substrato da brocha, neste caso o aço rápido M2.

A figura 6.4 mostra os resultados dos ensaios de vida com brochas com cobertura total, brochas sem cobertura na superfície de saída e brochas sem cobertura.

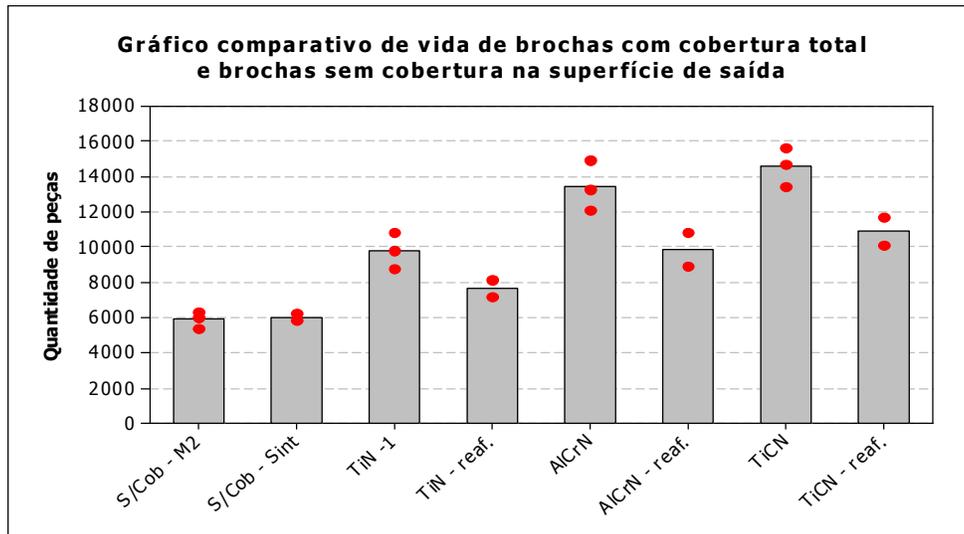


Figura 6.4: Comparação de vida de brochas com cobertura total, brochas sem cobertura na superfície de saída e brochas sem cobertura.

Analisando-se a figura 6.4, podemos verificar que, apesar das brochas sem cobertura na superfície de saída apresentarem redução na vida para todos os tipos de cobertura, a redução foi pequena. Na média houve decréscimo na vida da brocha de aproximadamente 25%. Porém quando fazemos a comparação com as brochas que não receberam qualquer tipo de cobertura, as brochas reafiadas, que permaneceram com cobertura na superfície de folga, apresentaram aumento no número de peças brochadas por vida da ferramenta de aproximadamente 30% no caso das brochas com TiN, 68% para AlCrN e 86% para as brochas com TiCN. O ensaio demonstrou que a cobertura melhora o desempenho da brocha não apenas na primeira vida da brocha, quando a mesma está com cobertura em toda a sua superfície, mas também quando a brocha é reafiada e não recoberta. Uma possível razão para o bom rendimento das brochas sem revestimento na superfície de saída é que, conforme veremos adiante, não temos a presença de desgaste de cratera que poderia fragilizar a aresta de corte, gerando maiores desgastes sendo que a cobertura ainda permanece na superfície de folga, que, é a região que fica em atrito com a peça durante o brochamento.

Para definir qual seria a melhor forma de trabalho, se revestir a brocha apenas uma vez no início da vida e somente reafiar a mesma até a utilização total da ferramenta ou sempre revestir após cada reafiação, deve-se fazer uma análise mais detalhada de custo benefício que cada método pode proporcionar.

6.1.4. Conjunto de ensaios 4 – Brocha com aço rápido sinterizado e cobertura de TiCN.

O objetivo do quarto ensaio era comparar a cobertura que apresentasse o melhor rendimento em relação ao número peças brochadas testadas no ensaio 3, com dois diferentes tipos de substrato, o aço rápido M2 e o aço rápido sinterizado. Apesar de estatisticamente, as brochas com coberturas de AlCrN e TiCN não apresentarem diferença significativa entre os valores de vida, conforme visto anteriormente no ensaio 2, foi decidido utilizar a cobertura de TiCN tomando como base o valor da média de vida das brochas que, apesar de pequena foi favorável a cobertura de TiCN. Além disso, teve mais peso na decisão o custo da cobertura de TiCN que, na data dos ensaios era 30% menor que o custo da cobertura de AlCrN. Para essa comparação não foram repetidos os ensaios com brochas de aço rápido M2 e cobertura TiCN. Os dados de vida da brocha de aço sinterizado foram comparados com os resultados obtidos no ensaio 3, conforme a figura 6.5.

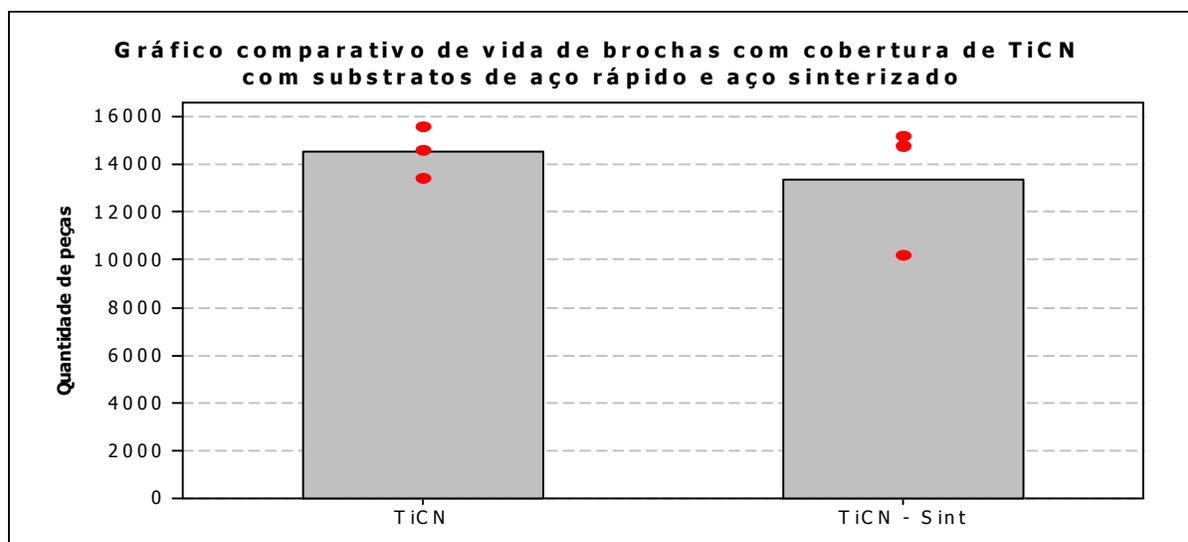


Figura 6.5: Gráfico comparativo de vida de brochas com cobertura de TiCN com substratos de aço rápido e aço sinterizado.

Conforme mostra o gráfico 6.5, a brocha com substrato de aço sinterizado apresentou um rendimento inferior à brocha com o substrato de aço rápido M2 quando comparamos as médias dos valores. Porém, novamente através de um teste de hipótese, para a comparação das médias, feito por um programa estatístico, não é possível afirmar estatisticamente que existe diferença entre os dois tipos de substratos, quando comparado à quantidade de peças usinadas por brocha. Era esperado que, devido às melhores propriedades do aço rápido sinterizado como a resistência ao desgaste e dureza à quente, o rendimento desse tipo de aço fosse melhor quando comparado ao aço rápido M2 o que não ocorreu, tanto na comparação com as brochas sem cobertura como nas brochas com revestimento de TiCN . Uma possível explicação, seria o fato de a usinagem ocorrer em baixa velocidade de corte (8m/min) gerando temperaturas abaixo daquela que o aço sinterizado pode suportar, e igualando-se assim, nessas condições, ao aço rápido M2.

6.2. Dimensão do perfil interno

Com o objetivo de verificar o comportamento da dimensão do perfil interno durante a vida das brochas, foi realizado a medição do perfil interno no terceiro ensaio de vida das brochas de aço rápido M2 para a condição com coberturas de TiN, AlCrN e TiCN. A especificação do valor entre esferas do perfil interno deve estar compreendido entre 14,381 e 14,442mm. As figuras 6.6, 6.7 e 6.8 demonstram os valores encontrados nas medições ao longo do ensaio. Isto significa que, o desgaste da brocha que usinou o furo medido, que cresce de medição em medição, não influenciou a dimensão entre esferas.

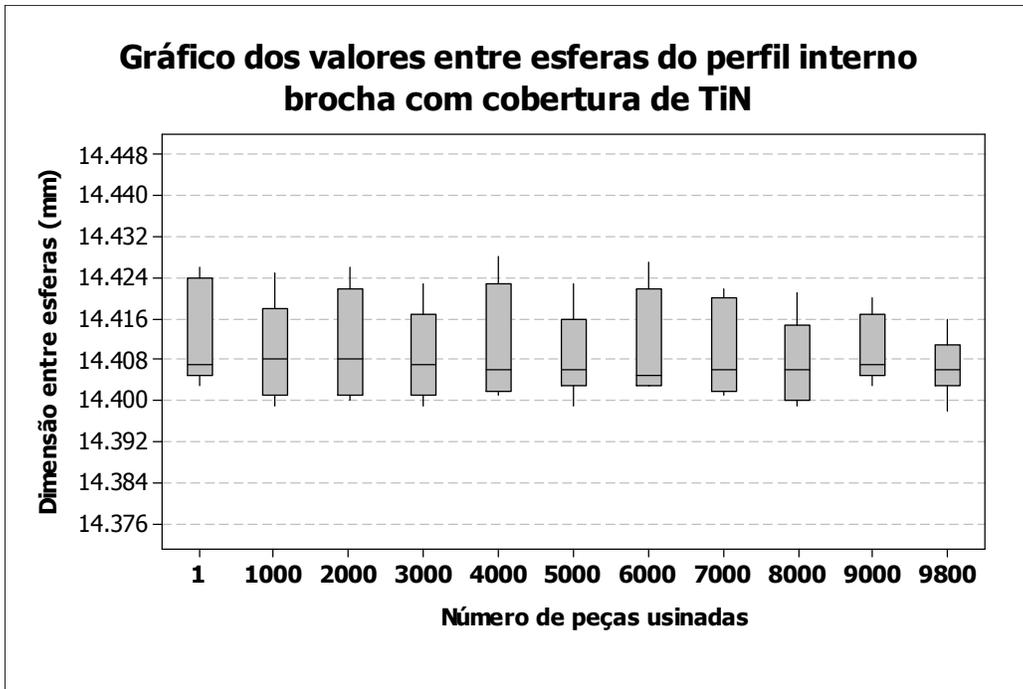


Figura 6.6: Valores entre esferas do perfil com brocha coberta TiN.

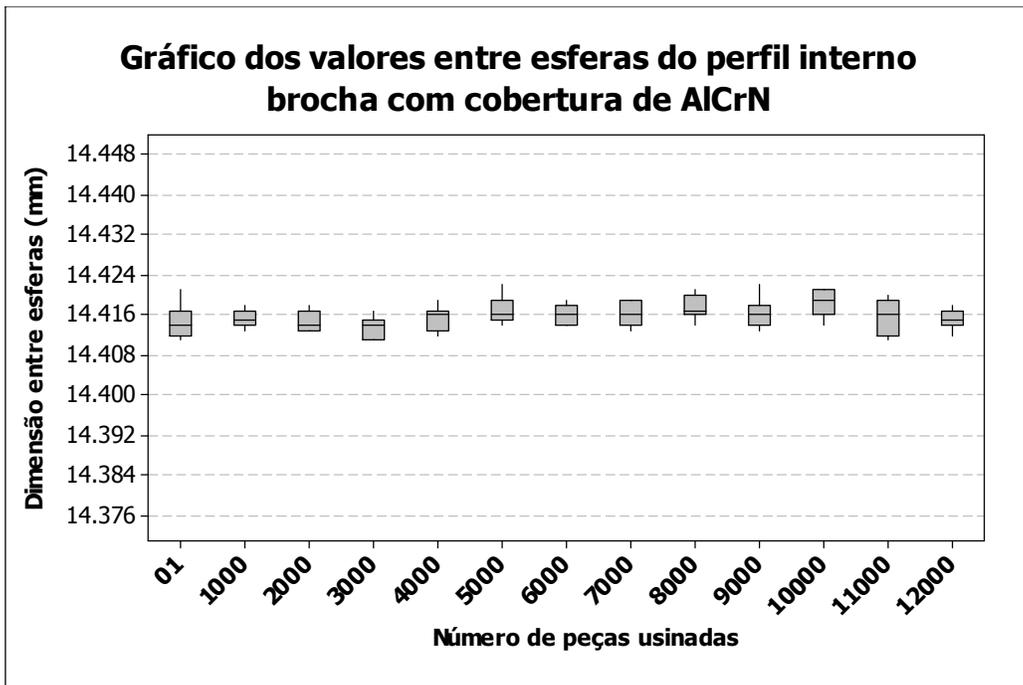


Figura 6.7: Valores entre esferas do perfil com brocha coberta AlCrN.

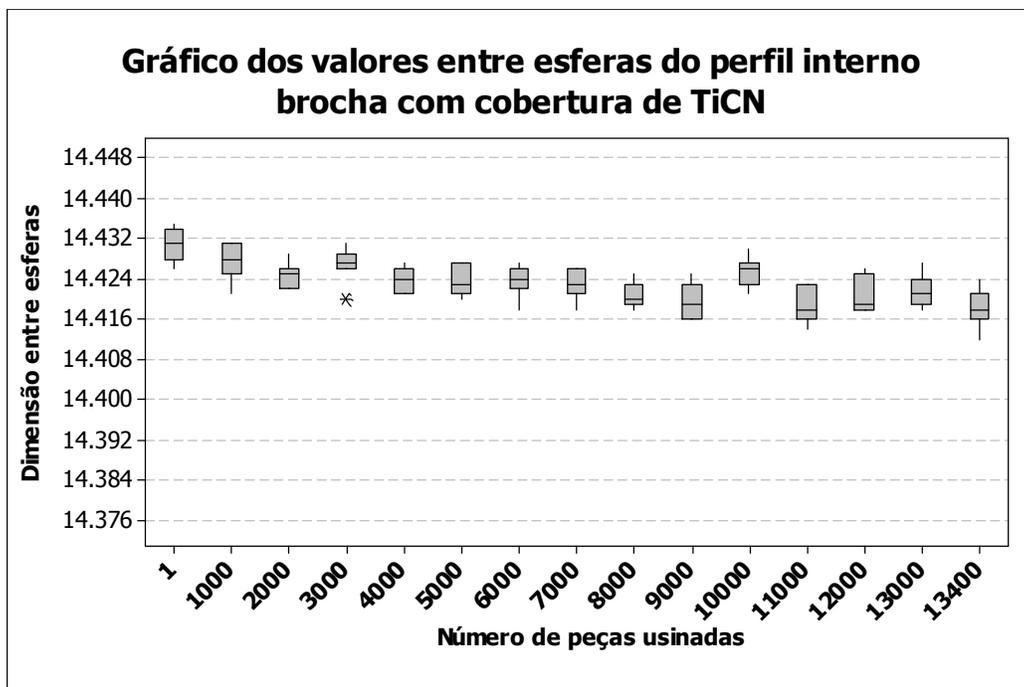


Figura 6.8: Valores entre esferas do perfil com brocha coberta TiCN.

A medição entre esferas equivale à distância entre dois vãos do perfil interno distanciados angularmente em 180°. Como o perfil interno da peça possui 14 vãos, cada medição gerou 7 valores para cada peça. As figuras 6.6, 6.7 e 6.8, mostram a variação dimensional do perfil interno para cada par de vãos na mesma peça e em peças diferentes durante a vida das brochas. A variação encontrada entre os valores do perfil interno dentro da mesma peça é causada principalmente pela variação dimensional da brocha. Essa dimensão não apresentou grande variação durante a vida da ferramenta para as brochas com os três tipos de cobertura. O mesmo ocorreu quando se analisa a variação dimensional entre peças, que também não apresentou grande variação dimensional. Era esperado que os desgastes das brochas causassem variação no dimensional do perfil da peça durante uma vida da ferramenta. Uma possível explicação para essa pequena variação seria a pequena redução no diâmetro que a brocha sofre quando o desgaste da superfície de folga da brocha atinge o critério de fim de vida da ferramenta. Um desgaste de 0,15mm na superfície de folga da brocha, que possui ângulo de folga máximo de 2°, causa redução no dente da brocha de apenas 0,005mm, conseqüentemente 0,01mm no diâmetro da brocha. Outra possível explicação seria que durante o brochamento cada dente usina somente à altura relativa ao avanço por dente, não alterando a largura usinada pelo dente anterior. Conforme podemos verificar esquematicamente na figura 6.9, o dente da brocha denominado como dente 2,

quando usina a peça não retira material na região usinada anteriormente pelo dente 1, o mesmo ocorre com o dente 3. Na prática isso ocorre do início até o fim da usinagem do perfil.

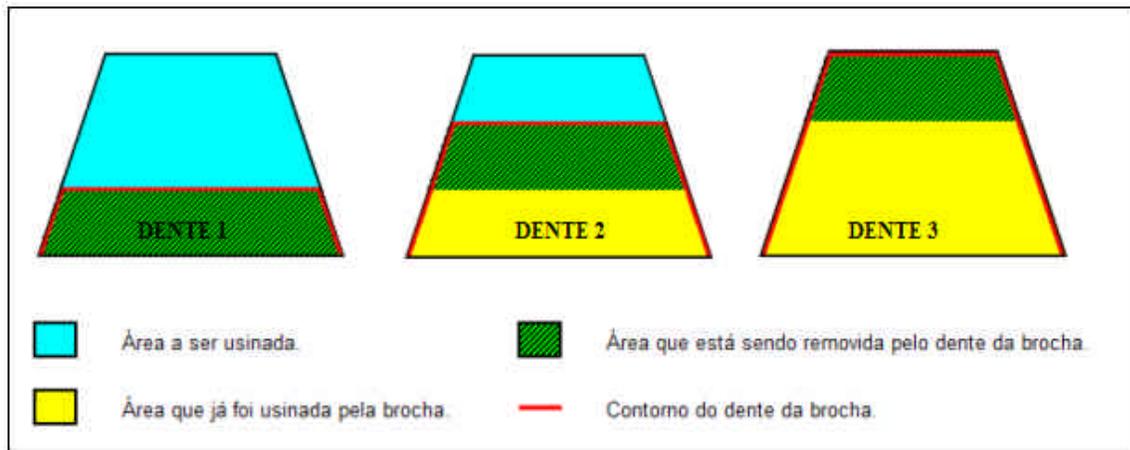


Figura 6.9: Esquema de usinagem dos dentes da brocha.

Conforme ocorre desgaste na aresta de corte e conseqüentemente no canto do dente, a largura usinada nessa região diminui. A região do dente da brocha que até o aparecimento do desgaste apenas passava pelo vão que já estava usinado pelo dente anterior, sem usinar, com o surgimento do desgaste começa a retirar o excesso de material no vão da peça deixado pelo desgaste do dente anterior. Isso ocorre nos demais dentes ao longo da brocha, fazendo com que a variação no dimensional do perfil seja pequena. A figura 6.10 mostra de forma esquemática o que ocorre na usinagem na presença de desgaste.

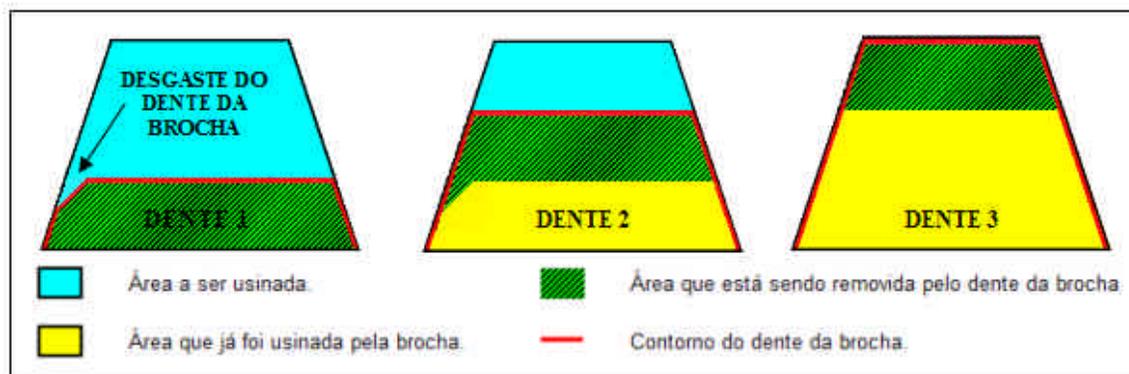


Figura 6.10: Esquema de usinagem dos dentes da brocha na presença de desgaste.

Para evitar que o dente da brocha, durante a usinagem da peça, não tenha atrito da sua aresta lateral com a região da peça que já foi usinada pelo dente anterior, prejudicando o

acabamento superficial do perfil, a brocha é construída de forma que o primeiro dente, para um mesmo ponto do perfil da peça, é mais espesso que todos os dentes seguintes. Do primeiro ao último dente que usina o perfil interno, para um mesmo ponto, existe redução da largura do dente de 0,036mm.

6.3. Pressão no brochamento

Uma das características dos revestimentos é o baixo coeficiente de atrito que faz com que o corte aconteça com esforços menores (DINIZ, MARCONDES, COPPINI, 2003). Na tentativa de verificar a influência da cobertura nos esforços de corte durante o brochamento foi realizado o monitoramento dos esforços de corte que, conforme descrito anteriormente, foi realizado de maneira indireta. A melhor forma encontrada para esse experimento foi monitorar o aumento dos esforços de corte através do aumento da pressão do sistema hidráulico da brochadeira, já que com o aumento do esforço de corte temos um aumento na pressão do cilindro. Antes de avaliarmos a variação da pressão com os diferentes tipos de brochas, foi verificada a variação da pressão apenas deslocando em vazio o carro superior e inferior da brochadeira simulando um brochamento. A diferença entre os valores de pressão encontrados no movimento em vazio e o no movimento durante o brochamento de uma peça foi causado pelo esforço de corte na operação. A figura 6.11 mostra a variação da pressão no sistema hidráulico da brochadeira simulando o brochamento, porém sem o esforço de corte e a figura 6.12 mostra a variação da pressão no sistema hidráulico da brochadeira durante o brochamento. Os resultados mostrados representam a média de 5 valores e, conforme descrito anteriormente, apesar da brochadeira sempre trabalhar com três brochas ao mesmo tempo, para a realização dos testes em que a potência era medida, foi utilizado somente uma brocha de cada vez.

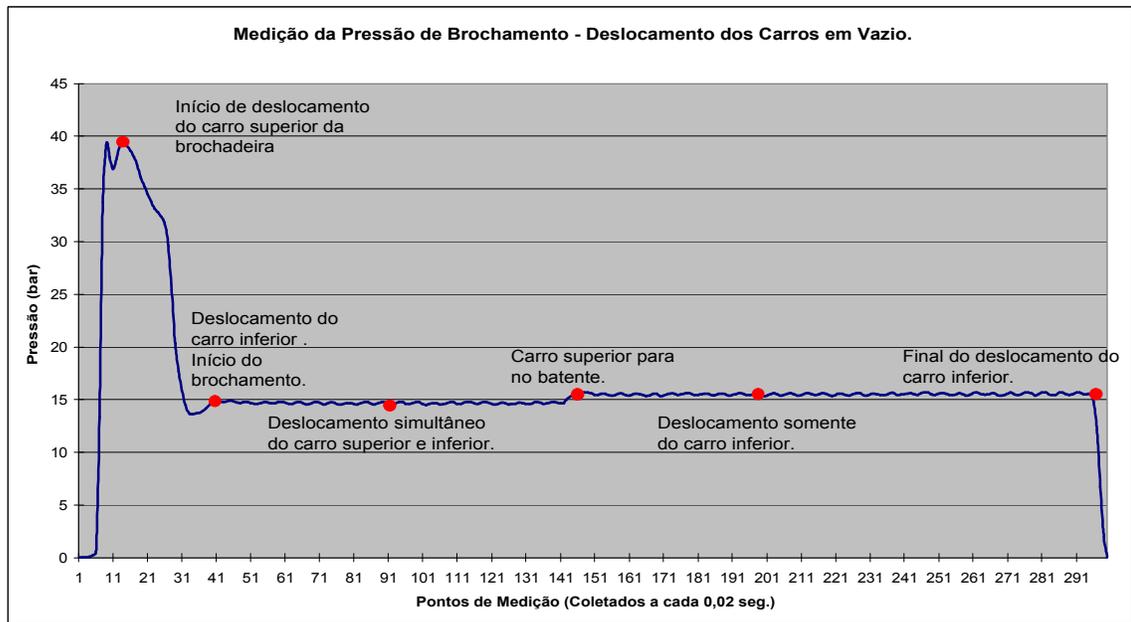


Figura 6.11: Variação da pressão no sistema hidráulico da brochadeira com os carros movimentando em vazio.

Para uma melhor visualização e análise dos valores obtidos, os gráficos de valores de pressão que serão mostrados adiante são os valores líquidos de pressão. Estes valores foram encontrados subtraindo os valores encontrados nos experimentos com os valores do deslocamento dos carros em vazio, mostrados na figura 6.11.

Era esperado que a pressão no sistema hidráulico da brochadeira fosse menor durante o brochamento da peça utilizando as brochas com cobertura. Porém, conforme podemos observar na figura 6.12, isso não ocorreu. A brocha sem cobertura apresentou uma menor pressão durante o brochamento quando comparada com as brochas que receberam cobertura. Quando comparamos a pressão durante o brochamento das brochas com TiN, AlCrN e TiCN, não podemos notar grande diferença. Isso pode ser explicado pelos valores muito próximos dos coeficientes de atrito dessas cobertura que variam de 0,35 a 0,40 . Uma das possíveis razões para o aumento da pressão com a utilização das brochas com revestimento, seria o aumento dos esforços de corte causado pelo arredondamento que a cobertura causa na aresta de corte, mesmo sendo essas coberturas PVD com espessura de apenas alguns micros. Outra possibilidade seria que, devido à brocha sem cobertura ser nova, com sua geometria em perfeitas condições, pois foi utilizada pela primeira vez no experimento e as brochas com revestimento terem sido usadas nos

experimentos anteriores e reafiadas 6 vezes, essas brochas poderiam estar com sua geometria alterada por desgastes causados nos experimentos anteriores, que não foram completamente eliminados na afiação, alterando de alguma forma sua geometria e fazendo com que o corte não ocorresse de forma adequada.

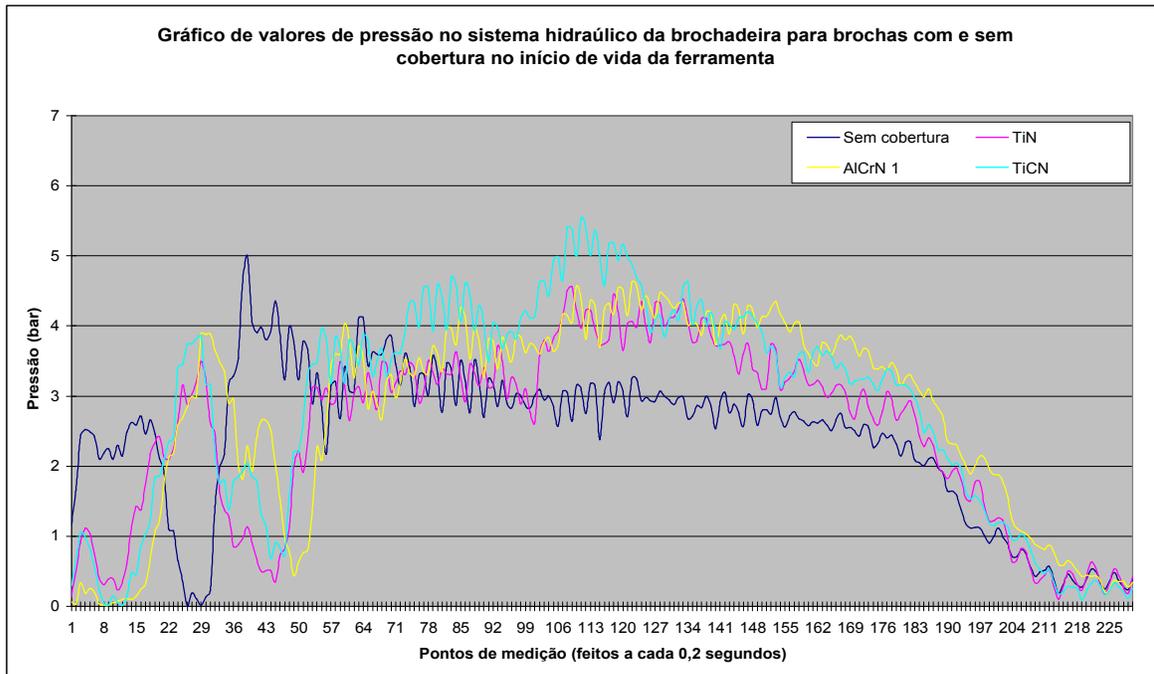


Figura 6.12: Pressão no sistema hidráulico da brochadeira com brochas sem cobertura e com cobertura de TiN, AlCrN e TiCN no início de vida da ferramenta.

De acordo com a figura 6.13, até o final da vida das ferramentas, ocorreu um ligeiro aumento nos valores de pressão no sistema hidráulico da máquina, provavelmente causado pelo aumento dos esforços de corte, gerado pela deterioração da aresta de corte com o desgaste. Podemos notar também que a diferença nos valores da pressão entre as diferentes brochas, encontrados no início da vida das brochas, se manteve praticamente o mesmo no final de vida da ferramenta.

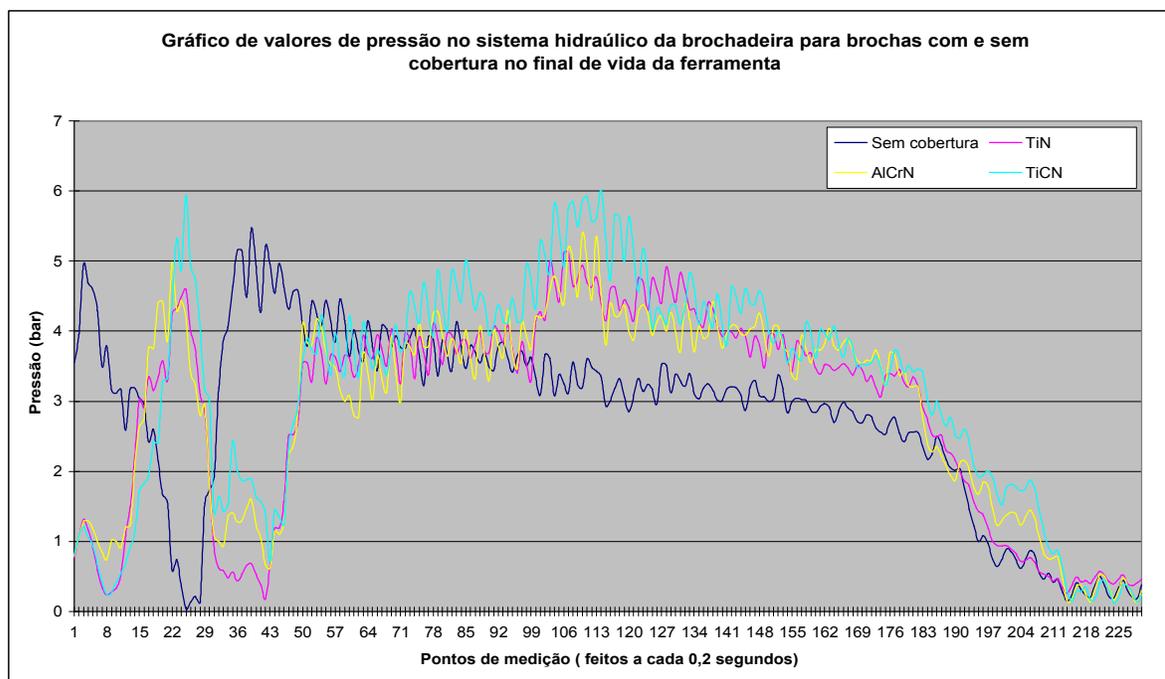


Figura 6.13: Pressão no sistema hidráulico da brochadeira com brochas sem cobertura e com cobertura de TiN, AlCrN e TiCN no final de vida da ferramenta.

Quando fazemos a média da pressão durante o brochamento nas regiões da brocha responsáveis pela usinagem do diâmetro interno (região 1 e 2) e pela usinagem do perfil (região 2 e 3), no início e no final de vida das brochas, conforme mostra a figura 6.14, fica fácil perceber o aumento que ocorreu na pressão de brochamento com o surgimento do desgaste do dente. Podemos notar também que, a brocha sem cobertura, apresentou na regiões 1 e 2 uma pressão de brochamento superior quando comparado com as brochas com cobertura. A maior pressão encontrada nessas regiões é causada pelo maior volume de material usinado, quando comparado com a brochas com cobertura, pois a brocha sem cobertura não sofreu ainda nenhuma afiação, estando com o diâmetro externo inalterado, diferente das brochas com cobertura que, no momento desses ensaios, já sofreram diminuição no diâmetro externo devido à afiações, removendo um volume menor de material da peça.

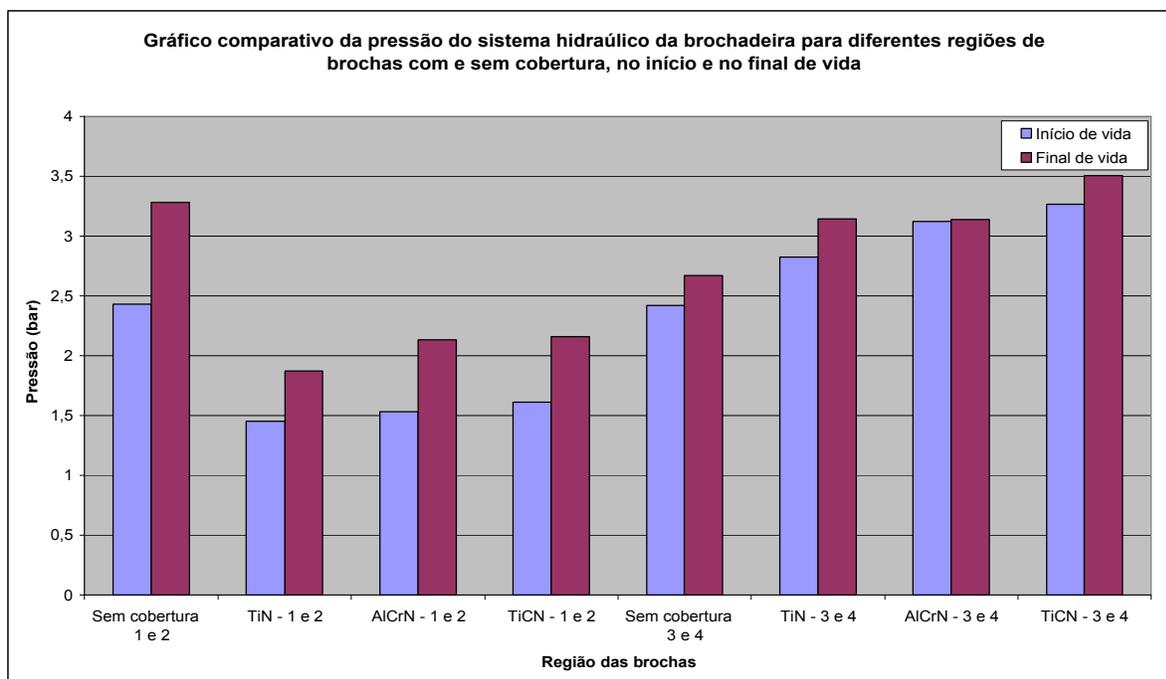


Figura 6.14: Comparação da pressão do sistema hidráulico da brochadeira para diferentes regiões de brochas com e sem cobertura, no início e final de vida.

Para analisar, se a afiação das ferramentas poderia ter alterado os valores de pressão do sistema hidráulico da brochadeira durante a usinagem ou se esse resultado era em razão do arredondamento que a cobertura causou na aresta de corte. Assim, decidiu-se realizar um novo experimento que consistia em medir a pressão das mesmas brochas, antes e depois de receber o revestimento. No teste foram utilizadas duas brochas novas as quais brocharam 5 peças antes e 5 peças após a aplicação do revestimento de TiCN

Para que não houvesse influência da temperatura nos resultados, devido à alteração da viscosidade do óleo hidráulico usado, todas as peças desse ensaio foram usinadas com o óleo hidráulico a uma temperatura de 40°C, sendo os valores de temperaturas obtidos através de um termômetro que fica acoplado no tanque de óleo hidráulico da brochadeira. A figura 6.15 e 6.16 mostram os valores encontrados no experimento.

Como podemos observar nas figuras 6.15 e 6.16, a cobertura de TiCN não proporcionou redução na pressão no sistema hidráulico durante o brochamento e sim um pequeno aumento, provavelmente devido ao aumento dos esforços de corte causado pelo arredondamento da aresta de corte gerada pela camada de cobertura. Não é possível afirmar que, a diferença nos valores de

pressão encontrados quando comparamos a brocha sem cobertura com as brochas que receberam revestimento (figura 6.14), foram causados somente pelo arredondamento da aresta, pois, a diferença dos valores de pressão encontrados nos ensaios da figura 6.14 foi maior que a diferença encontrada no experimento que comparou as mesmas brocha, antes e após o recebimento da cobertura de TiCN (Figura 6.17). Isso reforça a idéia que existem outros fatores que influenciaram na diferença de pressão entre as brochas durante a usinagem. Como descrito anteriormente isso pode ter sido causado por desgastes que ainda permaneceram nas ferramentas mesmo após a reafiação ou devido à diferenças na construção das ferramentas, já que no primeiro caso as três brochas que receberam cobertura fazem parte de um mesmo lote de produção do fabricante da ferramenta e a brocha que não foi revestida faz parte de outro lote. Para o ensaio de pressão antes e após a cobertura as duas brochas também fazem parte de um mesmo lote de fabricação.

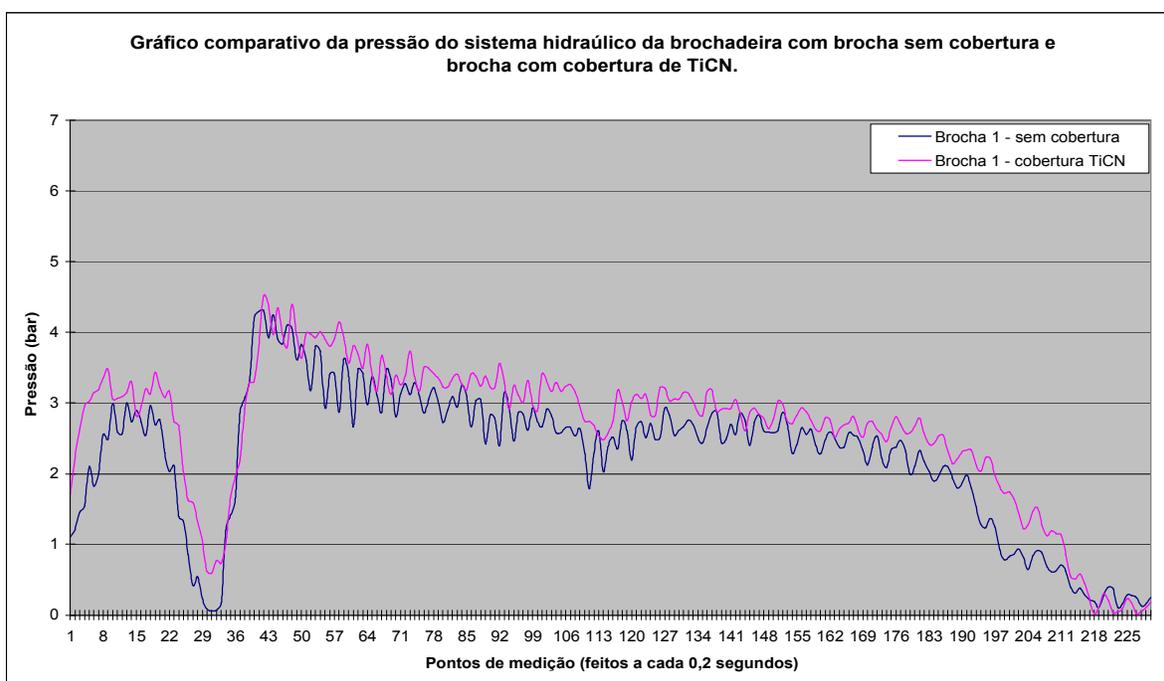


Figura 6.15: Comparação da pressão no sistema hidráulico da brochadeira com brochas sem cobertura e com cobertura TiCN – Brocha 1.

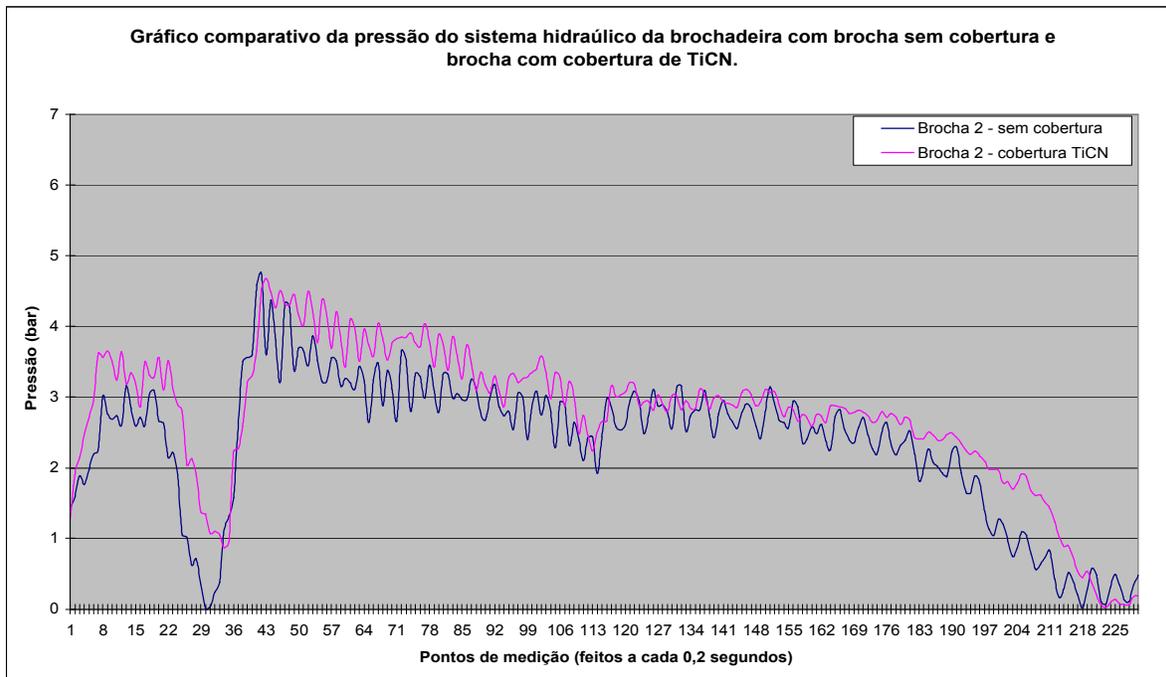


Figura 6.16: Comparação da pressão no sistema hidráulico da brochadeira com brochas sem cobertura e com cobertura de TiCN- Brocha 2.

Novamente, quando dividimos e fazemos a média da pressão nas regiões responsáveis pela usinagem do diâmetro interno e do perfil, conforme mostra a figura 6.17, podemos notar que, nos dois casos, a região responsável pelo diâmetro interno apresentou maior valor de pressão na usinagem e fica também claro o aumento da pressão devido ao arredondamento da aresta de corte causado pela cobertura.

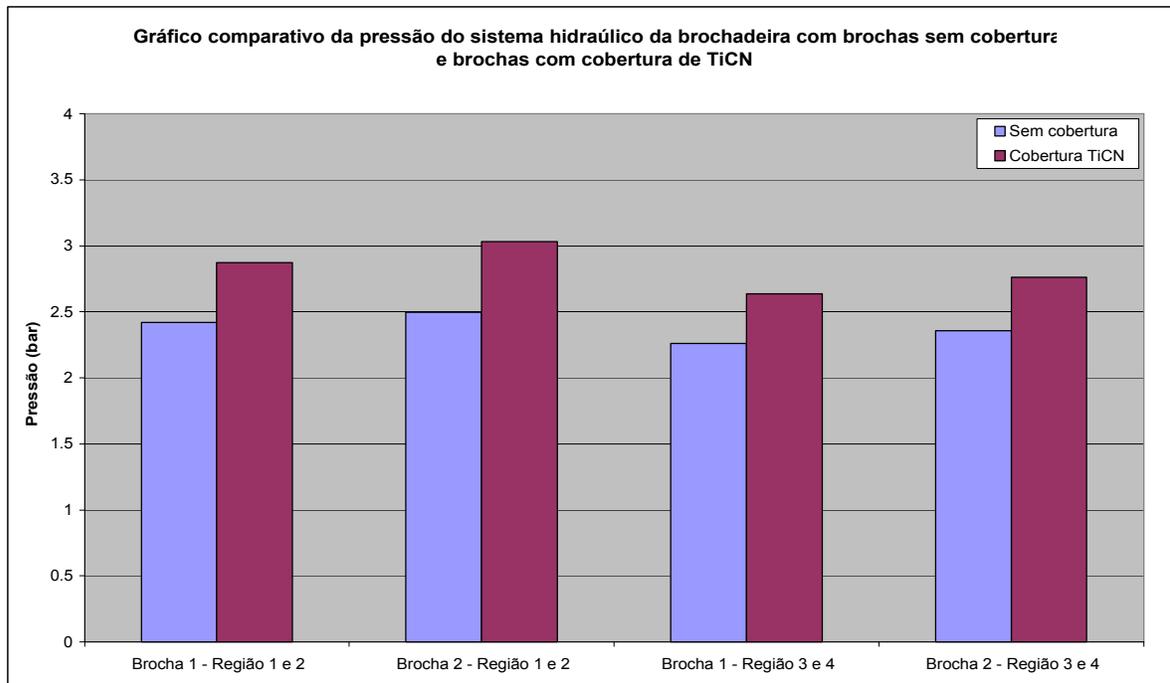
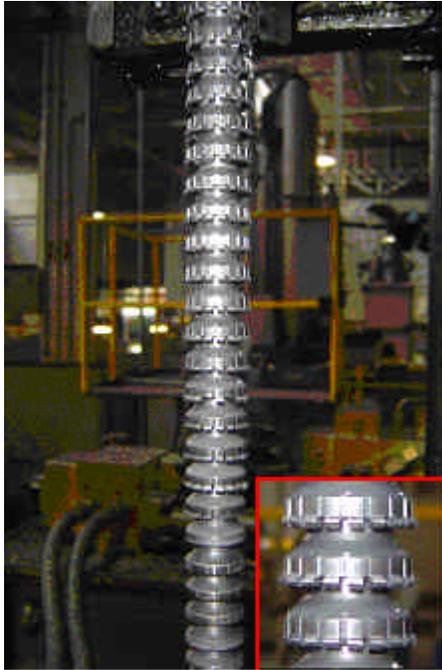


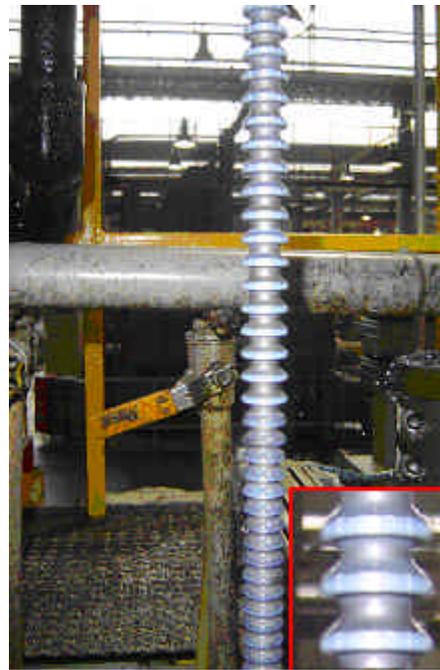
Figura 6.17: Comparação da pressão do sistema hidráulico da brochadeira com brochas sem cobertura e brochas com cobertura de TiCN.

6.4. Desgaste no brochamento

Um das características das camadas de revestimento é redução do caldeamento a frio, que evita a formação da aresta postiça de corte (DINIZ, MARCONDES, COPPINI, 2003). Isso ficou evidenciado nos ensaios quando brochamos uma peça com brocha sem revestimento e repetimos a usinagem com brocha revestida. Conforme mostra a figura 6.18a, na brocha sem cobertura os cavacos não são arrancados pelo fluxo de cavaco e os mesmos ficam presos à brocha, sendo que o mesmo não ocorre com as brochas cobertas, em que o cavaco é arrancado do canal da ferramenta pelo fluxo de emulsão utilizado no processo. A figura 6.18b mostra como a brocha fica sem cavacos nos canais após o brochamento. O cavaco preso ao canal da brocha pode, devido ao fluxo posterior de mais cavaco, se encruar formando uma aresta postiça de corte, aresta essa que cresce e, quando se rompe, arranca partículas da superfície de folga da ferramenta, causando um desgaste frontal muito grande.



a)



b)

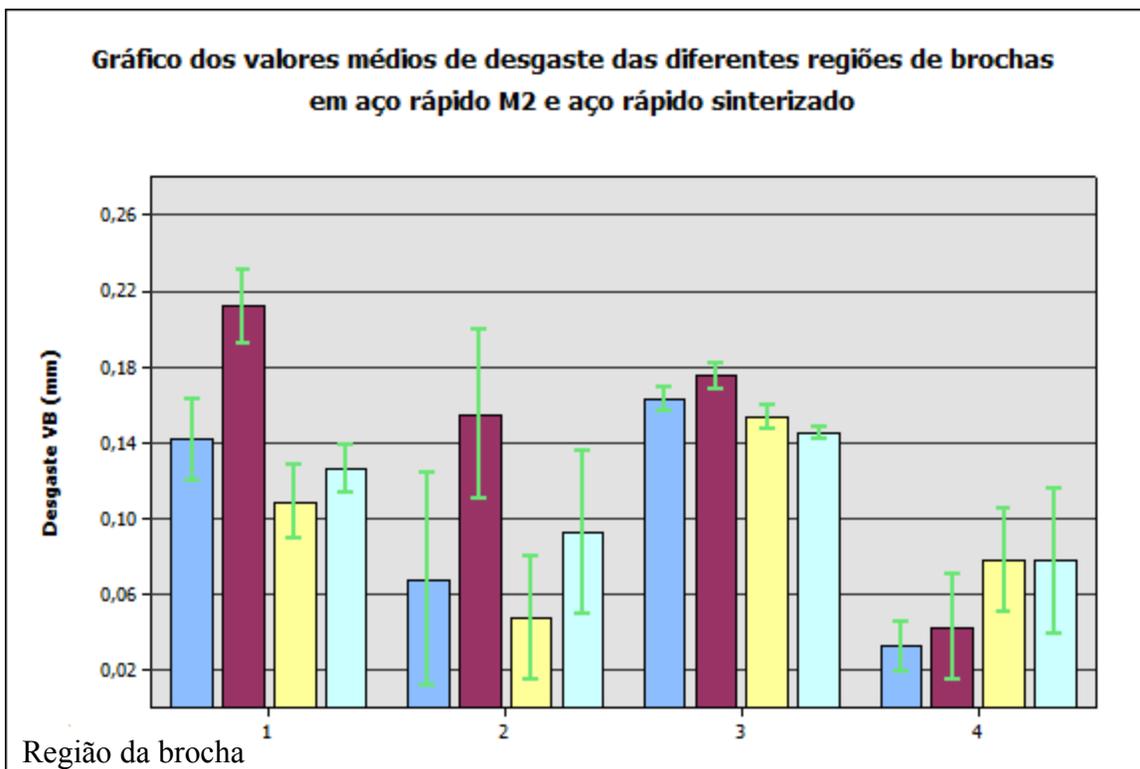
Figura 6.18: (a) brocha sem cobertura com cavacos presos nos canais, (b) brocha com cobertura de TiCN sem cavacos nos canais.

Conforme descrito anteriormente, o desgaste das brochas era acompanhado junto à máquina com uma lupa graduada com ampliação de 8 vezes. Esse acompanhamento era feito para cada 1000 peças brochadas, sendo que quando o desgaste V_B da brocha atingia o critério de final de vida da ferramenta, ela era levada para a máquina tridimensional ótica para que fosse realizada uma medição precisa dos valores de desgaste. A medição dos 77 anéis de cada brocha levava por volta de 2 horas. Devido a esse tempo elevado de medição e também pelo motivo da tridimensional ótica possuir uma carga de trabalho alta, já que ela é usada pela empresa para liberar peças da produção interna como peças produzidas por fornecedores externos, ficou inviável fazer o acompanhamento da evolução do desgaste V_B durante a vida das brochas. Para acompanhar a evolução do desgaste nos ensaios com as brochas a cada 1000 peças, iríamos precisar por volta de 35 medições por réplica, que levariam aproximadamente 70 horas de medição por ensaio. Outro motivo para o não acompanhamento da evolução do desgaste da ferramenta, é que as brochas não apresentam desgaste uniforme entre todos os dentes no mesmo anel e entre os anéis ao longo do comprimento da brocha. Sendo assim é quase impossível definir qual dente apresentará os maiores desgaste V_B ao final da vida da ferramenta. Durante o acompanhamento do desgaste pode ocorrer, por exemplo, que um dente vizinho ao que está sendo

acompanhado presente, na metade da vida da brocha, desgaste V_B superior, ganhando maior importância na definição de final de vida da brocha, quebrando com isso a lógica do acompanhamento da evolução do desgaste. Devido às dificuldades em acompanhar a evolução do desgaste V_B , conforme descrito anteriormente, os gráficos que serão mostrados adiante são relativos ao final de vida para cada ferramenta.

6.4.1. Desgaste das brochas sem cobertura

A figura 6.19 mostra os valores de desgaste obtidos no primeiro conjunto de ensaios, no qual foi comparada a vida de brochas sem cobertura com aço rápido M2 e aço rápido sinterizado.



Legenda:

■ Aço rápido M2 - Teste 1

■ Aço rápido M2 - Teste 2

■ Aço rápido sinterizado - Teste 1

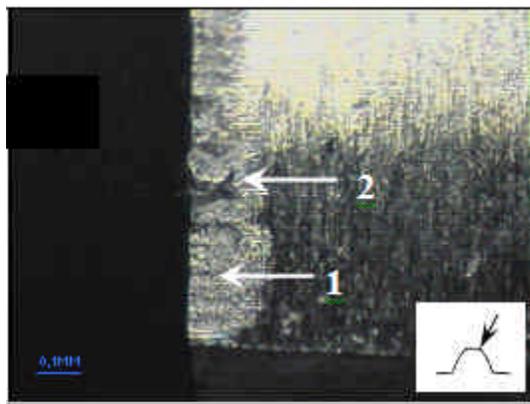
■ Aço rápido sinterizado - Teste 2

Figura 6.19: Média dos valores de desgaste V_B para brochas sem cobertura com aço rápido M2 e aço rápido sinterizado.

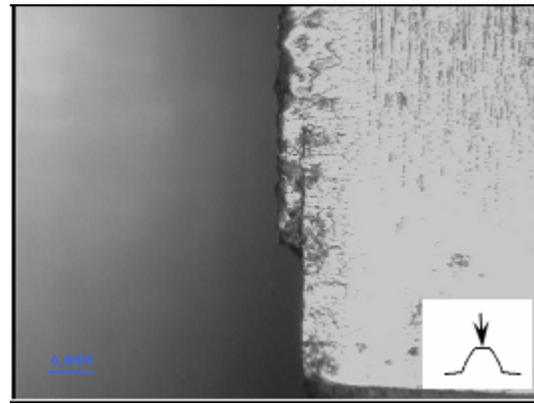
Na figura 6.19 é possível se notar que em cada coluna da média dos valores existe uma barra. Essas barras equivalem ao desvio padrão da amostra, sendo um desvio padrão acima e outro abaixo da média.

Conforme podemos observar na figura 6.19, a região 1, responsável pela usinagem do diâmetro interno e a região 3, responsável pela usinagem dos dentes do perfil interno, foram as regiões que apresentaram os maiores valores de desgaste. Porém, conforme descrito anteriormente a região 1 não foi considerada para o critério de fim de vida. As regiões 2 e 4 apresentaram desgaste menor. Isto se deve ao fato de que esses anéis são reserva da ferramenta (ainda não cortam a peça) e entrarão em uso gradativamente, conforme as brochas são reafiadas. Apesar desses anéis não usinarem a peça no primeiro momento é possível verificar, com as marcas deixadas na superfície de folga dos dentes, que os mesmos entram em atrito com a peça durante o brochamento. A região 3, que determina o final de vida da brocha, apresentou nos ensaios média de desgaste V_B entre 0,15 e 0,18mm.

A seguir veremos alguns tipos de desgastes que mais foram encontrados após a realização dos experimentos com as ferramentas sem cobertura. Todas as fotos adiante mostram a superfície de folga dos dentes das brochas.



a) Dente 26 – teste 1



b) Dente 35 – teste 1

Figura 6.20: Desgaste de dois dentes distintos de brochas de aço rápido M2.

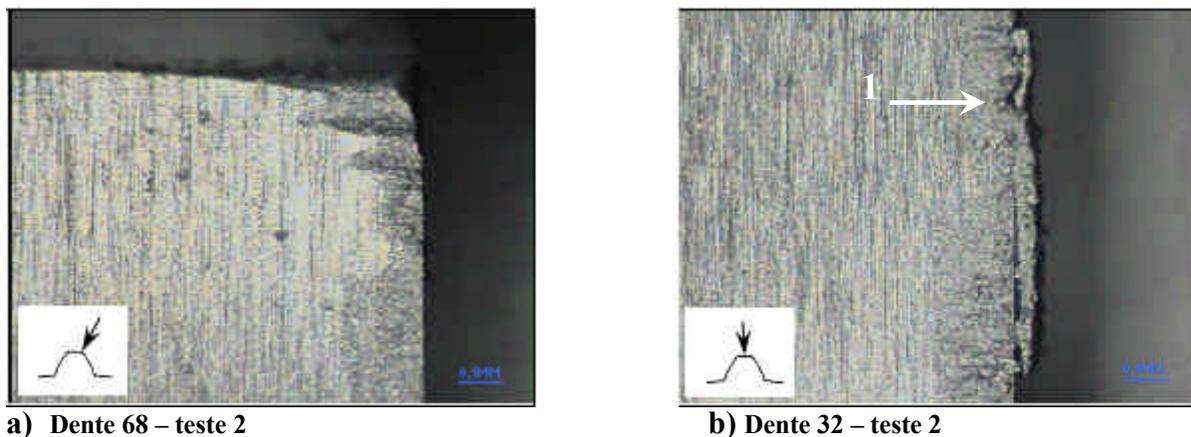
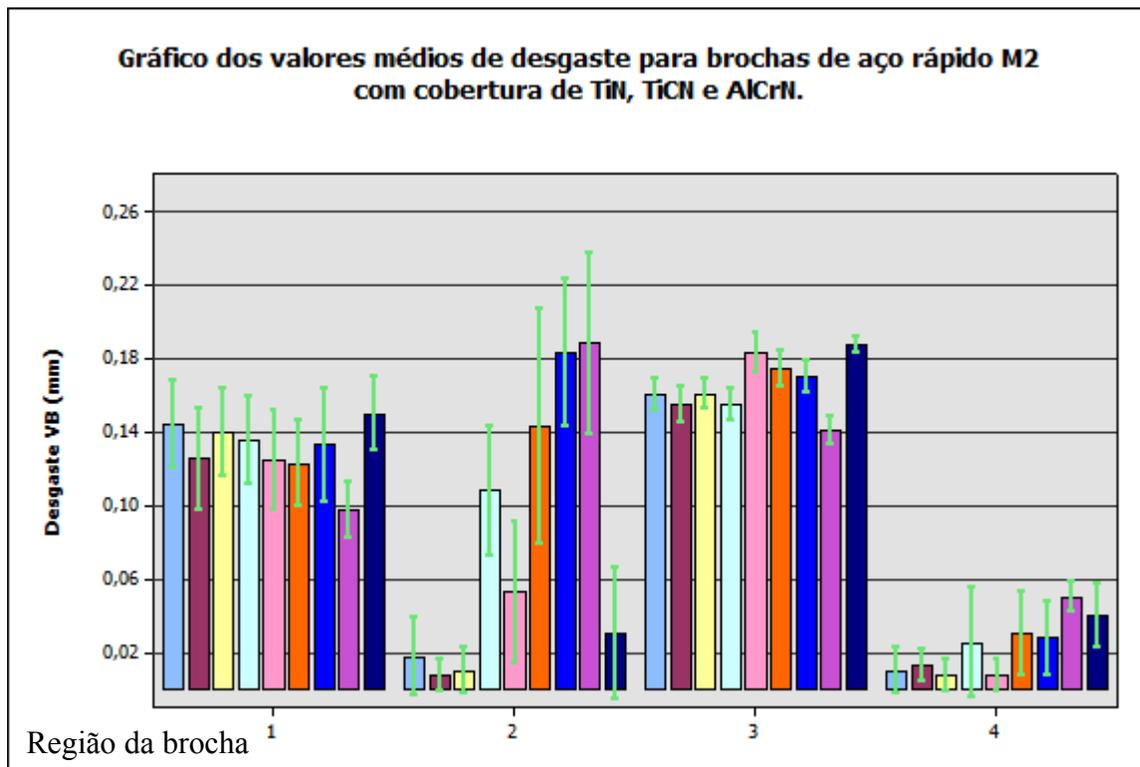


Figura 6.21: Desgaste de dois dentes distintos de brochas de aço rápido Sinterizado.

A figura 6.20a mostra com uma ampliação de 202 vezes, ampliação esta usada em todas as medições de desgaste, a região mais desgastada da aresta de corte de um dente da brocha em aço rápido M2. Na mesma figura tem-se para o ponto 1 a identificação de desgaste abrasivo, gerado pelo contato da superfície de folga da ferramenta com a peça. Para o ponto 2 podemos verificar que ocorreu retirada do material da ferramenta, possivelmente gerado por desgaste de aderência, que é um fenômeno que está presente na formação da aresta postíça de corte. Na figura 6.21a podemos observar que houve um grande desgaste abrasivo no canto do dente da brocha, na intersecção da superfície lateral com o topo do dente. Isso se deve principalmente à fragilidade que essa região apresenta, já que o encontro entre as duas superfícies se dá em canto vivo. Ficou evidenciado nas medições dos desgastes que a região do canto do dente foi a que sempre apresentou os maiores desgastes. Nas figuras 6.20b e 6.21b observamos a formação de aresta postíça de corte, e tem-se para o ponto 1 da figura 6.21b o arranque de material da aresta de corte, provavelmente causado pelo rompimento da aresta postíça de corte durante o brochamento.

6.4.2. Desgaste de brochas com cobertura de TiN, AlCrN e TiCN

Como podemos observar na figura 6.22, o desgaste nos anéis ao longo da brocha, para as ferramentas com cobertura, nas quatro regiões da brocha, comportou-se de maneira semelhante às brochas sem cobertura. A região 2 apresentou aumento nos valores de desgaste. Isso se dá pelo fato das brochas já terem sofrido afiações, fazendo com que os dentes do perfil estejam menores e, assim, os dentes de reserva comecem a remover material da peça, mantendo o diâmetro do perfil interno da peça na dimensão correta. Os valores de desgaste da região 3, responsável pela usinagem do perfil interno e pela definição do final de vida, apresentou desgaste V_B entre 0,14 e 0,19mm..

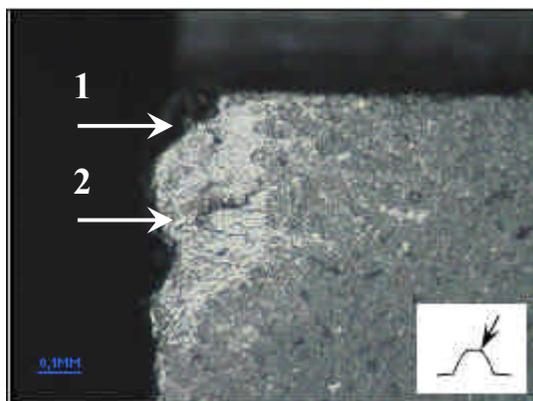


Legenda:

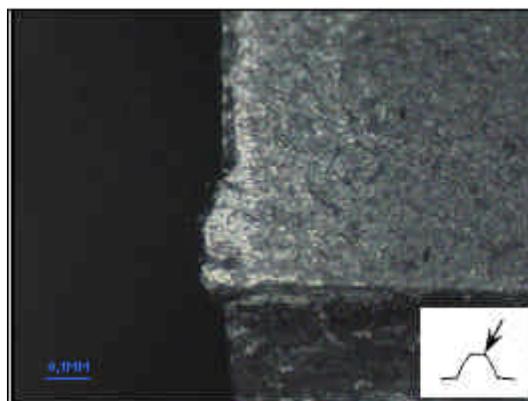
| | | |
|--|--|--|
| ■ TiN - Teste 1 | ■ TiN - Teste 2 | ■ TiN - Teste 3 |
| ■ AlCrN - Teste 1 | ■ AlCrN - Teste 2 | ■ AlCrN - Teste 3 |
| ■ TiCN - Teste 1 | ■ TiCN - Teste 2 | ■ TiCN - Teste 3 |

Figura 6.22: Média dos valores de desgaste VB para brochas com substrato de aço rápido M2 e cobertura de TiN, AlCrN e TiCN.

A seguir veremos fotos dos desgastes dos dentes das brochas com revestimentos, encontrados ao final dos experimentos

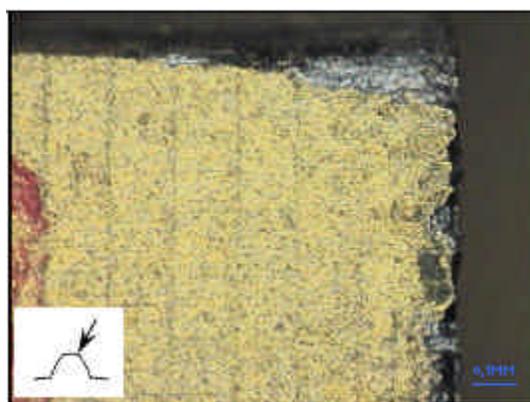


a) Dente 42 – teste 1

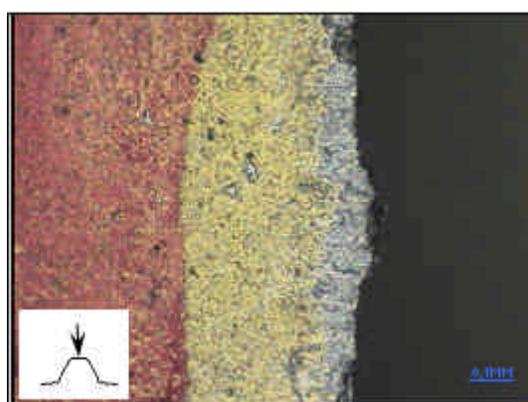


b) Dente 27 – teste 3

Figura 6.23: Desgaste do dente de brochas de aço rápido M2 com cobertura AlCrN

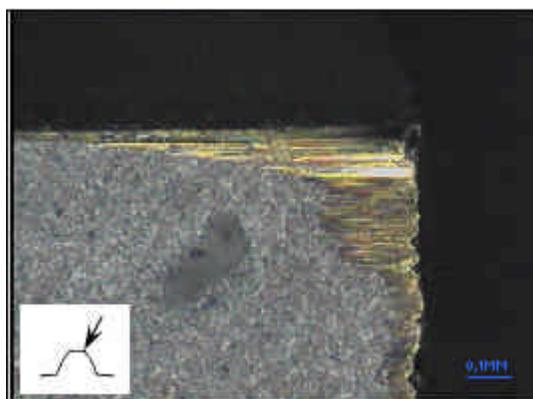


a) Dente 68 – teste 3

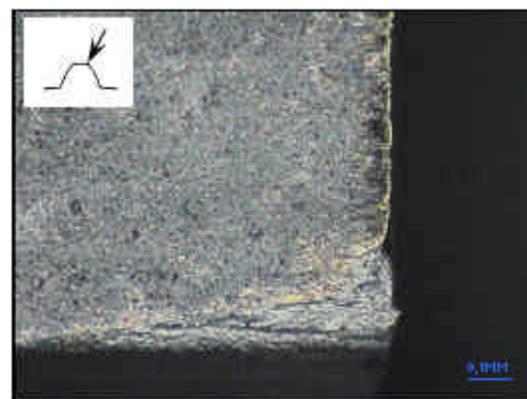


b) Dente 43 – teste 3

Figura 6.24: Desgaste do dente de brochas de aço rápido M2 com cobertura TiN.



a) Dente 69 – teste 1



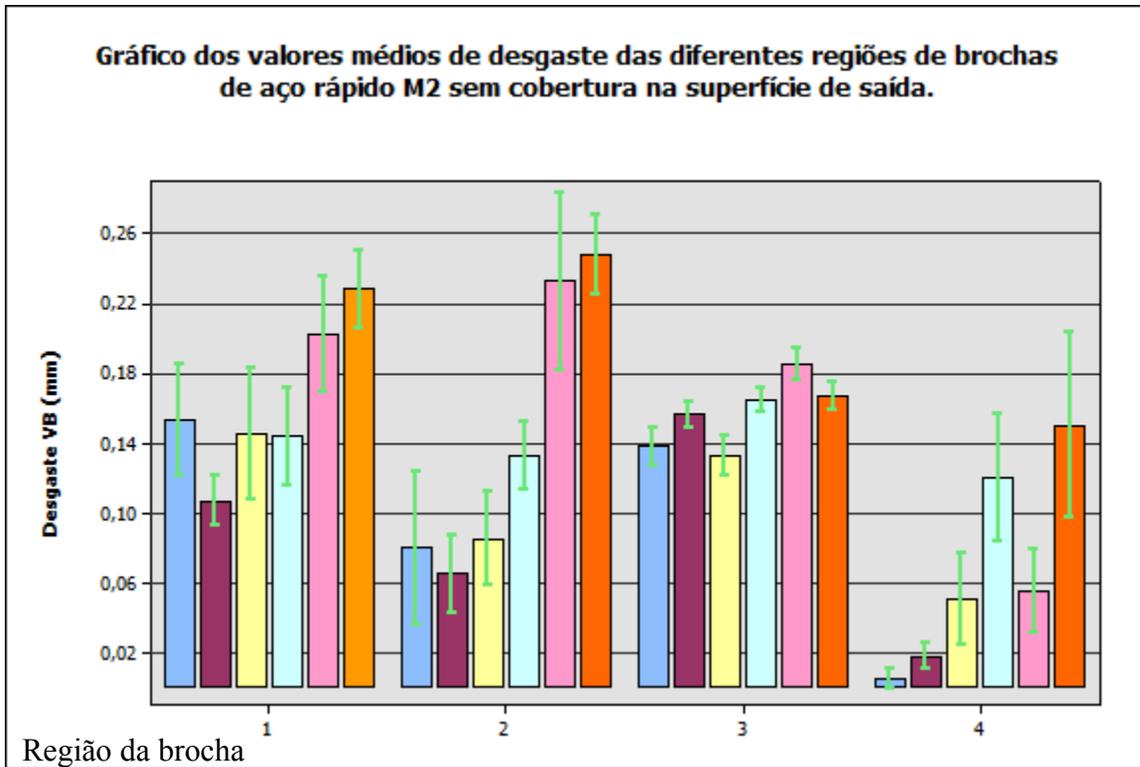
b) Dente 69 – teste 2

Figura 6.25: Desgaste do dente de brochas de aço rápido M2 com cobertura TiCN.

Os tipos de desgaste encontrado após os experimentos com as brochas de aço rápido M2 revestidas com TiN, AlCrN e TiCN, foram praticamente iguais aos encontrados no experimento com brochas sem revestimento. Na figura 6.23a e b podemos verificar a presença de material da peça aderido à aresta de corte. Tem-se nos pontos 1 e 2 da figura 6.23a o arranque do material da ferramenta possivelmente ocasionado pelo processo de desgaste por aderência. Na figura 6.24b e 6.25b podemos notar novamente que ocorreu a aderência de material da peça na ferramenta, sendo que na primeira figura podemos notar a formação de aresta postiça de corte e na segunda um grande desgaste no canto do dente da brocha, tendo como possível causa o processo de aderência. O mesmo pode ter ocorrido no dente da figura 6.24a, em que é possível verificar o arranque de material em vários pontos da aresta de corte e um desgaste elevado no canto do dente da brocha. Na figura 6.25a observamos que o tipo de desgaste que se apresenta aqui é o abrasivo e, provavelmente pelo fato do desgaste não ter removido todo o revestimento de TiCN do dente da brocha, não podemos perceber a presença de material da peça aderido à ferramenta. Isto explica a maior vida da brocha coberta com TiCN, comparado com as vidas obtidas nas brochas sem cobertura e com cobertura de TiN e AlCrN. A cobertura de TiCN foi capaz de minimizar/evitar a aderência de material da peça sobre a ferramenta.

6.4.3. Desgaste de brochas sem cobertura na superfície de saída.

A figura 6.26 mostra os valores de desgaste V_B encontrados nos anéis das brochas com revestimento que após a reafiação não receberam um novo revestimento, trabalhando sem cobertura na superfície de saída, fazendo com que o cavaco tivesse contato direto com o substrato da brocha, que nesse caso era o aço rápido M2. Podemos notar que não ocorreu uma grande mudança no comportamento do desgaste ao longo da brocha quando comparamos esse experimento com os experimentos anteriores, com exceção das regiões de reserva da brocha que apresentam desgaste superior aos ensaios anteriores. Observa-se, que na região 4, os dentes de reserva, apresentam valores de desgaste maiores, quando comparados aos obtidos no experimento anterior (figura 6.22). Isso é devido ao fato dos dentes de reserva terem removido material da peça, conforme descrito anteriormente. Podemos verificar também que o desgaste V_B na região 3 ficou entre 0,13 e 0,19mm.



Legenda:

TiN - Teste 1

TiCN - Teste 1

AICrN - Teste 2

AICrN - Teste 1

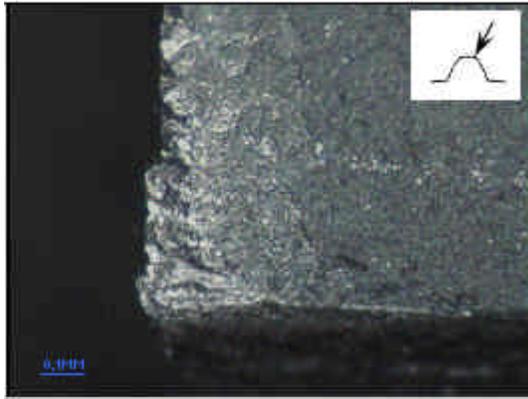
TiN - Teste 2

TiCN - Teste 2

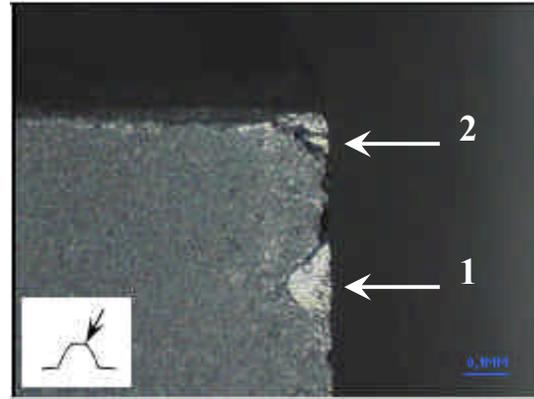
Figura 6.26: Média dos valores de desgaste V_B para brochas com aço rápido M2 sem cobertura de TiN, AICrN e TiCN na superfície de saída.

Como mostram as figuras 6.27a e 6.29a novamente temos a presença de aderência do material da peça na ferramenta e a formação de aresta postiça. Porém na figura 6.28b, 6.29a e 6.29b, tem-se no ponto 1 indicação clara da existência de desgaste abrasivo na aresta de corte.

Nas figuras 6.27b, 6.28b e 6.29b, podemos observar, no ponto 2, que as arestas possuem vários micro-lascamentos, que ocorreram provavelmente, devido à ausência de cobertura na superfície de saída das brochas, o que levou a uma maior incidência da aderência do material da peça na aresta de corte com a formação de aresta postiça, causando a deterioração da aresta.

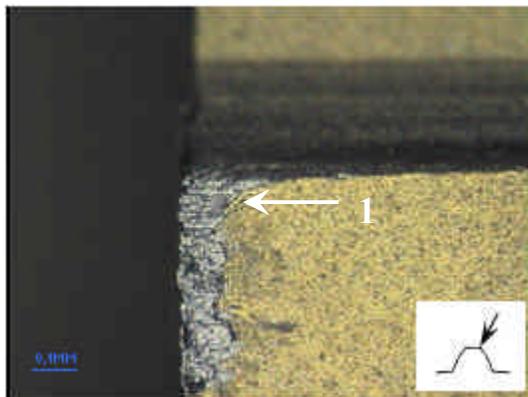


a) Dente 26 – teste 3

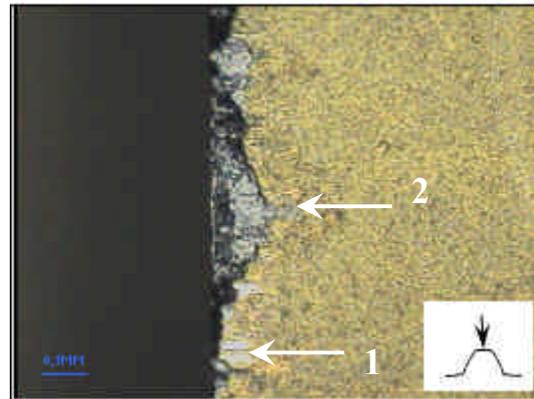


b) Dente 64 - teste 1

Figura 6.27: Desgaste do dente de brochas de aço rápido M2 sem cobertura AlCrN na superfície de saída.

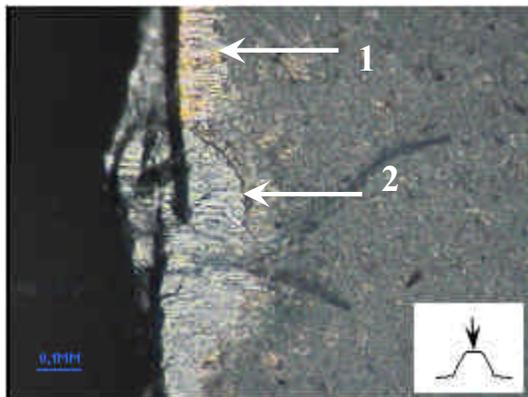


a) Dente 28 – teste 1

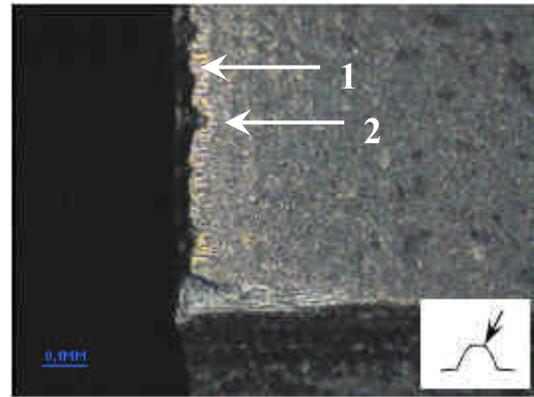


b) Dente 29 – teste 1

Figura 6.28: Desgaste do dente de brochas de aço rápido M2 sem cobertura TiN na superfície de saída.



a) Dente 24 – teste 1



b) Dente 26 – teste 2

Figura 6.29: Desgaste do dente de brochas de aço rápido M2 sem cobertura TiCN na superfície de saída.

Outra possibilidade é a fato de haver deslocamento da cobertura na superfície de folga do dente, como podemos observar no ponto 1 das figuras 6.27b e 6.28a, deixando que o material da peça tenha contato direto com o substrato da brocha na superfície de folga do dente, elevando rapidamente o desgaste nessas regiões, devido ao fato do substrato possuir resistência muito inferior quando comparado com o revestimento.

6.4.3. Desgaste brochas sinterizadas com cobertura TiCN.

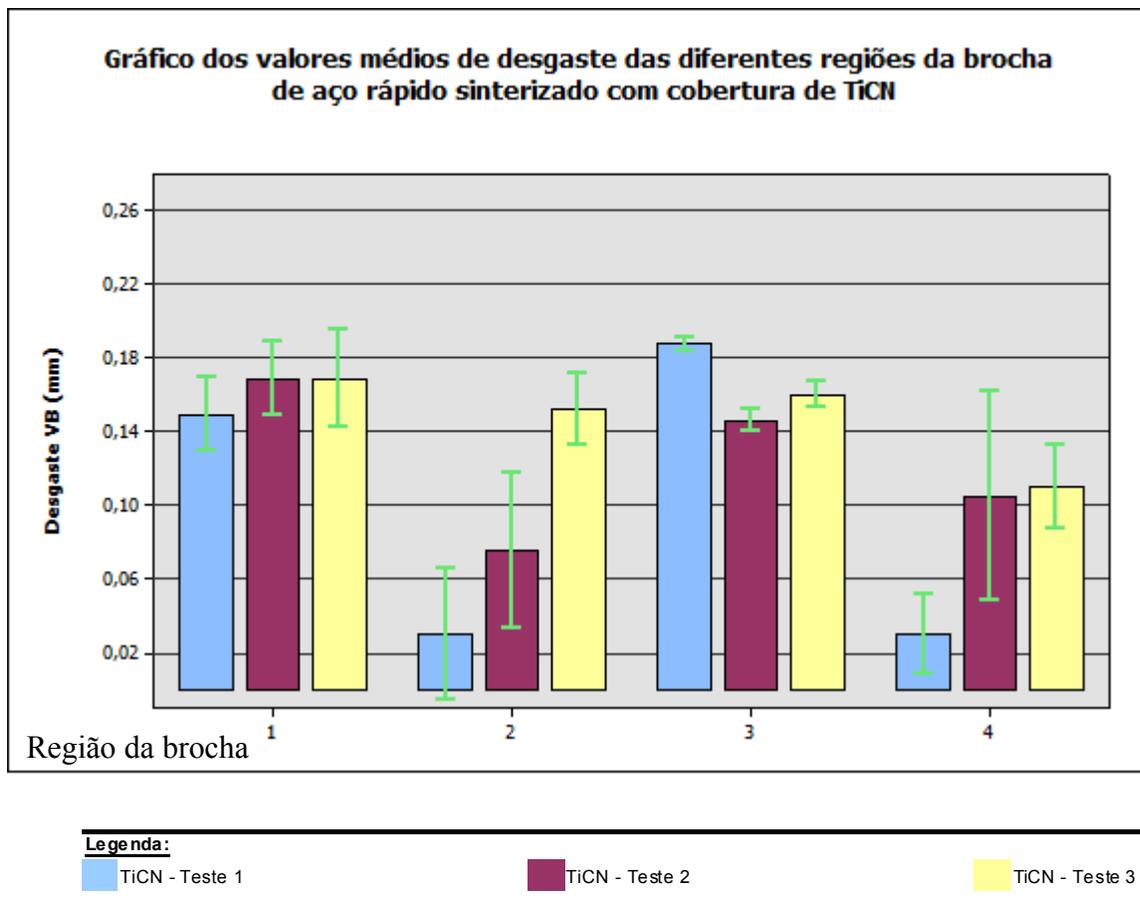
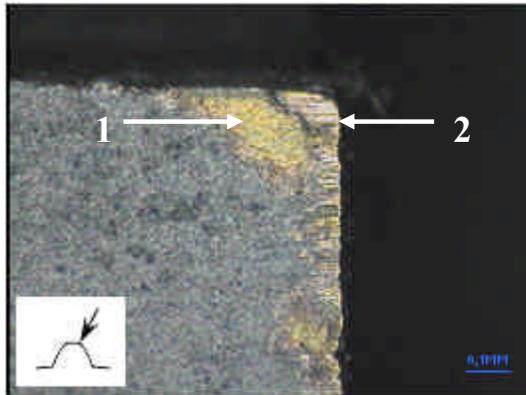
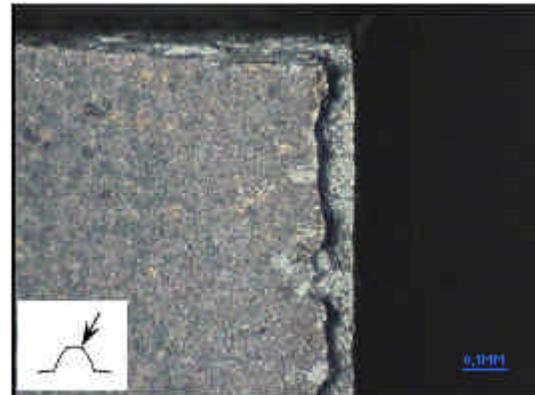


Figura 6.30 Gráfico da média dos valores de desgaste VB para brochas com substrato de aço rápido sinterizado com cobertura de TiCN.

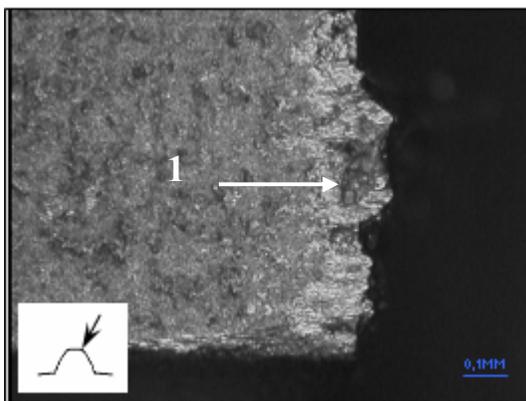
A figura 6.30 mostra que os valores de desgaste dos ensaios seguiram os mesmos padrões dos ensaios anteriores, com uma pequena melhora na uniformidade dos desgastes. As figuras adiante mostram uma amostra dos desgastes encontrados na ferramenta no final dos ensaios.



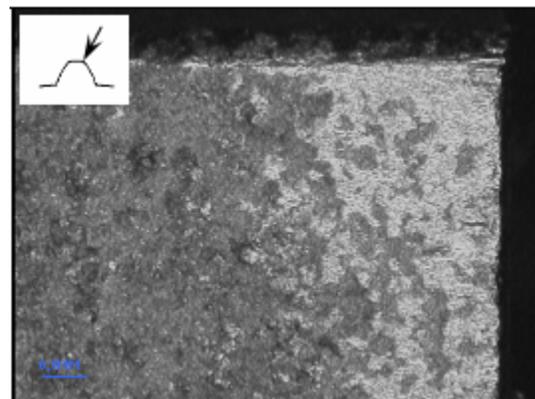
a) Dente 36 – teste 1



b) Dente 34 – teste 2



c) Dente 68 – teste 2



d) Dente 75 – teste 2

Figura 6.31: Desgaste dos dentes de brochas de aço rápido sinterizado com cobertura TiCN.

Na figura 6.31a no ponto 1 tem-se o deslocamento da cobertura de TiCN. No ponto 2 podemos notar a ocorrência de desgaste abrasivo caracterizado pelos riscos paralelos à direção de corte. Na figura 6.31b observamos que ocorreu arrancamento do material da brocha, provavelmente causado pela aderência de material da peça. É possível observar também que o canto do dente apresentou um desgaste mais expressivo. Aparentemente ocorreu tanto desgaste por aderência como desgaste por abrasão. Na figura 6.31c podemos verificar, no ponto 1, a formação de aresta postíça de corte. Nesse dente também ocorreu um desgaste mais acentuado no canto da aresta de corte. Na figura 6.31d podemos observar um dente de um anel de reserva que fica no final da brocha. A figura mostra que apesar do dente não remover, ou remover muito

pouco material durante o brochamento o mesmo entra em atrito com a peça, causando até mesmo a remoção do revestimento. Isso ocorre principalmente devido à fase plana que esses dentes possuem. Esse tipo de fenômeno foi encontrado no final de vida de todas as brochas.

Capítulo 7

Conclusões e sugestões para trabalhos futuros

Baseado nos resultados obtidos neste trabalho, pode-se concluir para o brochamento em aço DIN C45 com brochas de aço rápido sinterizado e aço rápido M2 com coberturas de TiN, TiCN e AlCrN, com as condições empregadas nos ensaios que:

- O aço rápido sinterizado não apresentou melhora no rendimento da brocha em relação ao número de peças produzidas, tanto na condição sem cobertura como quando recebeu a cobertura de TiCN.
- As brochas com cobertura TiN, TiCN e AlCrN sempre apresentaram rendimento superior às brochas que não receberam qualquer tipo de cobertura.
- Entre as brochas com cobertura, as brochas com cobertura de TiCN e AlCrN, estatisticamente possuem o mesmo rendimento e sempre apresentaram rendimento superior às brochas cobertas com TiN.
- A cobertura melhora o rendimento não somente na primeira vida, quando a brocha está com cobertura em toda a sua superfície, mas também quando a ferramenta é reafiada e não recoberta, trabalhando sem cobertura na superfície de saída.
- Ocorreu aumento nos esforços de corte durante o brochamento devido ao arredondamento da aresta de corte causado pela aplicação da cobertura.

- O principal mecanismo de desgaste verificado nas ferramentas foi a aderência entre material da peça e da ferramenta. Esta foi a razão para a brocha com revestimento de TiCN ter apresentado o melhor desempenho. Este revestimento foi capaz de, praticamente, evitar a aderência de material de peça/cavaco sobre a ferramenta.

Como sugestões para trabalhos futuros pode-se propor:

- Avaliar o comportamento das coberturas e do aço rápido sinterizado em velocidades de corte mais elevadas.
- Testar a técnica de Mínima Quantidade de Fluido (MQF) no processo de brochamento.
- Testar o emprego de materiais mais nobres como o metal duro na construção das brochas.
- Testar outros tipos de cobertura
- Avaliar a influência da rugosidade das superfícies de saída e folga da ferramenta na vida da ferramenta.
- Testar óleo de corte integral no lugar da emulsão.
- Verificar a viabilidade de se utilizar os valores de pressão hidráulica do cilindro para estabelecimento do fim da vida da ferramenta ao pé da máquina.

Referências Bibliográficas

Balzers, Os processos PVD – Oerlikon Balzers Coating, 2007.

Balzers, Especificações Técnicas sobre revestimentos – Oerlikon Balzers Coating, 2007.

Chiaverine, V., “Aços e Ferros Fundidos”, Associação Brasileira de Metais, São Paulo, 1981.

Conklin, D, Broaching goes for the gold – Coating of Broaching tools. Modern Machine Shop, May 1993 5p.

Cselle, T, Application of Coatings for Tooling Quo Vadis 2005?, Vacuum's Best, special issue of the German Journal, Abril 2005, V17 pp 33-39.

Cselle, T, Driving forces of Today's Manufacturing Technology, Industrial Tooling 2003, Southampton Engineering Faculty, UK, 28p.

Diniz, A. E., Marcondes, F. C., Coppini, N. L., Tecnologia da Usinagem dos Materiais. São Paulo: MM Editora 1999 242p.

Erasteel, Aço Rápido Sinterizado ASP® 2023 e ASP® 2030, Erasteel SA. 2007.

Erasteel, High Speed Steel by Powder Metallurgy, Erasteel S.A. 2007.

Grinder, O, PM Production and Application, First International HSS FORUM Conference, Aachen, Germany, Febr. 2005, 13p.

Hanser, C. V., Coating for tooling 2004 – Questions and Their Answers, München, 6p

Hogmark, S., Olsson, M., Friction, Adhesion, Fundamentals, Wear Mechanisms in Metal Cutting, First International HSS FORUM Conference, Aachen, Germany, Febr. 2005, 13p.

Hori, I., High Performance Broaching. First International HSS FORUM Conference, Aachen, Germany, Febr. 2005, 7p.

Horn, Broaching on CNC Lathes, Milling Machines and Machinig Centres. Horn's Customer Magazine, 1ed, 2006, pp8-9.

Horn, Broaching of Construction Machine Differential housing on a Lathe. Horn's Customer Magazine, 1ed, 2007, pp4-5.

Horn, On-lathe Broaching Maximezes Flexibility for Metaltech, Horn UK 2006.

Hurth Infer, Apostila para Treinamento sobre Ferramentas para Brochar – Hurth Infer Industria de Máquinas e Ferramentas LTDA, 2000, 8p.

Hurth Infer, Apostila Técnica sobre Operação de Brochamento – Hurth Infer Indústria de Máquinas e Ferramentas LTDA, 2005, 16p.

Hurth Infer, Catálogo Brochas, Brochamento Interno, Hurth Infer Industria de Máquinas e

Ferramentas LTDA, 2007.

HSS Smart Guide – Broaching. First International HSS FORUM Conference, Aachen, Germany, Febr. 2005, 21p.

HSS Smart Guide – Think HSS. First International HSS FORUM Conference, Aachen, Germany, Febr. 2005, 21p.

HSS Smart Guide – Useful Information. First International HSS FORUM Conference, Aachen, Germany, Febr. 2005, 21p.

Institut für Produktionstechnik Karlsruhe GmbH, Projekt Prozessoptimierung Räumen, Jun. 1990.116p.

Klink, Hard broaching technology. Karl Klink GmbH, 2007, 2p.

Millerbroach, Broaching Basics – Broaching Tools. Miller Broach Inc., 2007.

Mills, B., Recent developments in cutting tool materials, Journal of Materials Processing Technology, V. 56, p. 16-23, 1996.

Motter, C. V., The Basics of Broaching. Gear product News, pp. 26-30. Febr. 2006.

Ozturk, O., Modelling of Broaching Process, M.Sc. Thesis, Industrial Engineering, Sabanci University, Istanbul, Turkey. 2003.

Platit, Nanostructured Coatings for High Performance Tools. Platit AG. Switzerland 2007,

Rech, J., Cutting Edge Preparation and Surface Issues. First International HSS FORUM Conference, Aachen, Germany, Febr. 2005, 12p.

- Santos, S. C., Sales, W. F, Aspectos Tribológicos da Usinagem dos Materiais. São Paulo: Artliber Editora, 2007, 246p.
- Sarwar, M., Application of Advanced Surface Engineering Treatments to Multi-point Cutting Edges. Surface and Coatings Technology Journal, 108 pp. 612-619, Oct 1998
- Schneider, G. Cutting Tool Applications. 2ed. Broaches and Broaching, 2001, Cap 14.
- Sutherland, J. W., Salisbury, E. J., Hoge, F. W., A Model for the Cutting Force system in the Gear Broaching Process. Int. J. Mach Tools Manufact. Vol 37, pp. 1409 – 1421, 1997.
- Thomas, D., Application of HSS Cutting Tools in the Mechanical Engineering Industry. First International HSS FORUM. Aachen, Germany, Febr. 2005, 9p.
- Tonshoff, K., Wear mechanisms of $(Ti_{1-x}, Al_x)N$ coating in dry drilling surface and coatings Technology, V. 94-95, p. 603-609, 1997.
- Trent, E. M., 2000. Metal Cutting 4ed. Oxford, Butterworth – Heinemann.
- Villares, Aços Rápidos Obtidos por Metalurgia do pó: Sinter[®] 23, 30 e 60 – Villares Metals S.A. 2005.
- Villares, Catálogo de Aços para Ferramenta – Villares Metals S.A. 2005.