

**MATHEUS PEREIRA CARVALHO**

**AVALIAÇÃO DE TIPOS E MECANISMOS DE  
DESGASTES DE BROCA DE METAL DURO  
REVESTIDAS POR TiN E TiAIN NA FURAÇÃO DO  
AÇO ABNT 1045**



UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA  
FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA

2019

**MATHEUS PEREIRA CARVALHO**

**AVALIAÇÃO DE TIPOS E MECANISMOS DE  
DESGASTES DE BROCA DE METAL DURO  
REVESTIDAS POR TiN E TiAIN NA FURAÇÃO DO  
AÇO ABNT 1045**

**Trabalho de Conclusão de Curso** apresentado para conclusão do curso de Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Uberlândia, como parte dos requisitos para obtenção do título de Bacharel em **ENGENHARIA MECÂNICA**.

Área de Concentração: Material e Processos de Fabricação.

Orientador: Prof. Dr. Wisley Falco Sales

**UBERLÂNDIA - MG**

**MAIO DE 2019**

**MATHEUS PEREIRA CARVALHO**

**AVALIAÇÃO DE TIPOS E MECANISMOS DE  
DESGASTES DE BROCA DE METAL DURO  
REVESTIDAS POR TiN E TiAIN NA FURAÇÃO DO  
AÇO ABNT 1045**

Trabalho de Conclusão de Curso para  
obtenção do título de Bacharel em  
Engenharia Mecânica da Universidade  
Federal de Uberlândia.

---

Prof. Ph.D Wisley Falco Sales – Orientador (FEMEC/UFU)

---

Prof. Dr. Éder Silva Costa (ESTES/UFU)

---

Prof. M.Sc. Leonardo Rosa Ribeiro da Silva (Doutorando/FEMEC)

**UBERLÂNDIA - MG**

**2019**

## DEDICATÓRIA

*Aos meus pais: Ana Maria Pereira e José Carvalho.  
Aos meus irmãos: Isabella Carvalho e Thiago Carvalho.*

## AGRADECIMENTOS

À Deus primeiramente, que me guiou e me deu sabedoria, me direcionando em todos os momentos difíceis desta caminhada, me concedendo saúde para concretizar e vencer mais esta etapa da minha vida.

À Universidade Federal de Uberlândia e à Faculdade de Engenharia Mecânica pela realização deste curso.

À FAPEMIG, pela concessão da bolsa de iniciação científica e pelo apoio financeiro na realização deste projeto.

Aos colegas de graduação, técnicos, professores e amigos do Curso de Graduação em Engenharia Mecânica por todo o suporte durante o curso.

Ao Prof. Dr. Wisley Falco Sales pela orientação e pela paciência durante a elaboração deste trabalho.

Ao Prof. Dr. Álisson Rocha Machado por ter possibilitado o meu ingresso neste laboratório e dado suporte por toda pesquisa.

À equipe do Laboratório de Ensino e Pesquisa em Usinagem (LEPU) pelo suporte durante toda a realização deste trabalho, especialmente ao técnico Cláudio Gomes do Nascimento pelo companheirismo, amizade e grande ajuda.

À minha família pelo apoio e suporte incondicional.

À todos, meu humilde obrigado.

CARVALHO, M.P., **Avaliação de Tipos e Mecanismos de Desgastes de Broca de Metal Duro Revestidas por TiN e TiAlN na Furação do Aço ABNT 1045**. 2019. Trabalho de Conclusão de Curso, Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Uberlândia, MG, Brasil.

## RESUMO

Na indústria de manufatura é muito utilizado o processo de furação, na grande maioria das peças fabricadas ao menos um furo as mesmas possuem, seja para sua fixação, para lubrificação, alívio de tensão entre outros. Por esse motivo é importante conhecer o desempenho de brocas, quanto ao material, revestimento, pois os mesmos possibilitam usinar com menor tempo, usando grandes avanços e velocidades de corte. Porém durante este processo as ferramentas aquecem e sofrem altos desgastes, alterando as dimensões pretendidas das peças, afim de minimizar esses efeitos são utilizados os fluidos de corte. O presente trabalho avaliou a vida e os mecanismos de desgaste de brocas de metal duro (grãos ultra-finos) integral revestidas TiN e TiAlN pelo processo CVD na furação do aço AISI 1045, em três velocidades de corte 60, 120 e 180 m/min, com aplicação de fluido de corte na forma de mínima quantidade de lubrificação (MQL) vazão 74 ml/h e na forma de jorro com concentração 5% e vazão 1269 l/h. O desgaste das brocas com revestimento TiAlN apresentou menores valores em comparação com TiN. Na velocidade de 60 m/min na aplicação de jorro obteve menor desgaste, porém para a utilização de velocidades de cortes 120 e 180 m/min a aplicação de MQL obteve os resultados mais satisfatórios. No que se refere ao tipo de desgaste predominou o desgaste de flanco e os mecanismos para os dois tipos de revestimentos avaliados foram adesão e a abrasão.

---

Palavras Chave: processo de furação, revestimento TiN e TiAlN, fluido de corte, tipos e mecanismos de desgaste.

CARVALHO, M.P., **Evaluation of types and wear mechanisms of TiN and TiAlN coated cemented carbide drills when machining AISI 1045**. 2015. Final Project Report, School of Mechanical Engineering, Federal University of Uberlandia, MG, Brazil.

## ABSTRACT

In the manufacturing industry the drilling process is widely used, in the great majority of the work parts manufactured at least one hole they have, either for their fixation, for lubrication, tension relief among others. For this reason, it is important to know the performance of drills, in terms of material and coating, since they can be machined with less time, using great feed rates and cutting speeds. However, during this process, the tools heat and suffer high wear, altering the desired dimensions of the holes, in order to minimize these effects are used the cutting fluids. The present work evaluated the life and wear mechanisms of TiN and TiAlN coated full length ultra-fine carbide drills by the CVD process in the AISI 1045 steel drilling at three cutting speeds 60, 120 and 180 m/min, with application of cutting fluid Blasocut BC 40 NF in the minimum quantity of lubrication (MQL), flow rate 74 ml/h and in overhead position ME-1 fluid with 5% concentration and flow 1269 l/h. The wear of the TiAlN coated drills showed better results than the TiN, compared to the cutting speed at 120 m/min obtained better performance except for the TiN coating with MQL method. Regarding to the wear mechanism, the adhesion phenomena was the dominant. Adhesion and abrasion were the dominant wear mechanisms in the whole work.

---

Keywords: drilling process, TiN and TiAlN coatings, cutting fluid, wear mechanisms.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 – Arestas e superfícies de corte de uma broca helicoidal (ABNT 6163, 1980). ....	4
Figura 2.2 – Falhas em ferramentas de corte (BUNSHAH, 2001). .....	6
Figura 2.3 – Diagrama de distribuição dos mecanismos de desgaste das ferramentas de corte (KONIG, et al., 1997) .....	6
Figura 2.4 – Mecanismos de desgaste (MACHADO et. al., 1999).....	8
Figura 2.5 – Evolução do desgaste em brocas helicoidais: (1) desgaste inicial, (2) desgaste leve – regular, (3) desgaste moderado por microlascamentos, (4) desgaste severo e (5) colapso (Ertunc et al., 2001).....	9
Figura 2.6 – Forma de desgaste em brocas helicoidais: (a) desgaste de flanco, (b) desgaste nas guias, (c) desgaste de cratera e (d) lascamento (Bork, 1995) .....	10
Figura 2.7 – Desgaste de flanco de brocas helicoidais (SANTOS, 1999).....	11
Figura 2.8 – Variação da Microdureza Vickers dos revestimentos de titânio em função da temperatura (JINDAL et al., 1999).. .....	16
Figura 2.9 – Representação da afinidade dos fluidos com a superfície (a) fluidos vegetais (b) fluidos minerais (Adaptado WOODS, 2005).....	20
Figura 2.10 – Diagrama esquemático de um sistema de MQL com o princípio de pressão (Adaptado DA SILVA,2010). .....	211
Figura 3.1 – Variáveis de entrada e saída dos ensaios de Furação. ....	23
Figura 3.2 – Microestrutura do corpo de prova aço ABNT 1045. Ataque: Nital 10%, 50x... ..	244
Figura 3.3 – Brocas utilizadas no projeto lado esquerdo a revestida com TiN e direto TiAlN. ....	25
Figura 3.4 – Centro de usinagem vertical CNC que foi utilizado nos testes de furação e alargamento.....	26
Figura 3.5 – Mandril Hidromecânico Sandvik.....	26
Figura 3.6 – Esquema da usinagem de furos, vista superior do corpo de prova .....	27
Figura 3.7 – Esquema da usinagem de furos, vista em corte do corpo de prova .....	29
Figura 3.8 – Corte das bolachas na máquina serra fita. ....	29
Figura 3.9 – Faceamento da peça. ....	30
Figura 3.10 – (a) Antes e (b) após o faceamento do corpo de prova.....	30
Figura 3.11 – Furação com aplicação fluido ME-1 forma de jorro. ....	31
Figura 3.12 – Aparelho pulverizador MQL. (COSTA, 2004) .....	31
Figura 3.13 – Fluido Blasocut 40 NF forma de MQL. ....	32



Figura 3.14 – Microscópio ótico e sistema de análise de imagens: (a) sistema de medição; (b) imagem de uma ferramenta desgastada, sob medição do nível de desgaste de flanco..	33
Figura 3.15 – Microscópio eletrônico de varredura e sistema de análises de imagens: (a) sistema de medição; (b) ferramenta desgastada vista com ampliação de 800X, evidenciando o desgaste de flanco.....	34
Figura 4.1 – Desgaste das brocas mostrado em função da velocidade de corte, do tipo de revestimento e dos dois métodos de aplicação de fluidos de corte.....	355
Figura 4.2 – $V_c = 120$ m/min; ferramenta revestida por TiN; (a) fluido aplicado em jorro e (b) fluido aplicado em MQL. Realizado 164 furos.....	<b>Erro! Indicador não definido.</b> 8
Figura 4.3 – $V_c = 120$ m/min; ferramenta revestida por TiAlN; (a) fluido aplicado em jorro e (b) fluido aplicado em MQL. Realizado 164 furos.....	40

## LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 - Composição química do aço ABNT 1045 (% em massa) (NBR NM 87/2000). ...	3
Tabela 3.1 – Composição química do aço ABNT 1045, (% em massa) .....	24
Tabela 3.2 – Ângulos e dimensões das brocas utilizadas nos ensaios .....	255
Tabela 3.3 – Número dos teste e respectivas condições de corte.....	288
Tabela 3.4 – Características físico-químicas BLASOCUT BC 40 NF® (Blazer Swisslue) ..	322

## LISTA DE ABREVIações E SIMBOLOS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
AISI	American Iron and Steel Institute
$a_p$	profundidade de corte
APC	Aresta postiça de corte
CNC	Controle Numérico Computadorizado
CVD	Deposição Química de Vapor
Ds	Diâmetro da broca
f	Avanço
HV	Dureza Vickers
HSS	Aço rápido
l	Comprimento canal da broca
L/D	Relação comprimento de furação em relação ao diâmetro
MQL	Mínima Quantidade de Lubrificação
NBR	Norma Brasileira
PVD	Deposição Física de Vapor
VB	Desgaste de flanco medido na superfície de folga da ferramenta de corte
$VB_{máx}$	Desgaste de flanco máximo medido na superfície de folga da ferramenta de corte
$V_c$	Velocidade de corte
$\sigma$	Ângulo ponta da broca

## LISTA DE ELEMENTOS QUÍMICOS E COMPOSTOS

Al	Alumínio
$Al_2O_3$	Alumina
C	Carbono
Co	Cobalto
Fe	Ferro
Mn	Manganês
$P_{máx}$	Fósforo máximo
Si	Silício
$S_{máx}$	Enxofre máximo
TaC	Carboneto de Tântalo

Ti	Titânio
TiAl	Sinterizado composto de titânio e alumínio
TiAlN	Nitreto de titânio alumínio
TiC	Carbeto de titânio
TiCN	Carbonitreto de titânio
TiN	Nitreto de Titânio
W	Tungstênio
WC	Carboneto de Tungstênio

## SUMÁRIO

CAPÍTULO I - INTRODUÇÃO .....	1
CAPÍTULO II - REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	3
2.1 Materiais.....	3
2.1.1 <i>Classificação do aço ABNT 1045</i> .....	3
2.1.2 <i>Composição química do aço ABNT 1045</i> .....	3
2.2 Processo de Furação .....	4
2.3 Mecanismo Desgastes em Broca .....	5
2.4 Desgaste em Brocas Helicoidais .....	8
2.5 Material da ferramenta de corte.....	11
2.5.1 <i>Nitreto de Titânio</i> .....	12
2.5.2 <i>Nitreto de Titânio Alumínio</i> .....	13
2.6 Fluidos de corte.....	16
2.6.1 <i>Problemas relacionados ao uso de fluidos de corte</i> .....	177
2.6.2 <i>Fluidos de corte de base mineral</i> .....	18
2.6.3 <i>Fluidos de corte de base vegetal</i> .....	19
2.6.4 <i>A técnica de aplicação de quantidade mínima de lubrificante- MQL</i> .....	20
CAPÍTULO III - METODOLOGIA .....	23
3.1. Materiais.....	24
3.2. Ferramenta.....	25
3.3. Máquina Ferramenta .....	26
3.4 Planejamentos dos Furos.....	27
3.5 Preparações dos Corpos de Prova.....	29
3.6 Realizações dos Ensaios .....	30
3.7. Análises das ferramentas desgastadas no microscópio eletrônico de varredura (MEV) – análise dos mecanismos de desgaste .....	33
CAPÍTULO IV - RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	35
4.1. Análise Gráfica dos Desgaste da Broca .....	35
4.2. Análises de Desgaste e Mecanismos de Desgaste .....	37
CAPÍTULO V – CONCLUSÕES.....	41
SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS .....	42
CAPITULO VI - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	43

# CAPÍTULO I

## INTRODUÇÃO

Pelo fato de a grande maioria das peças produzidas possuírem ao menos um furo, o processo de furação é um dos processos mais utilizados na indústria de manufatura (SMITH, 2008). Em geral, as peças são furadas em cheio ou tem seus furos aumentados pelo processo de furação (DINIZ; MARCONDES; COPPINI, 2008). Por esse motivo é de bastante importância conhecer o desempenho de brocas, quanto ao material, revestimento, entre outros fatores. Esses conhecimentos são importantes para maior eficiência e previsibilidade do processo e, obviamente, está relacionado com maior produção e produtividade. Para tal, são usadas brocas com tecnologia em revestimentos com elevada resistência ao desgaste e no próprio material da broca. A combinação entre substrato e revestimentos apropriados, proporcionará usinar em menor tempo, pois permite que sejam usados grandes avanços e velocidades de corte.

Durante os processos de usinagem as ferramentas aquecem e sofrem altos desgastes que exigem trocas constantes de suas arestas de corte. Além disto, há o aquecimento das peças usinadas, o que pode provocar dois efeitos indesejáveis: alterações nas dimensões pretendidas e geração de tensões internas que podem comprometer a utilização das mesmas. Para minimizar os desgastes das ferramentas e o aquecimento das peças, vários recursos podem ser utilizados, entre os quais o emprego de um fluido de corte.

O emprego dos fluidos tem como principais funções, segundo Pawlak et al. (2004), reduzir, através da lubrificação, as características dos processos tribológicos que estão sempre presentes na superfície de contato entre a peça e a ferramenta e, também reduzir o calor na região de corte, através da refrigeração, melhorando assim a qualidade da peças fabricadas. No entanto, Dhar et al. (2007) afirmam que, apesar das vantagens tecnológicas que os fluidos de corte promovem, ultimamente vêm sendo questionados os efeitos

negativos que eles causam. A maioria dos fluidos de corte são considerados um dos principais agentes nocivos ao meio ambiente e a saúde do trabalhador, bem como elevam os custos do processo de usinagem.

Por esses e outros aspectos muito têm se buscado por novas técnicas de redução ou mesmo eliminação dos fluidos de corte. Para Sokovic e Mijanovic (2001), para buscar alternativas e melhorias para os processos atuais de produção, é necessário substituir os métodos tradicionais, para que se possam obter condições de fabricação associadas ao menor impacto ambiental e que sejam tecnologicamente e economicamente coerentes.

Neste trabalho serão avaliadas as influências do revestimento da broca, velocidade de corte e sistema lubri-refrigerante no desempenho da furação do aço ABNT 1045, visando compreender os desgastes e os mecanismos de desgastes.

Este trabalho foi dividido em seis capítulos da seguinte forma:

Capítulo I - apresenta uma introdução, contextualização do trabalho e seus objetivos.

Capítulo II – apresenta uma breve revisão bibliográfica dos temas relacionados ao processo de furação que são: o processo de furação em aços, as grandezas físicas do processo, os fluidos de corte; problemas relacionados ao uso de fluidos de corte na furação, os fluidos de corte de base vegetal e revestimento de ferramenta.

Capítulo III – metodologia do trabalho, são apresentados os equipamentos e ferramentas, a fabricação dos corpos de prova utilizada no trabalho, os fluidos de corte, os parâmetros de corte e a metodologia dos ensaios experimentais.

Capítulo IV – são apresentados os resultados e as discussões dos ensaios realizados neste trabalho.

Capítulo V – têm-se as conclusões obtidas após a análise dos resultados e sugestões para trabalhos futuros

Capítulo VI – referências bibliográficas.

## CAPÍTULO II

### REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo será descrito os conceitos e definições mais importante relacionados ao trabalho desenvolvido. Um dos maiores desafios do trabalho consiste na avaliação do mecanismo de desgaste das brocas utilizadas.

Entre os assuntos abordados estão: a classificação dos materiais da peça e das brocas, definição de furação e tipos de desgastes, revestimentos de ferramentas e diferenças entre fluídos de corte.

#### 2.1 Materiais

##### 2.1.1 Classificação do aço ABNT 1045

O aço ABNT 1045 segundo a NBR 172/2000 é classificado como aço para construção mecânica, ao carbono e especial. Esta última consideração deve-se às exigências de ensaio de impacto no estado temperado e revenido (NBR NM 172/2000).

##### 2.1.2 Composição química do aço ABNT 1045

De acordo com a norma NBR NM 87/2000, que estabelece as composições químicas dos aços para construção mecânica, o aço ABNT 1045 deve apresentar a composição química descrita na Tab. 2.1.

Tabela 2.1 – Composição química do aço ABNT 1045 (% em massa) (NBR NM 87/2000).

<b>C</b>	<b>Mn</b>	<b>P<sub>máx.</sub></b>	<b>S<sub>máx.</sub></b>	<b>Si</b>
0,43-0,50	0,60-0,90	0,040	0,050	0,10-0,60



## 2.2 Processo de Furação

A furação é um processo mecânico de usinagem destinado à obtenção de um furo, geralmente cilíndrico, numa peça, com auxílio de uma ferramenta geralmente multicortante com movimento de corte circular Ferraresi (2003).

A grande maioria das peças presentes nas indústrias tem pelo menos um furo e, somente uma parte muito pequena dessas peças já vem com o furo pronto proveniente do processo de fundição, forjamento, etc, (DINIZ, MARCONDES e COPPINI, 2010).

Dentre as várias peculiaridades do processo, uma interessante é que a velocidade de corte não é uniforme, variando de zero no centro do furo até máximo na periferia, de forma que na região central o material não é usinado, mas sim conformado. Além disso, a geração de cavaco é de difícil observação, o fluido de corte, chega com dificuldade à aresta da ferramenta, onde é mais necessário, existindo assim uma distribuição inadequada de calor na região de corte ocorrendo atrito e desgaste pronunciado (COSTA, 2004; DE CASTRO, 2001).

As brocas helicoidais, Fig. 2.1, são os principais tipos utilizados em operações de furação dos metais, podendo ser de aço rápido ou de metal duro.

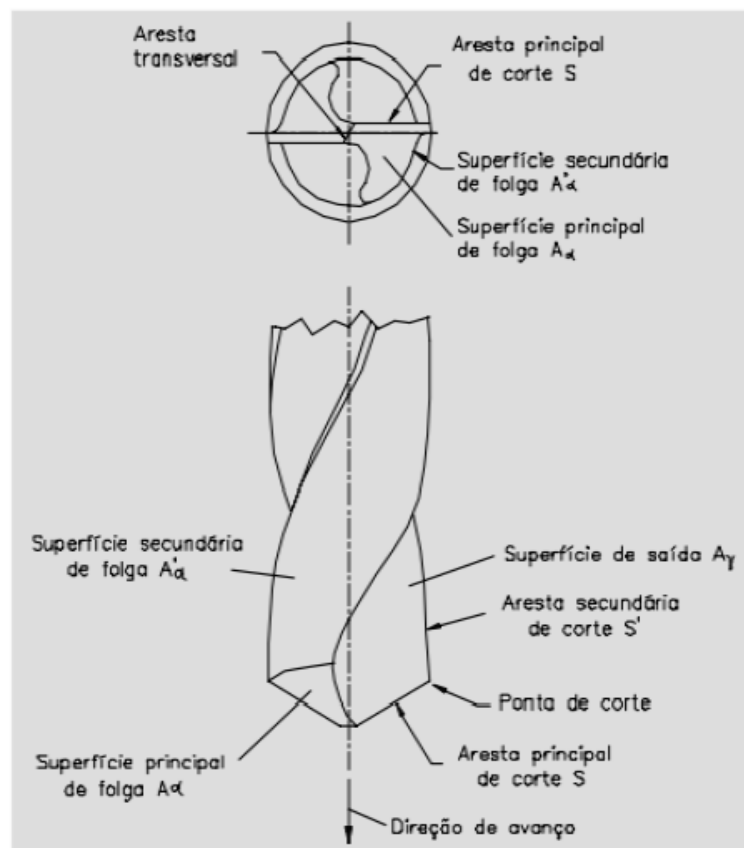


Figura 2.1 – Arestas e superfícies de corte de uma broca helicoidal (ABNT 6163, 1980).

O processo de furação faz parte do grupo de operações de corte com ferramentas de geometria definida, ou seja, arestas cortantes com formato e tamanho conhecidos, assim como torneamento e fresamento. Estima-se que a furação represente 30% de todas as operações de usinagem e 75% do volume de material removido na usinagem (CASTILLO, 2005). Apesar de sua importância tal processo recebeu poucos avanços nos últimos anos. Enquanto se desenvolvem com certa rapidez ferramentas com materiais novos para processos como torneamento e fresamento, como é o caso do cerâmico, nitreto de boro cúbico e diamante, na furação estes 4 materiais são raramente empregados e a ferramenta mais utilizada ainda é a broca helicoidal de aço rápido, seguida da broca de metal duro (DINIZ, MARCONDES e COPPINI, 2010). Esta dificuldade em acompanhar a evolução tecnológica deve-se em partes pelas condições severas nas quais o processo de furação é executado. Podemos citar as seguintes particularidades (KLOCKE, 2011):

- Variação na velocidade de corte: de zero no centro do furo a um valor máximo na periferia;
- Dificuldade de remoção de cavacos;
- Distribuição inadequada de calor na região de corte;
- Desgaste acentuado nas quinas com cantos vivos;
- Atrito entre as guias, parede do furo e o próprio cavaco;

Dentre as variantes do processo de furação, pode-se afirmar que a furação em cheio é o mais comum. Neste processo um furo cilíndrico é usinado na peça em uma única passada atingindo uma profundidade normalmente compreendida entre três a cinco vezes o diâmetro da broca. Quanto maior for a profundidade do furo mais difícil será a remoção do cavaco, fazendo-se necessário em alguns casos a interrupção do processo para remoção de cavaco e calor.

### **2.3 Mecanismo de Desgastes em Broca**

Os desgastes na ferramenta de corte são uma das causas de paradas indesejadas de máquina na indústria e a troca de ferramenta. Esses desgastes podem ser minimizados alterando os parâmetros de usinagem, reduzindo assim sua ocorrência.

Solicitações mecânicas, térmicas e tribológicas decorrentes dos processos de usinagem levam a desgastes e sobrecarga mecânicas e térmicas dos gumes de ferramentas de corte, que podem resultar em sinais típicos de desgaste como, desgaste de cratera, de flanco, lascamentos de várias dimensões ou deformações plásticas, Fig. 2.2 (CASTILLO, 2005). Os diversos mecanismos de desgaste agem simultaneamente, de forma que tanto

sua causa como seu defeito dificilmente podem ser distinguidos entre si, resultando em uma complexa interação de vários fatores de desgaste (KONIG, et al., 1997).

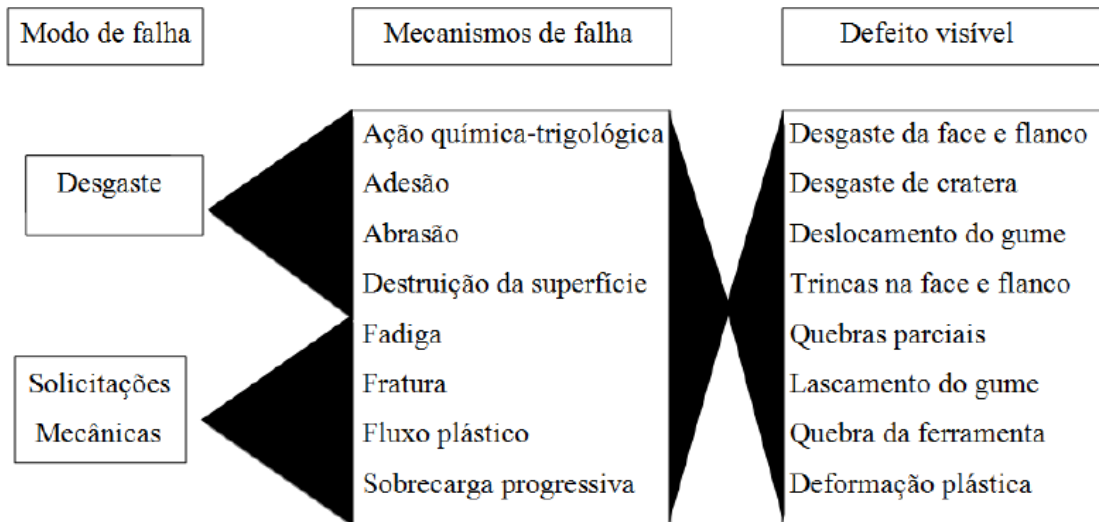


Figura 2.2 – Falhas em ferramentas de corte (BUNSHAH, 2001).

A Fig. 2.3 apresenta um diagrama clássico, onde a importância dos quatro principais mecanismos de desgastes é ilustrada em função da temperatura de corte. Em baixa temperaturas, predomina o mecanismo de adesão atuando em conjunto com a abrasão. Em temperaturas elevadas, a adesão perde lugar aos mecanismos de difusão e oxidação (KLAUBERG, 2009).

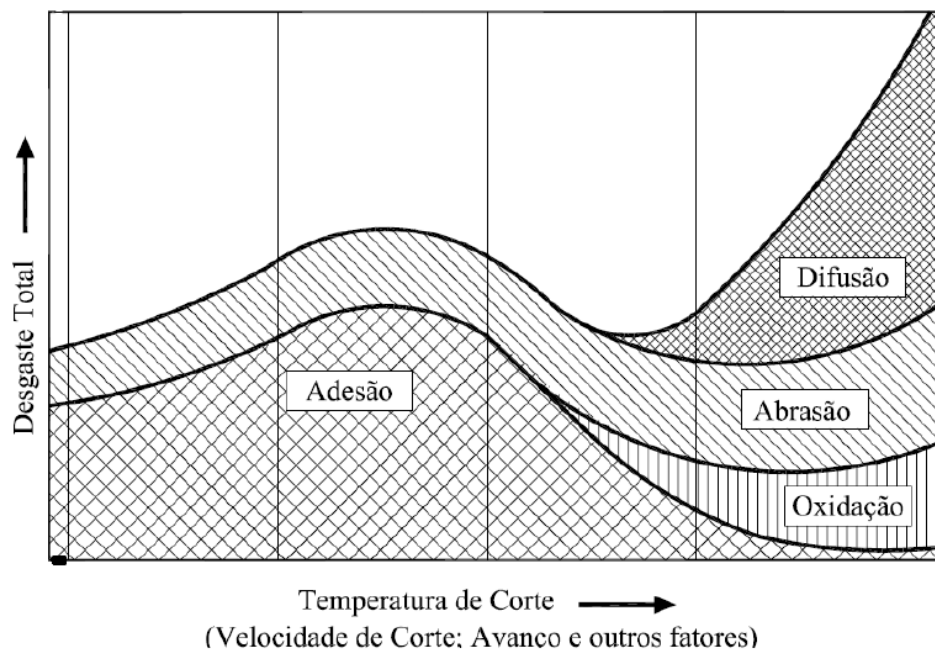


Figura 2.3 – Diagrama de distribuição dos mecanismos de desgaste das ferramentas de corte (KONIG, et al., 1997)

- **Abrasão Mecânica:** a abrasão mecânica é uma das principais causas de desgaste da ferramenta. Tanto o desgaste de flanco quanto o desgaste de cratera pode ser gerado pela abrasão. No entanto, cabe destacar que ela faz mais proeminente no desgaste de flanco, já que a superfície de folga entra em atrito com um elemento rígido(peça), enquanto a face entra em atrito com um elemento flexível(cavaco). O desgaste gerado pela abrasão é intensificado pela presença de partículas duras no material da peça e pela temperatura de corte que reduz a dureza da ferramenta. Com isso, partículas da ferramenta são arrancadas à alta pressão e temperatura, em razão do atrito entre ferramenta peça. Assim, quanto maior a dureza a quente da ferramenta, maior será sua resistência ao desgaste por abrasão. Trent (2000) relata que o desgaste por abrasão é possível responsável por atrito durante o corte por cisalhamento de material, ocasionando vibração, que posteriormente origina a falha catastrófica de ferramentas.
- **Difusão:** a difusão entre ferramenta e cavaco é um fenômeno microscópico ativado pela temperatura na zona de corte. A difusão no estado sólido consiste na transferência de átomos de um metal a outro, dependendo da temperatura, da duração do contato e da afinidade físico-química dos dois metais envolvidos na zona de fluxo (zona de cisalhamento secundário). A difusão é responsável, sobretudo pelo desgaste de cratera em altas velocidades de corte.
- **Oxidação:** a exposição a alta temperatura e a presença de ar e água (contida nos fluidos de corte) gera oxidação para a maioria dos metais. O desgaste gerado pela oxidação se forma especialmente nas extremidades de contato cavaco/ferramenta, em virtude do acesso do ar nesta região, sendo esta uma possível explicação para o surgimento do desgaste de entalhe.
- **Aderência:** se duas superfícies metálicas são postas em contato sob cargas moderadas, sob baixas temperaturas e baixa velocidade de corte, forma-se entre elas um extrato metálico que provoca aderência. A resistência desse extrato é elevada a tal ponto que, na tentativa de separar as superfícies, ocorre ruptura em um dos metais e não na superfície de contato. Assim, partículas da superfície de um metal migram para a superfície de outro.

O fenômeno da aderência está presente na formação de gume posição de corte, mas pode-se ter desgaste por aderência mesmo sem a formação deste. Tal fenômeno também é importante na formação do desgaste de entalhe. Além disso, a utilização adequada do fluido de corte (principalmente com efeito lubrificante) bem como o revestimento da ferramenta com materiais de baixo coeficiente de atrito (como o nitreto de titânio) têm grande influência na diminuição desse tipo de desgaste (MARQUES, 2012). A Fig. 2.4 mostra esses mecanismos de desgaste que ocorre na usinagem.

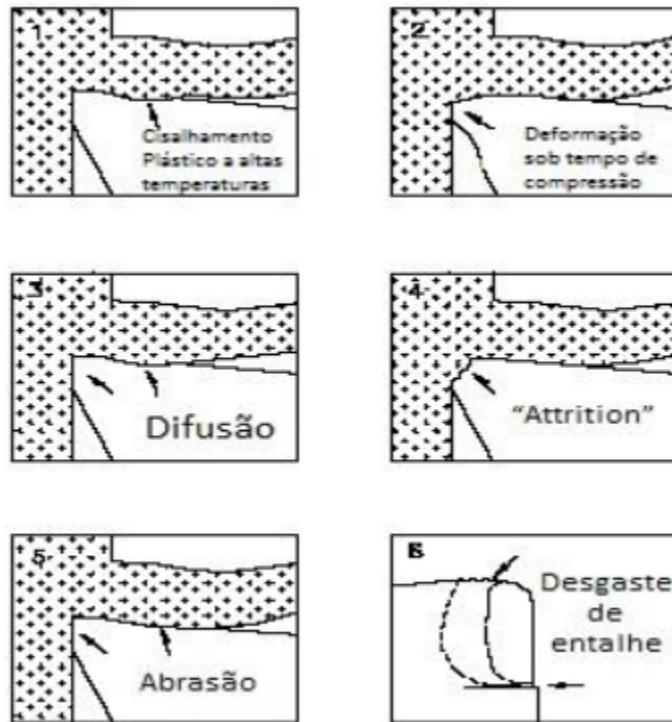


Figura 2.4 – Mecanismos de desgaste (MACHADO et. al., 1999)

## 2.4 Desgastes em Broca Helicoidais

O desgaste em ferramentas de corte passa por estágios de desgaste. Inicialmente o desgaste é rápido, devido à adequação natural ao sistema tribológico envolvido, seguido por um período constante e finalmente por uma aceleração, promovendo num curto espaço de tempo, elevados níveis de temperatura e tensões que eventualmente conduzem a ferramenta ao colapso (Machado et al., 2009). No caso de brocas helicoidais o desgaste é um fenômeno progressivo e comparativamente lento enquanto a avaria e a quebra da aresta principal de corte são normalmente catastróficas e repentinas (Ertunc et al., 2001). A Figura 2.5 ilustra a típica evolução de desgaste em uma broca helicoidal.

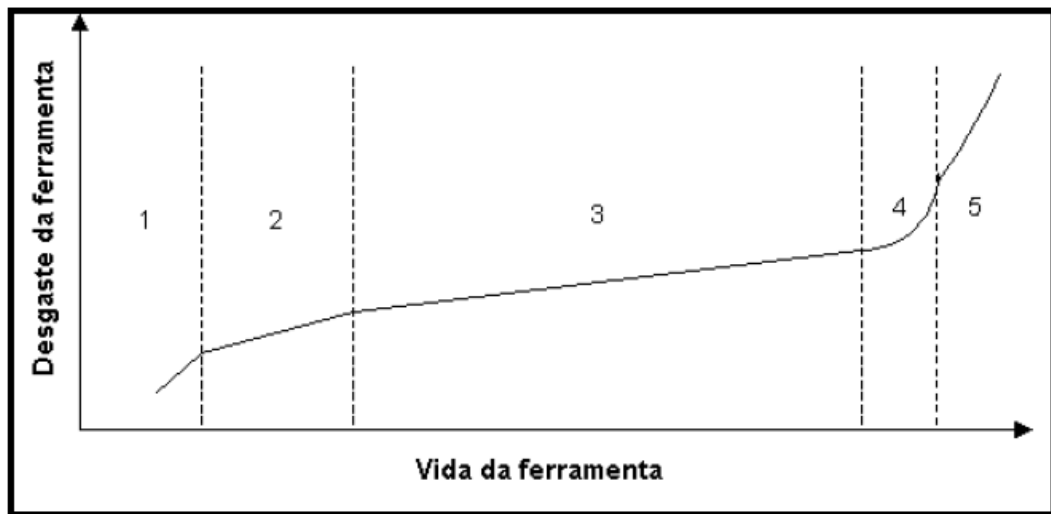


Figura 2.5 - Evolução do desgaste em brocas helicoidais: (1) desgaste inicial, (2) desgaste leve – regular, (3) desgaste moderado por microlascamentos, (4) desgaste severo e (5) colapso (Ertunc et al., 2001)

Segundo Bork (1995) as formas de desgaste em brocas helicoidais são classificadas em (Figura 2.6):

- Desgaste de flanco (VB) - ocorre ao longo de sua aresta de corte, podendo ser classificado ainda em desgaste de flanco médio ( $VB_B$ ) e desgaste de flanco máximo ( $VB_{B\text{ máx}}$ );
- Desgaste das guias (H) - o comprimento médio “H”, medido sobre todas as guias da ferramenta em relação à sua aresta de corte;
- Desgaste de cratera ( $K_b$ ) - corresponde à dimensão “ $K_b$ ”, a qual é a medida do ponto mais afastado do lado oposto da cratera em relação a aresta de corte. Tal desgaste também pode ser dado por “ $K_T$ ”, caso seja expresso pela profundidade da cratera;
- Lascamento – os lascamentos nas arestas principais de corte da broca (medidas “ $P_m$ ” para a largura e “ $P_t$ ” para a profundidade), os quais também podem ocorrer na aresta transversal;
- Arredondamento das quinas - este tipo de desgaste se caracteriza pelo arredondamento da quina da broca, abrangendo ou não toda a largura da guia. Sua medida também corresponde ao valor médio do arredondamento de todas as quinas da ferramenta;
- Desgaste da aresta transversal-dimensionado através das medidas “ $C_m$ ” (largura da faixa de desgaste) e “ $C_t$ ” (ponto mais alto do desgaste);
- Colapso total – é definido como sendo simplesmente a destruição da broca (Schuitek et al., 1992; citado por De Andrade, 2005). Esta definição também considera a inutilização da broca por danos que não necessariamente venham destruí-la.

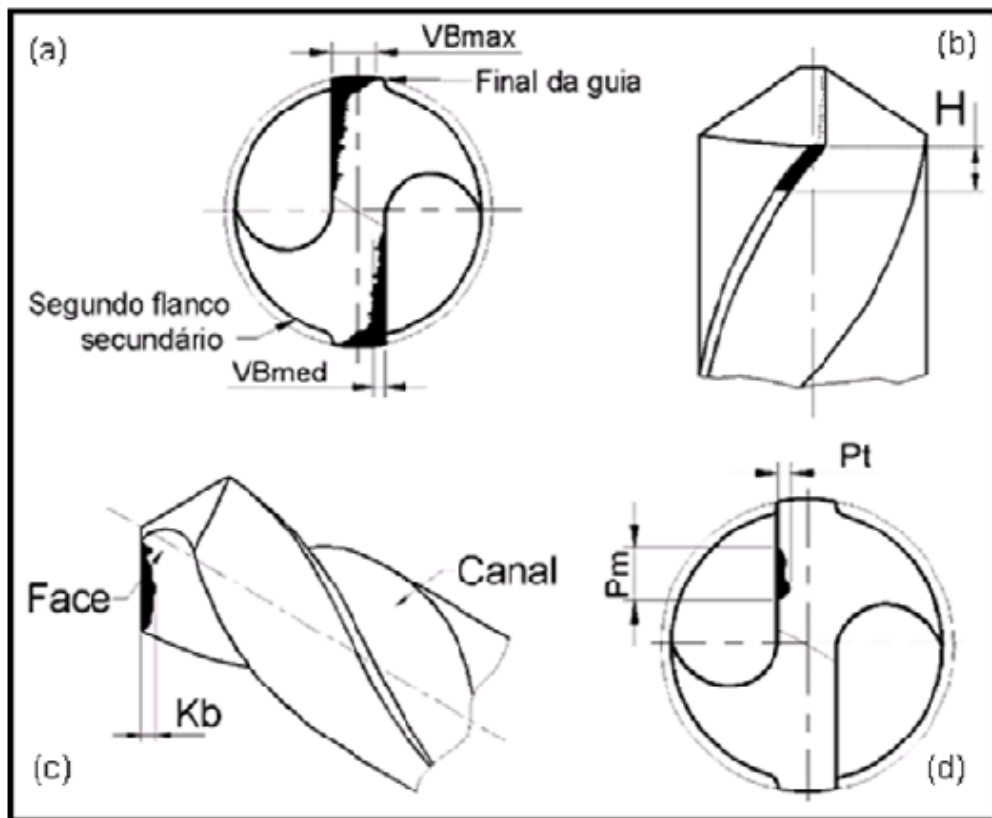


Figura 2.6 - Forma de desgaste em brocas helicoidais: (a) desgaste de flanco, (b) desgaste nas guias, (c) desgaste de cratera e (d) lascamento (Bork, 1995)

O desgaste de flanco geralmente é o principal fator a limitar a vida das ferramentas de corte. Decorre da perda do ângulo de folga da ferramenta, ocasionando um aumento da área de contato entre a superfície de folga e o material da peça, tornando maior o atrito naquela região. Todo o processo de usinagem causa desgaste de flanco, provocando a deterioração do acabamento superficial e a perda das características dimensionais da peça. (SANTOS, et al., 2007)

Os parâmetros de corte são responsáveis por determinar o desempenho e a vida da ferramenta, estipulado em muitos testes com brocas, pelo desgaste de flanco  $VB_{máx}$  indicado na Fig. 2.7. Este desgaste é incentivado pelo aumento da velocidade de corte.

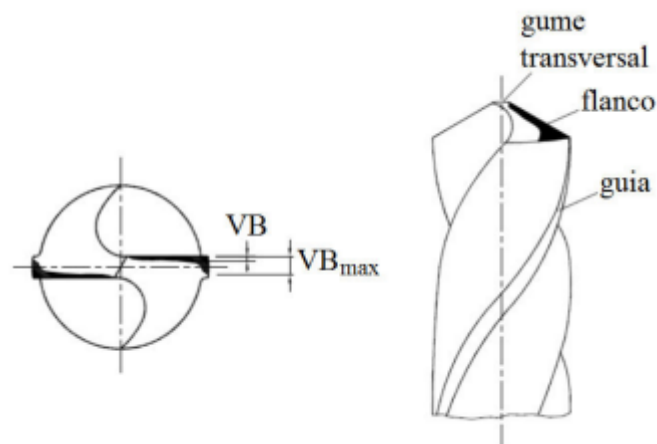


Figura 2.7 – Desgaste de flanco de brocas helicoidais (SANTOS, 1999)

A utilização de fluidos de corte nos processos de usinagem tem como objetivo principal a redução do atrito na região de corte por meio de lubrificação, redução da temperatura por meio do resfriamento com aumento da convecção, redução do desgaste da ferramenta através de uma combinação destas funções, além de auferir redução nos custos de usinagem. No entanto, o uso de fluidos de corte em operações de usinagem tem sido questionado nos últimos anos devido aos problemas ambientais e de saúde que provocam (REDDY et al., 2010).

## 2.5 Material da ferramenta de corte

As principais propriedades que o material de ferramenta de corte deve possuir são (MACHADO et al., 2009):

- a) dureza elevada;
- b) tenacidade suficiente para evitar falha por fatura;
- c) alta resistência à compressão;
- d) alta resistência ao cisalhamento;
- e) boas propriedades mecânicas e térmicas a temperaturas elevadas;
- f) alta resistência ao choque térmico;
- g) alta resistência ao impacto;
- h) ser inerte quimicamente.

Os materiais mais utilizados na fabricação das brocas destacam-se o aço-rápido (HSS) e o metal duro. As brocas de aço-rápido respondem por pelo menos 80% das ferramentas utilizadas na furação (DE CASTRO, 2001). Em operações onde se exigem



elevadas dureza e resistência ao desgaste, as brocas de aço-rápido recebem normalmente revestimentos de TiAlN, TiCN ou TiN.

Os revestimentos têm sido usados e desenvolvidos com o intuito de aumentar o desempenho dessas brocas, com o aumento da resistência à abrasão e o aumento da lubrificidade, e para reduzir a aresta postiça de corte relacionada com a soldagem dos cavacos (VIANA, 2004). Isto provoca a redução do desgaste por adesão, a redução dos coeficientes de atritos e as forças de usinagem. Estes revestimentos devem servir também como isolantes térmicos entre o cavaco e a ferramenta, possuindo assim elevada dureza a quente.

### **2.5.1 Nitreto de Titânio**

Os revestimentos de TiN são largamente empregados industrialmente para melhoria de propriedades mecânicas e vida de ferramentas de corte, matrizes e componentes mecânicos. Uma das mais importantes características destes revestimentos é a resistência de adesão entre a camada de revestimento e o substrato que é necessária para suportar vários tipos de carga como cargas cíclicas, mecânicas, cargas térmicas, etc. que são aplicadas aos revestimentos. A maioria dos revestimentos é preparada por deposição física de vapor ou deposição química de vapor e as suas propriedades de adesão são prontamente melhoradas usando vários métodos tais como pré-tratamento de substratos, inserção de uma camada intermediária, múltiplas camadas, ou gradiente composicional (KIM et al., 2003). Revestimentos de TiN obtidos por deposição física de vapor em baixas temperaturas resultam em notável resistência ao desgaste em corte contínuo de aços não ligados e ligados. Baixas temperaturas de deposição também podem ser obtidas usando deposição química de vapor assistida por plasma (RICHTER et al., 1996).

A durabilidade do revestimento de TiN depende não somente das propriedades mecânicas do revestimento tais como sua dureza, adesão e resistência ao desgaste, mas também a sua resistência à oxidação. Dentre os vários revestimentos duros, TiN e TiC são os revestimentos cerâmicos mais utilizados em ferramentas de corte em função da elevada dureza, resistência ao desgaste, baixo coeficiente de atrito, resistência a alta temperatura e estabilidade química.

A aplicação de revestimentos de TiC e TiN por PVD e CVD em ferramentas de aço reduz o o desgaste em até seis vezes. Testes de desgaste realizados em aço D3 revestido com TiN apresentaram um desgaste de 4 a 24% do desgaste do mesmo aço sem revestimento dependendo da condição inicial de rugosidade da superfície. O aumento da

resistência ao desgaste na vida da ferramenta revestida com TiN pode ser esperado quando a rugosidade da superfície é menor que a espessura do revestimento. É sabido que o desempenho dos revestimentos sob condições de desgaste é muito dependente da dureza e da qualidade do revestimento depositado no substrato. As superfícies revestidas desgastem-se muito lentamente em comparação com as superfícies sem revestimento. Quando o revestimento quebra, a taxa de desgaste aumenta e se aproxima da taxa de desgaste das superfícies sem revestimentos. Os fragmentos duros do revestimento agem como um terceiro corpo podendo causar severo desgaste aumentando a perda de material (ZEGHNI et al., 2004). Dentre todos os revestimentos, o TiN é favorecido pela sua dureza elevada e pela aparência dourada, seja produzido por PVD ou CVD; é ainda o revestimento de maior abrangência de aplicação industrial variando de máquinas ferramentas, componentes mecânicos a elementos decorativos (SU, 1997). Há uma espessura ótima do revestimento de TiN depositado em ferramentas de aço rápido por PVD que é de 2,8  $\mu\text{m}$  na usinagem de aço de corte livre. Um aumento na espessura do revestimento para 4.1  $\mu\text{m}$  por CVD não produz uma significativa melhoria no desempenho da ferramenta (MALIK, 2000).

O início e a propagação de trincas são na maioria das vezes responsáveis pelo desgaste e remoção dos revestimentos depositados por PVD nas ferramentas e nos elementos de máquinas. Uma maneira de melhorar a resistência à fratura é através da aplicação de multicamadas alternadas e finas de um material duro TiN e um material macio, mais dúctil (Ti). A camada de Ti permite uma extensa deformação plástica na ponta da trinca e também, em função do pequeno módulo elástico comparado com o TiN, promove a deflexão da trinca para o plano do revestimento. (BROMARK, 1997).

### **2.5.2 Nitreto de Titânio e Alumínio**

O revestimento de TiAlN representa um importante papel no desenvolvimento dos revestimentos aplicados pelo Processo PVD. Mesmo este revestimento sendo conhecido há mais tempo, somente os novos processos de deposição de elevada ionização estão permitindo que as propriedades deste revestimento sejam controladas para produzir desempenho na usinagem superior ao de outros revestimentos (PRENGEL et al., 1997).

O revestimento de TiAlN é uma evolução do largamente utilizado revestimento de nitreto de titânio. O revestimento de TiAlN pode somente ser produzido por processos que geram a formação de um plasma para que ele seja depositado como uma fase cristalográfica metaestável. Baseado em diferentes parâmetros como a composição do

material alvo, a taxa de evaporação e dos parâmetros de ionização do plasma, parte do titânio pode ser substituído pelo alumínio em diferentes níveis. Os revestimentos de TiAlN são basicamente depositados pela evaporação do material alvo Ti-Al usando o gás reativo nitrogênio

Revestimentos como TiN (Nitreto de Titânio) têm menos tendência de difusão nos aços, sua dureza média é de 2300 HV, sendo um revestimento com grande gama de aplicação devido ao fato de possuir um bom balanço entre propriedades como: dureza, tenacidade, aderência (sobre o aço-rápido e o metal duro), estabilidade química, estabilidade térmica e reduzido coeficiente de atrito (VIANA, 2004), propiciando uma melhor qualidade da superfície usinada e menores esforços de corte.

Com a utilização do TiN também há a possibilidade da diminuição das forças de corte e da temperatura, que provavelmente ocorre devido a uma melhora nas condições de contato na aresta de corte da ferramenta e redução do coeficiente de atrito (MACHADO et al., 2009).

O TiN pertence ao grupo de materiais metálicos duros enquanto AlN pode ser conectado ao grupo de materiais duros covalentes. Na difração de raios-X, a estrutura cúbica de face centrada pode ser identificada facilmente nos filmes finos de TiN. Nos filmes de TiAlN os átomos de titânio na grade de TiN são parcialmente substituídos pelos átomos de Al. Em função do menor tamanho do átomo de alumínio comparado com o átomo de titânio, a estrutura deste revestimento torna-se deformada, o que aumenta a resistência da célula unitária. Em diferentes testes de avaliação do revestimento de TiAlN quando comparado com o revestimento de nitreto de titânio, ele mostrou superior resistência à oxidação. Enquanto o TiN se oxida em temperaturas acima de 600 °C, o TiAlN mostra uma resistência à oxidação superior a 800 °C. Quando o TiAlN se oxida, ocorre a formação de uma camada superficial de  $Al_2O_3$  o que aumenta a resistência à difusão e oxidação do filme de TiAlN. Comparado com o TiN, o sistema ternário do revestimento (Ti, Al) N mostra uma elevação na dureza mesmo em temperaturas elevadas. O aumento do conteúdo de alumínio nos filmes de (Ti,Al)N causa redução na taxa de desgaste das ferramentas, sendo que os melhores resultados são obtidos quando está relação é próxima de  $Al/Ti = 1.1$ . (TÖNSHOFF et al., 1997).

Sobre o ponto de vista químico, a maioria dos revestimentos de TiAlN tem mais que 50% de alumínio e teoricamente deveria ser chamado de AlTiN. Porém, desde a introdução desta nova família de revestimentos o nome TiAlN vem sendo utilizado (MCCABE, 1999).

A elevada resistência térmica do TiAlN faz este revestimento ser adequado para usinagem a seco e usinagem em alta velocidade de corte (CSELLE et al., 1995). Com a usinagem a seco os usuários desejam trabalhar sem o uso de líquido refrigerante em

abundância, para proteger o ambiente e reduzir custos. Com a usinagem de alta velocidade, os parâmetros de corte podem ser aumentados por fatores que variam de 4 a 10. Com ambas tecnologias muito mais calor se desenvolve que em condições normais. O material da ferramenta de corte deve ter uma elevada dureza e não pode trabalhar sem revestimento, sem uma boa isolação entre os cavacos e o corpo da ferramenta (CSELLE et al., 1995). De todos os revestimentos a base de titânio, a melhor isolação térmica é dada pelo revestimento de TiAlN, que confere à ferramenta um relevante aumento na vida, tornando-a apta para a usinagem a seco e em alta velocidade de corte. (CSELLE et al., 1995)

A vantagem fundamental do TiAlN é que este revestimento forma uma densa e altamente adesiva camada protetiva de  $Al_2O_3$  na sua superfície quando aquecido, prevenindo a difusão de oxigênio para o material do substrato. O uso de revestimento contendo Al é relatado também como sendo vantajoso em operações de usinagem que combinam altas temperaturas de corte com altas cargas mecânicas no material da ferramenta. Isto é usualmente explicado por dois efeitos: a) a formação de uma fina camada de  $Al_2O_3$  na superfície da ferramenta que é barreira protetora contra o  $O_2$ , protegendo contra a tribo-oxidação. Isto é importante para as operações de corte interrompido e para a redução do desgaste de entalhe na aresta de corte do metal duro; b) comparativamente alta dureza em elevada temperatura. Verifica-se na Fig. 2.8 que o revestimento de TiAlN passa ser o mais duro que os outros revestimentos a partir de 800 °C. Isto propicia boa resistência ao desgaste abrasivo na usinagem em altas velocidades de corte (KLOCKE, 1999).

A outra vantagem para as aplicações do revestimento de TiAlN em usinagem é a sua baixa condutividade térmica. Consequentemente mais calor é dissipado pelo cavaco. Isto propicia que altas velocidades de corte sejam utilizadas, uma vez que a carga térmica no substrato é menor. Entretanto, o revestimento de TiAlN em geral mostra um desempenho inferior quando comparado ao TiN nos casos de baixa velocidade de deslizamento ou em processos de corte interrompido, em função do seu elevado coeficiente de atrito e da sua fragilidade (HSIEH et al., 1998).

O relativo bom desempenho do TiAlN em elevadas velocidades de deslizamento é explicada pela sua baixa taxa de oxidação em elevadas temperaturas (HEDENQVIST, 1997).

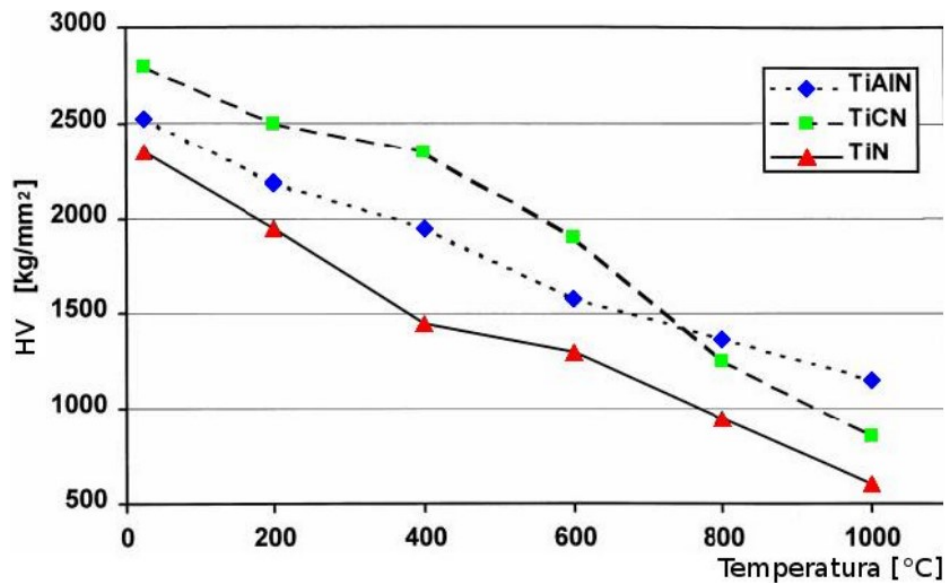


Figura 2.8 – Variação da Microdureza Vickers dos revestimentos de titânio em função da temperatura (JINDAL et al., 1999)

## 2.6 Fluidos de corte

Os fluidos de corte surgiram com o objetivo final de reduzir o custo de usinagem pela redução do desgaste da ferramenta, além de aumentar a taxa de produção pelo emprego de maiores velocidades e avanços no corte (Costa, 2004).

No processo de furação, um dos fatores que mais afetam o desempenho da ferramenta de corte e as propriedades mecânicas da peça é a temperatura de corte entre a broca e cavaco. Afetando de forma direta a qualidade do furo, rugosidade, desgaste da ferramenta, e limita o aumento na velocidade de corte (MACHADO et al., 2009). As condições térmicas na furação diferem dos outros processos como torneamento. O cavaco é formado no fundo do furo e permanece em contato com a broca em uma longa distância, aumentando à temperatura da ferramenta que continua em constante aumento proporcional a profundidade do furo (MIRANDA, 2003).

Os fluidos de corte desempenham um papel fundamental no processo de usinagem, uma vez que influenciam diretamente na temperatura de usinagem e no atrito gerado na interface cavaco ferramenta, propiciando redução do desgaste da ferramenta e melhorando a qualidade da superfície usinada (MACHADO et al., 2009):

Além disso, podemos considerar como função secundária para os fluidos de corte:

- a) melhoria no acabamento, pela redução ou eliminação da APC e pela redução das forças de corte devido ao efeito lubrificante;

- b) ajudar a retirar o cavaco da zona de corte, pois estes cavacos podem comprometer o acabamento e a ferramenta de corte. Isto é de singular importância em processo como furação;
- c) proteger a máquina-ferramenta e a peça da corrosão atmosférica. Neste caso são adicionados aditivos antioxidantes e anticorrosivos aos fluidos;
- d) evitar o aquecimento excessivo da peça, problemas de controle dimensional e queimaduras do operador;
- e) contribuir na quebra do cavaco, injetando fluido sob alta pressão ou agindo na redução da área de contato cavaco-ferramenta provocando uma maior curvatura do cavaco e facilitando sua quebra;
- f) refrigerar a máquina-ferramenta.

Conforme Miranda (2003), os efeitos da eliminação do fluido de corte nas ferramentas são intensos, uma vez que os mecanismos de desgaste são ativados com o aumento da temperatura. A elevação da temperatura acontece pela falta de refrigeração, beneficiando a ocorrência de deformações plásticas, adesões, difusão, oxidação e aumento do atrito peça/ferramenta/cavaco. A consequência destes efeitos é uma redução significativa na vida da ferramenta.

O comportamento de desgaste da ferramenta de corte é diretamente proporcional às solicitações mecânicas e térmicas às quais as arestas encontram-se submetidas. Para o processo de furação, estas condições se intensificam com a eliminação do fluido lubrificante do processo (ZEILMANN, 2003).

### **2.6.1 Problemas relacionados ao uso de fluidos de corte**

Apesar das diversas vantagens inerentes da aplicação dos fluidos de corte, nos processos de usinagem, é importante salientar os altos custos associados à sua aquisição, ao armazenamento, o preparo, o controle em serviço e, finalmente e descarte, que podem representar até 20% do custo total (SCANDIFFIO, 2000). As desvantagens são inerentes tanto nos aspectos econômicos, ambientais e na saúde do operador.

O contato prolongado e frequente com os fluidos de corte pode originar diversas formas de irritação da pele e em certos casos até câncer. Para amenizar estes e outros problemas causados pelos fluidos de corte, deve-se fazer frequentemente um controle adequado da quantidade de fungos, bactérias e do pH do fluido, aliado a uma prática de

higiene pessoal por parte dos operadores, como por exemplo, a aplicação de cremes protetores apropriados antes do início do serviço e após o trabalho (SALES, 1999).

De um modo abrangente, os fluidos de corte podem produzir vários efeitos prejudiciais, como (SALES, 1999):

- a) contaminação do meio ambiente, como córregos, lagos e rios;
- b) a procriação de fungos e bactérias;
- c) doenças de pele, entre elas pequenas alergias e dermatites;
- d) a produção de vapores tóxicos, com fortes odores desagradáveis, que pode provocar doenças respiratórias;
- e) câncer de vários tipos como, de cólon, bexiga, pulmão, pâncreas, sino nasal, laringe, entre outros;
- f) risco de combustão, e até de explosão.

Fatores como custo, e a pressão exercida por agências de proteção ambiental e de saúde estão apontando na direção da usinagem a seco sempre que for possível, ou pelo menos na redução da vazão do fluido de corte (usinagem com Mínima Quantidade de Lubrificante de Corte - MQL). Estas técnicas estão sendo cada vez mais possíveis de serem realizadas, devido ao enorme avanço tecnológico nas áreas dos materiais e geometrias das ferramentas de corte (COSTA, 2004).

Nesse sentido, um desafio para a indústria metal mecânico têm sido a utilização de técnicas de redução da quantidade de fluido aplicado ou até mesmo a usinagem a seco, quando possível, considerada por muitos autores como usinagem ecológica.

Entretanto, a usinagem a seco, se esbarra em fatores econômicos ou mesmo fatores operacionais em processos como a furação.

Os fluidos de base vegetal, técnicas como MQL e até mesmo a redução do volume aplicado (conhecido como aplicação de fluido a baixas vazões ou vazões reduzidas) surgem como boas alternativas.

### **2.6.2 Fluidos de corte de base mineral**

Loredana et al. (2008) citam que aproximadamente 85% dos fluidos de corte usados mundialmente são de origem mineral, que podem causar um enorme efeito negativo ao meio ambiente, devido ao seu incorreto descarte.

Os fluidos de corte são, na grande maioria, à base de óleo mineral, devido principalmente à relação entre o custo e características técnicas necessárias ao processo.

No entanto, estes fluidos de corte são compostos por substâncias geradoras de poluição, apresentando elevado potencial toxicológico ao homem e baixa biodegradabilidade (ALVES; OLIVEIRA, 2008).

Os fluidos de base mineral são hidrocarbonetos obtidos a partir do refino do petróleo. Suas propriedades dependem da sua estrutura molecular e do seu grau de refino. Comparados aos fluidos de base vegetal esses apresentam maiores resistências à oxidação, e mantém sua viscosidade constante para elevadas faixas de temperaturas (MACHADO et al., 2009).

### **2.6.3 Fluidos de corte de base vegetal**

O uso de fluidos de corte de base vegetal tem sido cada vez mais utilizado pela indústria, pois, além de poluírem menos o ambiente, causam menos agressão ao operador e proporcionam uma melhora significativa na vida das ferramentas, mas também podem ser facilmente contaminados por micro-organismos, já que possuem uma grande gama de nutrientes que facilitam sua reprodução (GRUB, 2013).

Os fluidos de corte de base vegetal possuem várias vantagens, entre elas (WOODS, 2005):

- a) são mais compatíveis com a pele humana do que os óleos minerais, e têm uma tendência reduzida à formação de vapor, névoa e fumaça, além de ter um ponto de fulgor maior, reduzindo o risco de incêndio nas máquinas;
- b) possuem moléculas polares que atuam semelhantes a ímãs e se alinham à superfície do metal, formando um filme lubrificante capaz de suportar grandes tensões superficiais, facilitando a usinagem e melhorando a vida das ferramentas, Fig. 2.9. As moléculas dos óleos minerais não são polares, e por esse motivo a sua capacidade lubrificante é inferior à dos óleos vegetais. Isso também é uma vantagem quando se deseja maior produtividade;
- c) assim como os óleos minerais, os óleos vegetais não podem ser queimados, apesar de poluir menos o ambiente. Porém, a principal vantagem ecológica dos óleos vegetais, ao contrário dos óleos de base mineral, é que sua matéria-prima é degradável, poluindo muito menos o meio ambiente. Eles podem também ser reutilizáveis, como os de base mineral (KURODA, 2006).



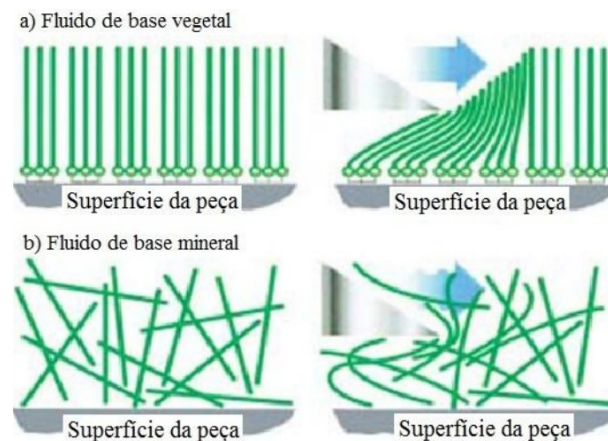


Figura 2.9 – Representação da afinidade dos fluidos com a superfície (a) fluidos vegetais (b) fluidos minerais (Adaptado WOODS, 2005)

Apesar do seu maior custo de aquisição, mais elevado quando comparado aos fluidos de base mineral, o emprego destes fluidos é compensado pelo aumento do número e a redução nos custos de fabricação (MACHADO et al; 2009).

Conforme Thomé et al. (2007), além das óbvias vantagens de caráter ambiental, os fluidos de corte de base vegetal podem aumentar a vida das ferramentas de corte, melhorar o acabamento superficial e diminuir vibrações. Enquanto os óleos de base mineral são formados por moléculas de hidrocarbonetos puros, os óleos de base vegetal possuem alguns grupos funcionais contendo oxigênio. Isto garantirá a esses óleos uma carga levemente polar, com maior atratividade por superfícies metálicas. Estes fluidos geralmente possuem maior ponto de fulgor, para os óleos de base mineral, isto praticamente evita a formação de fumaça

#### **2.6.4 A técnica de aplicação de quantidade mínima de lubrificante- MQL**

A técnica de mínima quantidade de lubrificante (MQL), Fig. 2.10, pode ser definida como a pulverização de uma quantidade mínima de lubrificante assistida por um fluxo de ar comprimido (HEISEL et al., 1998; MACHADO; DINIZ, 2000). Segundo Sahn e Schneider (1996) a vazão do sistema MQL varia, geralmente, de 10 a 250 ml/h, e opera a uma pressão de 0,4 a 0,6 MPa. Estas quantidades mínimas de fluido são suficientes para reduzir substancialmente o atrito na ferramenta e evitar a aderência de material, já que a área de contato cavaco-ferramenta é muito pequena e sugere-se que a vazão de fluido necessária para promover a ação lubrificante seja também pequena (COSTA, 2004). A usinagem com MQL surge como alternativa quando a usinagem a seco for inviável.

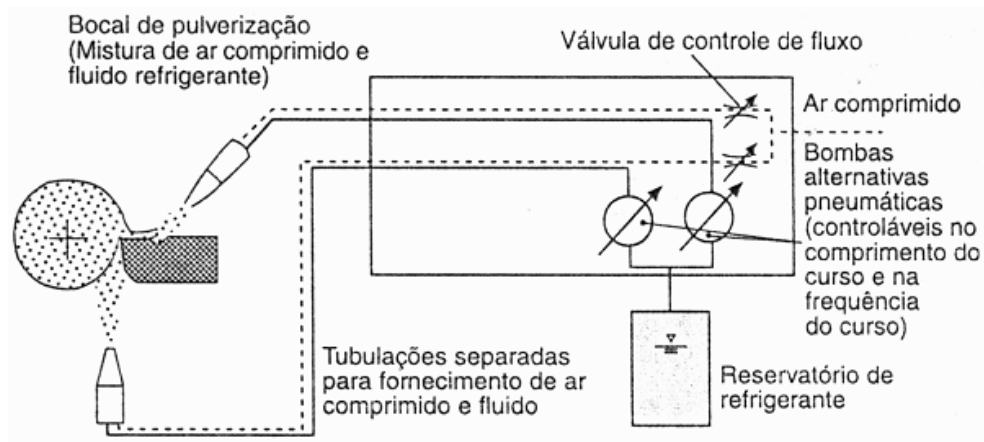


Figura 2.10– Diagrama esquemático de um sistema de MQL com o princípio de pressão (Adaptado DA SILVA, 2010).

Este sistema consiste de um reservatório para o fluido de corte com alimentação manual, válvulas para regulação dos fluxos de ar comprimido e óleo, manômetro, mangueiras condutoras (ar comprimido e fluido) e dois bicos com base de fixação magnética, para aplicação externa da mistura ar comprimido fluido sobre a ferramenta-peça. O fluido de corte é conduzido através de uma mangueira de menor diâmetro que chega ao bico, dentro de outra maior que conduz o ar comprimido.

Em relação à refrigeração convencional (abundante), Heisel et al. (1998) citam algumas vantagens:

- a quantidade de fluido utilizada é bem menor;
- redução de custos de manutenção e descarte;
- podem ser evitados materiais de filtragem e reciclagens da manutenção dos lubrificantes;
- as peças ficam quase secas, eliminando uma operação de lavagem subsequente;
- o baixo conteúdo de óleo que permanece nos cavacos não justifica sua recuperação;
- a aplicação de biocidas e preservativos pode ser enormemente eliminada, porque apenas a quantidade de fluido que será usada em um turno de trabalho deve ser colocada no reservatório do sistema de quantidade mínima.

Segundo Costa (2004), esta técnica, que tem conquistado cada vez mais adeptos da usinagem, é uma alternativa para operações em que o fluido de corte ainda não pode ser totalmente dispensado, como no caso de furação de aços e ferros fundidos. Ela é intermediária à usinagem com refrigeração/lubrificação em abundância (jorro) e a

absolutamente sem fluido (a seco). A técnica MQL, especificamente adaptada ao processo, pode substituir o jorro sem a modificação dos parâmetros de corte e sem redução da vida das ferramentas.

# CAPÍTULO III

## METODOLOGIA

Este capítulo traz uma descrição dos materiais, ferramentas, equipamentos e métodos utilizados na realização dos experimentos, assim como da sistemática utilizada para sua realização. A metodologia deste trabalho foi baseada no desenvolvimento experimental de ensaios sistemáticos reproduzindo situações encontradas no meio industrial, como mostra a Fig. 3.1.

Os ensaios experimentais de furação foram feitos em um centro de Usinagem Vertical CNC, modelo Discovery modelo 760 - ROMI, com 9kW do Laboratório de Ensino e Pesquisa em Usinagem. Foram realizadas 3 repetições para cada condição, com o objetivo de adquirir uma maior confiabilidade e segurança dos dados levantados.

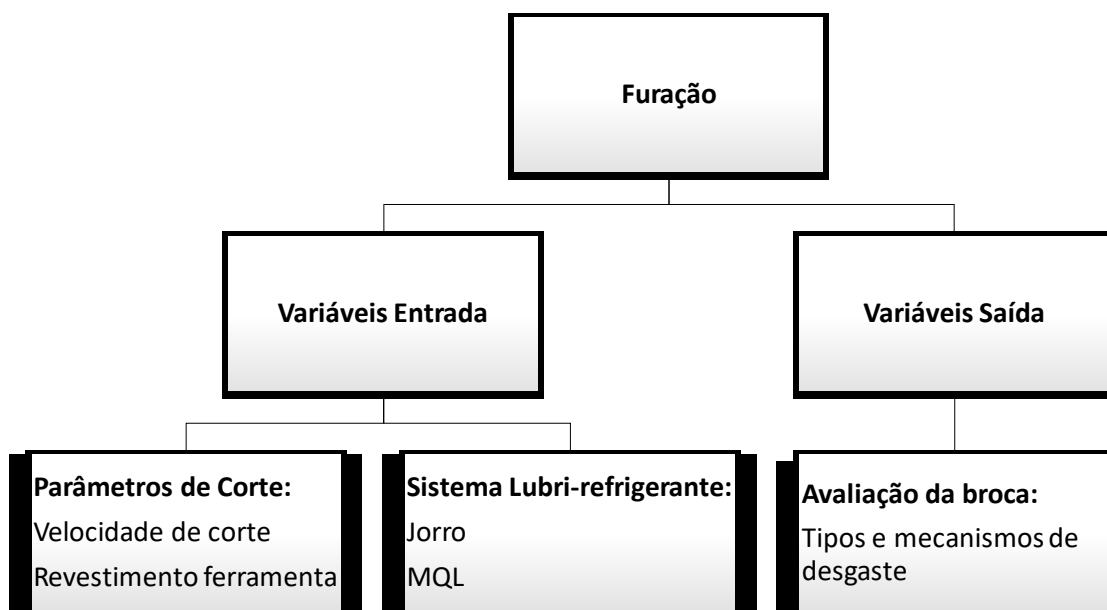


Figura 3.1 – Variáveis de entrada e saída dos ensaios de Furação.

### 3.1. Material Usinado

A preparação da amostra de aço ABNT 1045 para a análise da microestrutura foi feita conforme procedimento usual com lixamento progressivo, polimento e ataque com reagente Nital na concentração de 2% por 10 segundos. A imagem foi registrada com uma câmera Olympus QColor3, acoplada a um microscópio Olympus BX 51M. O resultado mostrado na Fig. 3.2 apresenta microestrutura ferrita mais perlita.

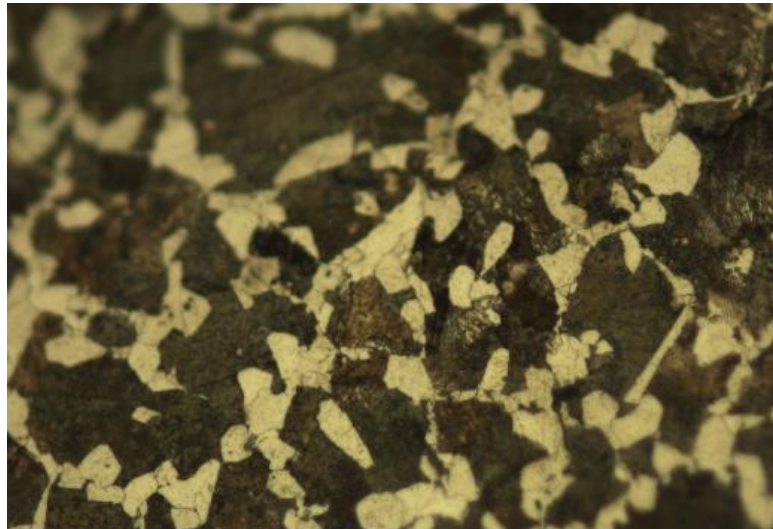


Figura 3. 2 – Microestrutura do corpo de prova aço ABNT 1045. Ataque: Nital 2%, 10s, 50x.

Na Tab. 3.1 é apresentada a composição química do aço ABNT 1045. Foram realizados ensaios no Laboratório de Tribologia e Materiais, da Faculdade de Engenharia Mecânica, para medições de microdureza no material, resultando em valores médios de 249 HV.

Este material é bastante utilizado na fabricação de componentes de uso geral onde seja necessária uma resistência mecânica superior ao dos aços de baixo carbono convencionais, como eixos em geral, pinos, cilindros, ferrolho, parafusos, grampos, braçadeiras, pinças, cilindros, pregos, colunas, entre outros.

Tabela 3. 1 – Composição química do aço ABNT 1045, (% em massa)

<b>C</b>	<b>Mn</b>	<b>P<sub>máx.</sub></b>	<b>S<sub>máx.</sub></b>	<b>Si</b>
0,43-0,50	0,60-0,90	0,04	0,050	0,10-0,60

### 3.2. Ferramenta

Na Fig. 3.3 mostra as das brocas revestidas por TiN (lado esquerdo) e TiAlN (lado direito) e na Tab. 3.2 a especificação de sua geometria.

Tabela 3. 2 – Ângulos e dimensões das brocas utilizadas nos ensaios

Ângulo	Comprimento [mm]			
	Ponta ( $\sigma$ )	Total ( L )	Canal ( l )	Diâmetro ( Ds )
140°		79	41	8



Figura 3. 3 – Brocas utilizadas no projeto lado esquerdo a revestida com TiN e direito TiAlN.

Os revestimentos utilizados apresentam as seguintes propriedades médias, Yongqiang et al. (2013):

- TiN – nanodureza = 24 GPa; Coeficiente de atrito = 0,6 a 0,9; Máxima temperatura de trabalho = 600°C;
- TiAlN – nanodureza = 30 a 40 GPa; Coeficiente de atrito = 0,6 a 0,9; Máxima temperatura de trabalho = 700°C.

### 3.3. Máquina Ferramenta

A máquina-ferramenta utilizada para os ensaios de furação foi o Centro de Usinagem Vertical CNC linha Discovery modelo 760 Fig. 3.4, com potência do motor principal de 9 KW, rotação máxima de 10.000 rpm do ROMI, e com magazine com capacidade para 22 ferramentas, que pertence ao LEPU.



Figura 3.4 – Centro de usinagem vertical CNC que foi utilizado nos testes de furação.

A literatura informa que para obter furos com elevada exatidão deve-se ter uma rígida fixação entre ferramenta e máquina, então para uma melhor fixação e menor batimento na realização do processo de furação, as ferramentas foram acopladas à máquina através de um mandril hidromecânico de alta precisão Corogrip® Fig. 3.5, fabricado pela Sandvik Coromant®.



Figura 3.5 – Mandril Hidromecânico Sandvik.

### 3.4 Planejamentos dos Furos

O material utilizado é aço ABNT 1045, amplamente utilizados pelas indústrias do ramo metal-mecânico na fabricação de componentes para veículos automotores, trens de transmissão, entre outros. Os corpos de prova possuem dimensões como mostra na Fig. 3.6.

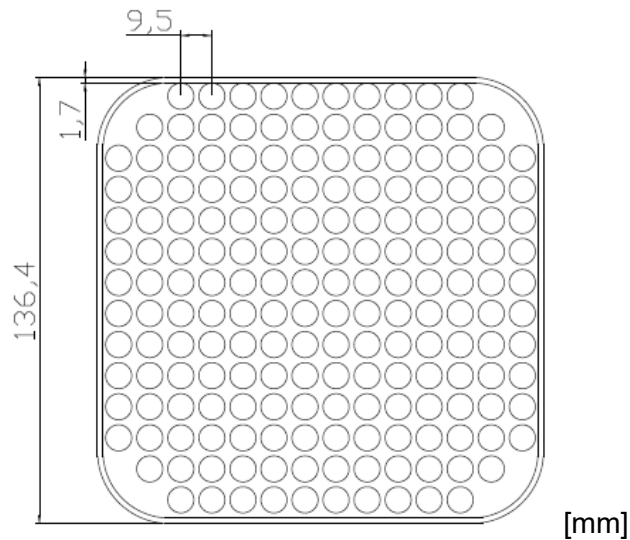


Figura 3.6 – Esquema da usinagem de furos, vista superior do corpo de prova.

Os parâmetros de entradas foram velocidade de corte ( $V_c$ ) de 60, 120 e 180 m/min, dois tipos de revestimentos TiN e TiAlN para brocas adquiridas comercialmente, em metal duro de 8 mm de diâmetro com grãos ultrafinos e fluidos de corte aplicado nas formas de jorro e MQL (mínima quantidade de lubrificante) a uma pressão 5,5 Bar, os parâmetros avanço ( $f$ ) e profundidade de corte ( $a_p$ ) mantidos constantes, respectivamente em 0,1 mm/rev.z e 4 mm. Executou furos cegos na razão  $L/D = 3$ , ou seja, com profundidades de 24 mm. Frequentemente na literatura científica encontram-se referências que colocam a relação  $L/D = 3$ , como interface, ou relação divisória, entre furos de baixa profundidade (rasos) e de alta profundidade (profundos). Na Tab. 3.3 mostra a planilha de testes.



Tabela 3.3 – Número dos testes e respectivas condições de corte.

N° Teste	Variáveis de Entrada			
	Fluido De Corte	Velocidade de Corte [m/min]	Revestimento	N° furos
1	MQL	60	TiN	164
2	MQL	120	TiN	164
3	MQL	180	TiN	33
4	MQL	60	TiAlN	164
5	MQL	120	TiAlN	164
6	MQL	180	TiAlN	33
7	Jorro	60	TiN	164
8	Jorro	120	TiN	164
9	Jorro	180	TiN	33
10	Jorro	60	TiAlN	164
11	Jorro	120	TiAlN	164
12	Jorro	180	TiAlN	33

O método de planejamento de experimentos seguirá o método fatorial,  $3 \times 2^k$ , utilizado para definir os testes realizados. Após os ensaios avaliou-se a influência das variáveis, os tipos e mecanismos de desgaste na ferramenta. Os resultados encontrados serão apresentados nas formas gráfica e amplamente discutidos, tomando-se como referências artigos da literatura.

Para iniciar os testes de furação foram fabricados os corpos de prova os quais passaram por várias etapas. Os planejamentos como a quantidade de furos, profundidade do mesmo, estimarem a espessura dos corpos pelo fato do processo de furação se dar nas duas faces. A espessura foi escolhida somando a profundidade de dois furos e mais uma distância mínima para que o calor e a deformação de um furo não afetem os outros furos. A Fig. 3.7 mostra a vista em corte, para visualizar os furos e o espaçamento entre eles.

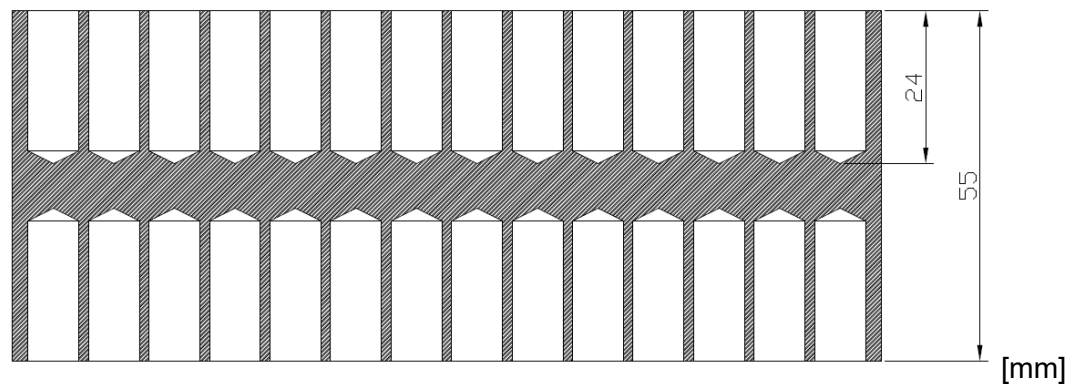


Figura 3.7 – Esquema da usinagem de furos, vista em corte do corpo de prova.

### 3.5 Preparações dos Corpos de Prova

Após o planejamento foi iniciada a etapa de preparação dos corpos de prova conforme a Fig. 3.8, utilizando a serra fita foi fabricado os mesmos com um sobremetal para a realização de um posterior acabamento e não afetar o processo de furação.



Figura 3.8 – Corte dos corpos de prova na máquina serra fita.

Na sequência fixou o corpo de prova na morsa previamente nivelada, e promoveu o processo e faceamento da peça para as duas faces ficarem paralelas conforme Fig. 3.9. A Fig. 3.10(a) antes e Fig. 3.10(b) depois do faceamento.

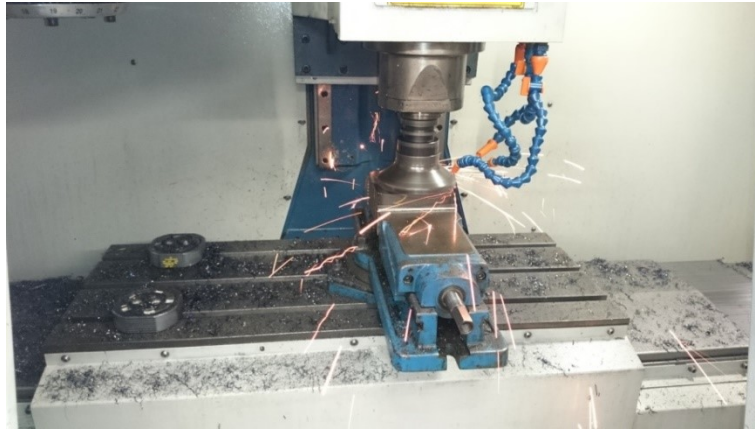


Figura 3.9 – Faceamento da peça.



(a)



(b)

Figura 3.70 – (a) Antes e (b) após faceamento do corpo de prova.

### 3.6 Realizações dos Ensaios

A Fig. 3.11 mostra a realização dos testes de furação, em que se aplicou o fluido ME-1 na concentração 5%, na forma de jorro com uma vazão 1269 l/h.



Figura 3.81 – Furação com aplicação fluido ME-1 forma de jorro.

Para aplicação com a técnica MQL, foi utilizado aparelho pulverizador do fluido, Fig. 3.12, modelo O2AO-STD fabricado pela ITW Fluid Products Group, funcionava com um fluxo contínuo de ar comprimido, ajustado em torno de 5,5 Bar de pressão. Na Fig. 3.13 é apresentado a posição do bico de aplicação durante a furação, cujo a vazão 74 ml/h. As características físico-químicas deste fluido são apresentadas na Tab. 3.4.

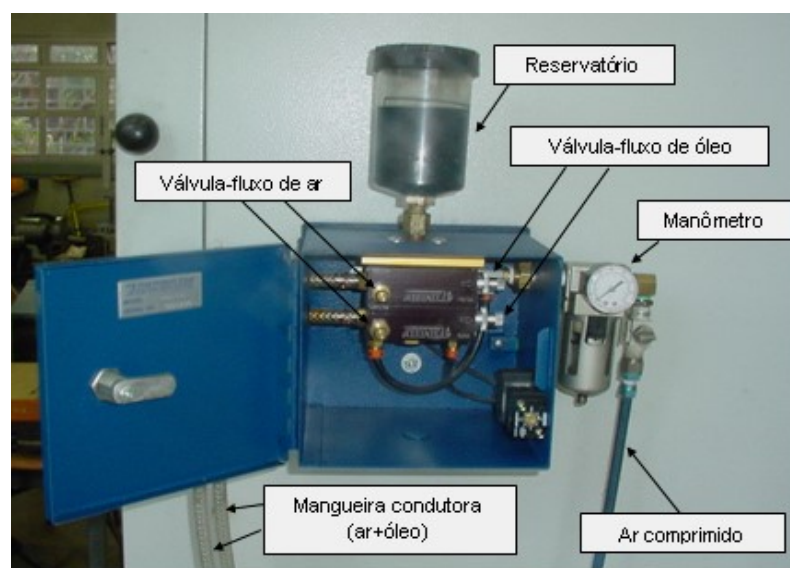


Figura 3.92 – Aparelho pulverizador MQL (COSTA, 2004).



Figura 3.103 – Fluido Blasocut 40 NF forma de MQL.

Tabela 3.4 – Características físico-químicas BLASOCUT BC 40 NF® (Blazer Swisslue)

	<b>Dados</b>
<b>Viscosidade a 40 °C</b>	63 mm <sup>2</sup> /s
<b>Densidade a 20 °C</b>	0,98 g/cm <sup>3</sup>
<b>Ponto de fugor</b>	151°C
<b>Teor de óleo</b>	57%
<b>pH</b>	8.5-9,2
<b>Índice de refração</b>	1,00

Na Fig. 3.15 mostra-se o sistema de medição de desgaste e de observação das brocas desgastadas. O sistema é composto de microscópio ótico, placa de aquisição de sinais, computador e programa de análise de imagens.



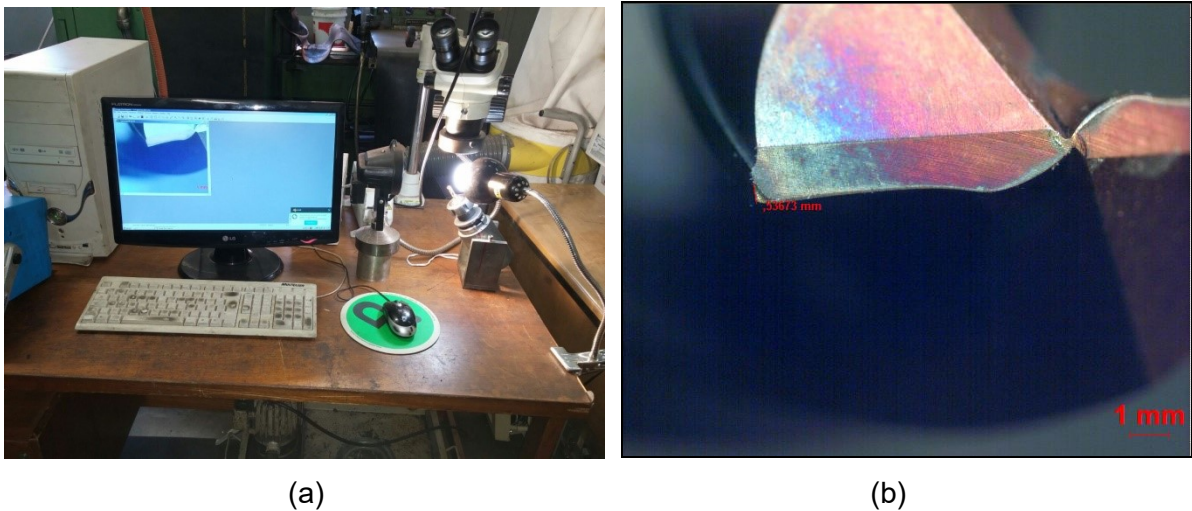
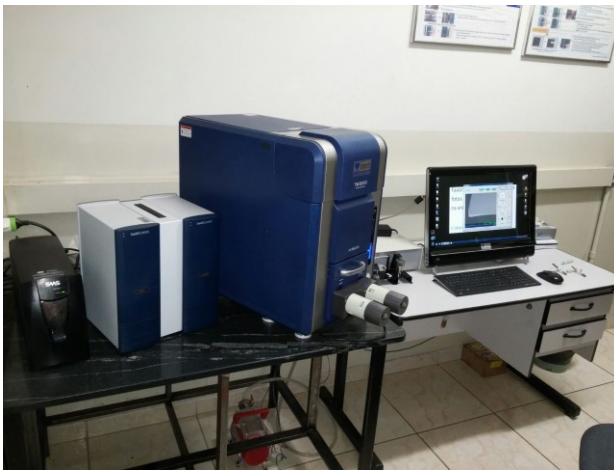


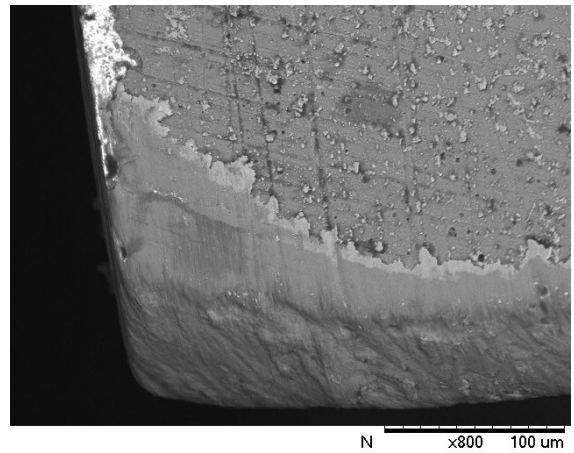
Figura 3.114 – Microscópio óptico e sistema de análise de imagens: (a) sistema de medição; (b) imagem de uma ferramenta desgastada, sob medição do nível de desgaste de flanco.

### 3.7. Análises das ferramentas desgastadas no microscópio eletrônico de varredura (MEV) – análise dos mecanismos de desgaste

Na Figura 3.16 mostra-se o sistema de medição de desgaste e de observação das brocas desgastadas. O sistema é composto de microscópio eletrônico de varredura, placa de aquisição de sinais, computador e programa de análise de imagens. Este sistema permite ampliações teoricamente infinita, entretanto consegue-se boas resoluções em imagens com ampliações de até 25.000X. Neste trabalho, pelo nível de detalhamento desejado, utilizou-se máximas ampliações de 800X, o que por meio de microscopia ótica não seria tão eficaz, pois a sua ampliação de campo é reduzida quando se comparado com a microscopia eletrônica de varredura.



(a)



(b)

Figura 3.12 – Microscópio eletrônico de varredura e sistema de análises de imagens: (a) sistema de medição; (b) ferramenta desgastada vista com ampliação de 800X, evidenciando o desgaste de flanco.

# CAPÍTULO IV

## RESULTADOS E DISCUSSÕES

### 4.1. Análise Gráfica dos Desgaste da Broca

Na Fig. 4.1 mostra-se em único gráfico os comportamentos das brocas quanto ao desgaste de flanco (dominante nas ferramentas) em função da velocidade de corte, dos fluidos e dos dois tipos de revestimentos avaliados. Em cada barra vertical, se mostra o valor médio e sua dispersão em torno da média, medido por meio do desvio padrão entre os três testes realizados em cada condição.

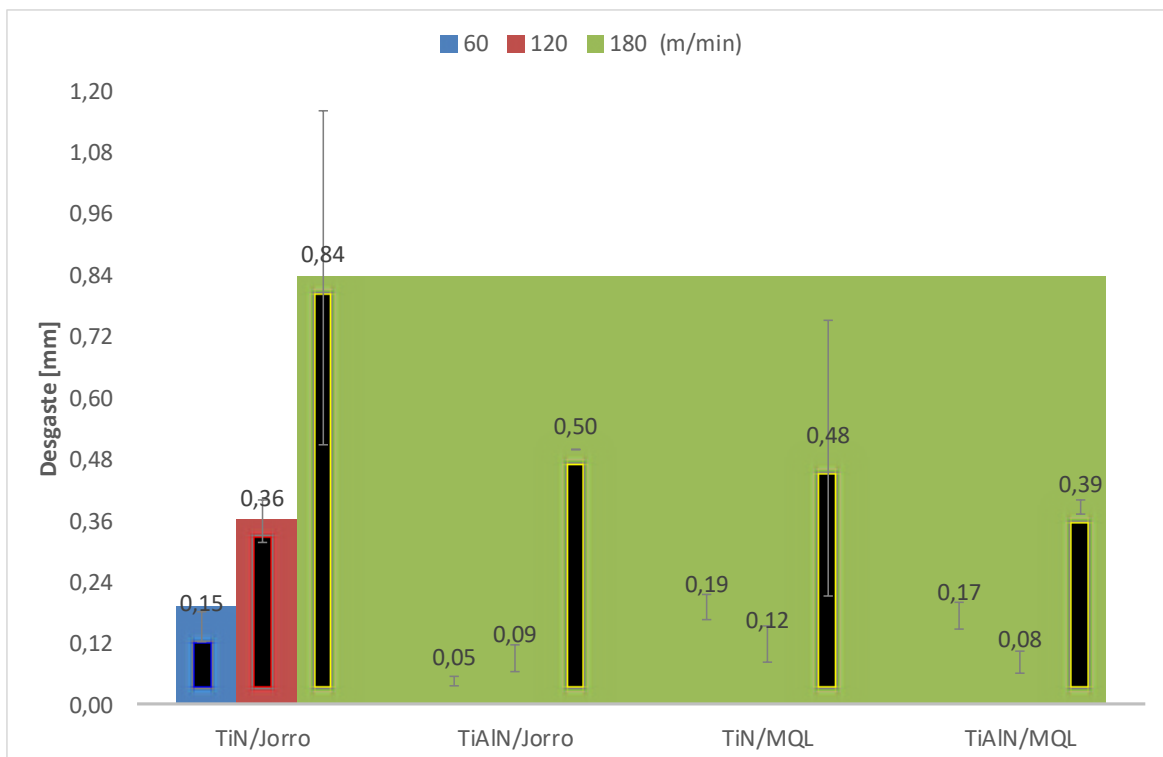


Figura 4.1 – Desgaste das brocas mostrado em função da velocidade de corte, do tipo de revestimento e dos dois métodos de aplicação de fluidos de corte.



Analisando este gráfico, observa-se que o aumento da velocidade de corte apresenta forte tendência de se aumentar o nível de desgaste, devido à elevação do calor gerado e conseqüentemente da temperatura da interface cavaco-ferramenta, corroborando com o surgimento e fortalecimento dos mecanismos termicamente ativados, como difusão e adesão.

Ao ser analisado o comportamento das ferramentas nas condições de lubrificação e refrigeração e velocidade de corte de 120m/min na usinagem de 164 furos e 180 m/min na usinagem de 33 furos, percebe-se que os melhores resultados em termo de desgaste foram obtidos na usinagem com quantidade mínima de lubrificante (MQL). A usinagem com emulsão, por sua vez, foi a pior condição utilizada para reduzir o desgaste de flanco. Este fato pode estar relacionando com a diminuição da temperatura (redução do efeito de amolecimento da peça devido ao aumento da troca de calor por condução e convecção) no processo de usinagem do material, Klocke et al (1998).

O maior desgaste as velocidades de corte de 120 m/min e 180 m/min com condição de emulsão aplicada por bicos externos, pode ser explicado pelo choque térmico acentuado, decorrente da mudança brusca da temperatura da broca na saída do furo passante, quando ela entra em contato com o fluido, aplicado em abundância. Devido à diminuição rápida da temperatura na superfície da broca, surgem tensões de tração que podem ultrapassar o limite de resistência do material e enfraquecer o gume. A cada furo estes defeitos aumentam, caracterizando uma falha por fadiga térmica.

O revestimento TiAlN obteve melhores resultados quanto ao desgaste de flanco, pelo fato de formar camada de óxidos tendo como principal constituinte o Al, o qual tende a reduzir o mecanismo abrasivo de desgaste. Deste modo, esta camada dura formada durante a usinagem age como barreira térmica e com uma reposição contínua do revestimento da ferramenta. Com a redução da temperatura no processo, acredita-se que este fenômeno é minimizado e até mesmo eliminado.

Outra hipótese a ser considerada é a proposta por Weingaertner (2001) , em que a redução média da temperatura pela refrigeração da raiz do cavaco leva a uma diminuição do fator de recalque, menor contato entre cavaco e ferramenta e mesmo para uma diminuição da força de avanço, a maiores pressões de contato, podendo levar a micro e macro-lascamentos do gume.

## 4.2. Análises dos Tipos e Mecanismos de Desgaste

Na Fig. 4.2 mostra-se as fotografias retiradas do Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) e Espectroscopia de Energia Dispersiva – EDS. O objetivo foi de avaliar os tipos e mecanismos de desgaste dominantes no processo de furação utilizando brocas de metal duro revestida com TiN para a velocidade de corte de 120 m/min, após realizar 164 furos, em que a Fig. 4.2 (a) utilizou o fluido na forma de jorro e a Fig. 4.2 (b) a aplicação foi em MQL.

Ao analisar os mecanismos de desgaste, verifica-se a aderência de material do aço usinado na ferramenta, pelo fato a presença dos elementos (Fe + C + Mn) os quais compõe o mesmo. Em relação à parte de “substrato” verifica a remoção do revestimento, pois a composição química formada pelos elementos (W + C + Co), está relacionado a composição do metal-duro e por fim verifica-se o revestimento, composto por (Ti + N), porém há presença de oxigênio o qual sugere indícios do mecanismo de desgaste por oxidação. O desgaste abrasivo mostrou-se evidente no gume da ferramenta, através de riscos causados pelo fluxo de material abrasivo com a remoção de revestimento e exposição do substrato da ferramenta e por carbonetos originados do material da peça. Para os dois testes evidenciou também desgaste de flanco.

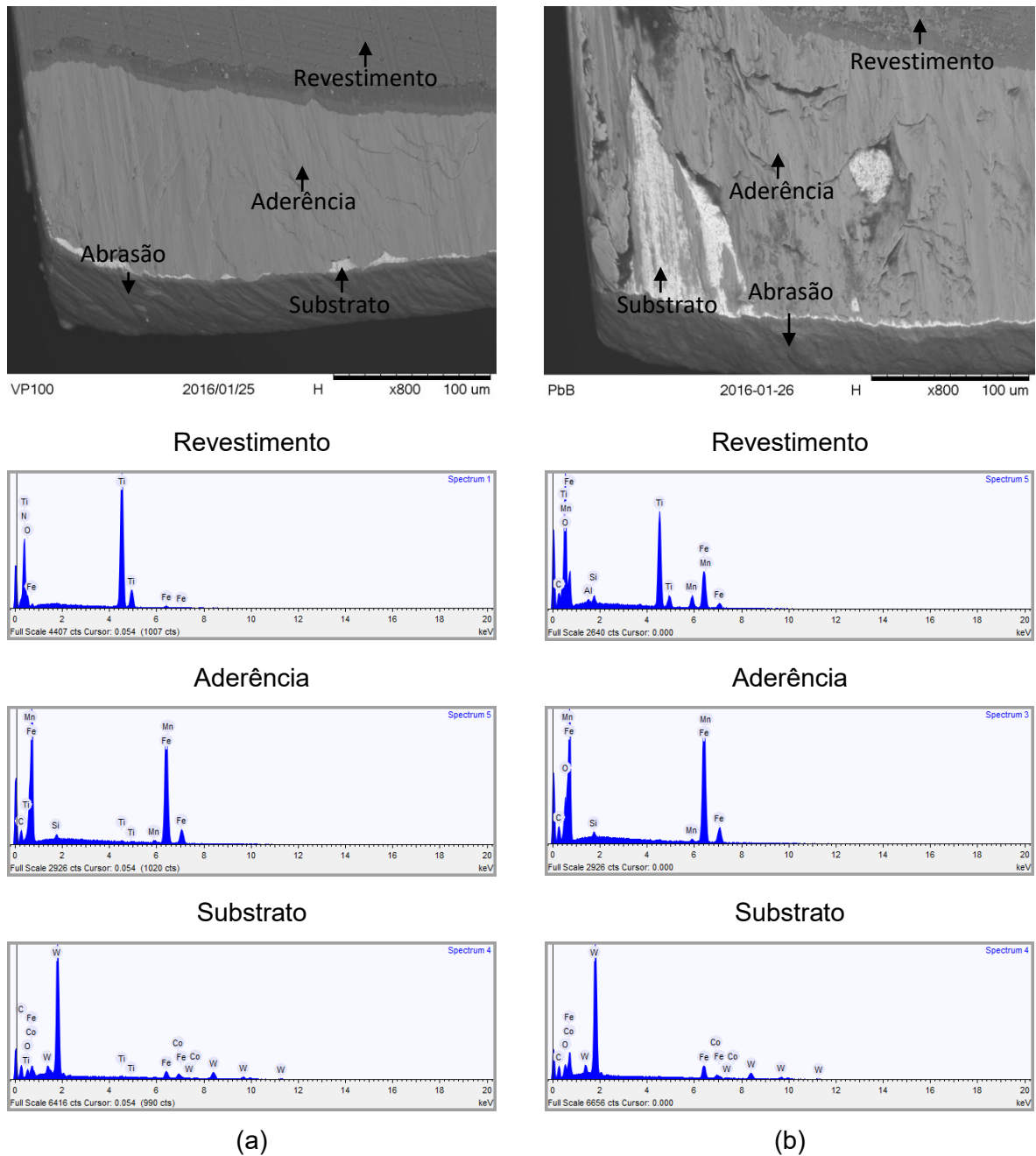


Figura 4.2 –  $V_c = 120$  m/min; ferramenta revestida por TiN; (a) fluido aplicado em jorro e (b) fluido aplicado em MQL. Realizado 164 furos.

O revestimento TiAlN obteve melhores resultados quanto ao desgaste de flanco, pelo fato de formar camada de óxidos tendo como principal constituinte o Al, o qual tende a reduzir o mecanismo abrasivo de desgaste. Deste modo, esta camada dura formada durante a usinagem age como barreira térmica e com uma reposição contínua do revestimento da ferramenta. Com a redução da temperatura no processo, acredita-se que este fenômeno é minimizado e até mesmo eliminado.

Outra hipótese a ser considerada é a proposta por Weingaertner (2001), em que a redução média da temperatura pela refrigeração da raiz do cavaco leva a uma diminuição do fator de recalque, menor contato entre cavaco e ferramenta e mesmo para uma diminuição da força de avanço, a maiores pressões de contato, podendo levar a micro e macrolascamentos do gume, evidenciado na Fig. 4.3 (a) micro-lascamento.

Ao se analisar os mecanismos de desgaste, verifica-se o revestimento, composto por (Ti + Al + N) sem a presença de oxigênio indicando que não houve a oxidação do revestimento, na parte “substrato” mostra o destacamento de material, o que verifica-se elementos que compõe o metal-duro pelos seguintes elementos (W + C + Co) este fenômeno de camada de material aderida na ferramenta é frequentemente renovada é definida por Trent (1991) por “attrition” a qual promove a abrasão devido aos óxidos e partículas duras desprendido do revestimento da ferramenta, por fim na região de “material aderido”, verifica-se os elementos (Fe + C + Mn + Si), os quais compõe o aço usinado.



# CAPÍTULO V

## CONCLUSÕES

Depois de desenvolvido este projeto, chegou-se às seguintes conclusões:

- A velocidade de corte de 180 m/min para todas as condições ocorreu um desgaste superior a 0,3 mm para usinagem de 33 furos o que não seria uma velocidade apropriada para utilização nesta aplicação.
- A velocidade de 120 m/min obteve um bom desempenho se comparado com as outras velocidades e seria a ideal para a furação em um processo, pelo fato de apresentar bons resultados e o tempo de furação ser rápido, essa velocidade está dentro da faixa indicada pelo fabricante.
- As formas de desgaste dominantes foram flanco (superfície de folga da ferramenta)
- Os mecanismos de desgaste dominantes para os dois tipos de revestimentos avaliados foram a adesão, seguido de arrancamento de material e a abrasão.
- As ferramentas de TiAlN apresentaram lascamentos da camada revestida, expondo o substrato imediatamente à adesão de material da peça.
- Não houve considerável alteração no sistema tribológico, alterando-se o tipo de revestimento, o fluido, ou o método de aplicação, pois os tipos e mecanismos de desgaste permaneceram os mesmos em todas as situações investigadas.

## SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

- Realizar ensaios experimentais utilizando o fluido ME-1 na forma de MQL, utilizando velocidade de corte na faixa de 60 a 120 m/min;
- Realizar ensaios experimentais utilizando fluido blasocut BC 40 NF, na forma de jorro concentração 10%;
- Além dos parâmetros de saída adquiridos neste trabalho, monitorar o a força de corte;
- Investigar novas condições de corte, fazendo uma análise mais profunda do efeito, ou tendência, de cada variável.

## CAPÍTULO VI

### REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABNT NBR 6163, 1980 - **Brocas helicoidais** - Termos, definições e tipos.

ALVES, S. M.; OLIVEIRA, J. F. G. **Vegetable based cutting fluid: an environmental alternative in the grinding process**. In: XV CONFERÊNCIA INTERNACIONAL CIRP EM ENGENHARIA CICLO DE VIDA, 15, 2008, Sydney. **Anais...** p. 664-668.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Aços Carbono e Ligados para Construção Mecânica - Designação e Composição Química**, NBR NM 87/2000. Rio de Janeiro, 2000.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Critério de Classificação dos Aços**, **NBR NM 172/2000**. Rio de Janeiro, 2000.

BORK, C. A. S. **Otimização de variáveis de processo para a furação do aço inoxidável austenítico DIN 1. 4541**. 1995. 127 f. Dissertação de Mestrado –Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis.

BROMARK M.; et al. 1997. **Wear of PVD Ti/TiN multilayer coatings**. **Surface and Coatings Technology**, v.90, p.217-223.

BUNSHAH, R. F. **“Handbook of Hard Coatings: Depositions Technologies”**. New Jersey: Noyes Publications, 2001.



CASTILLO, W. J. G., **Furação Profunda do Ferro Fundido Cinzento GG25 com Brocas de Metal-duro com Canais Retos**. Tese de M.Sc., Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, SC, Brasil, 2005.

COSTA, E. S. **Furação de Aços Microligados com Aplicação de Mínima Quantidade de Fluido de Corte-MQF**. 2004. 311 f. Tese de Doutorado - Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia.

CSELLE, T.; BARIMANI, A. 1995. **Today's applications and future developments of coatings for drills and rotating cutting tools**. *Surface and Coatings Technology*, v.76-77, p.712-718.

DA SILVA, H. A. **Influência do Ciclo de Furação na Usinabilidade do Ferro Fundido Cinzento GH190**. 2010. 169 f. Dissertação de Mestrado - Universidade de Uberlândia, Uberlândia.

DE ANDRADE, C. L. F. **Análise da Furação do Ferro Fundido Vermicular com Brocas de Metal-Duros com Canais Retos Revestidas com TiN e TiAlN**. 2005. 170 f. Dissertação de Mestrado – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis.

DE CASTRO, P. R. A. **Aspectos Tecnológicos da Usinagem a Seco e com MQF de Corte na Furação com Broca Helicoidal**. 2001. 178 f. Dissertação de Mestrado – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis.

DHAR, N.; ISLAM, S.; KAMRUZZAMAN, M. **Effect of Minimum Quantity Lubrication (MQL) on Tool Wear, Surface Roughness and Dimensional Deviation in Turning AISI-4340 Steel**. *G.U. Journal of Science*, vol. 20, pp. 23-32, 2007.

DINIZ, A. E.; MARCONDES, F. C.; COPPINI, N. L. **“Tecnologia da Usinagem dos Materiais”**. São Paulo: Artliber, 2015.

ERTUNC, H. M., LOPARO, K. A., OCAK, H. **Tool Wear Condition Monitorig in Drilling Operations Using Hidden Markov Models (HMMs)**. *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, v. 41 p. 1363 – 1384, 2001

FERRARESI, D. **Fundamentos da Usinagem dos Metais**. 11.ed. São Paulo: Blucher, 2003. 288p.

GRUB, A. M. **Avaliação do Desempenho de Fluidos de Corte Contaminados no Processo de Torneamento do Aço Inoxidável Austenítico V304UF**. 2013. 130 f. Dissertação de Mestrado - Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia.

HEDENQVIST, P.; JACOBSON, S.; HOGMARK, S. 1997. **Tribological Laboratory Evaluation Of Thin Hard Coatings**. *Surface And Coating Technology*, v.97, p.656-660.

HEISEL, U. et al. **A técnica da quantidade mínima de fluidos e sua aplicação nos processos de corte**. *Máquinas e Metais*. São Paulo, n. 294, p. 22-38, fev. 1998.

HSIEH, J. H.; et al. 1998. **Deposition and characterization of TiAlN and multi-layered TiN / TiAlN coatings using unbalanced magnetron sputtering**. *Surface and Coatings Technology*, v.108–109, p.132–137.

JINDAL, P. C.; et al. 1999. **Performance of PVD TiN, TiCN, and TiAlN coated cemented carbide tools in turning**. *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials*, v.17, p.163- 170.

KIM, G. S.; et al. 2003. **Effects of the thickness of Ti buffer layer on the mechanical properties of TiN coatings**. *Surface and Coatings Technology*, v.171, n.1-3, p.83-90.

KLAUBERG, A. L. **“Aplicação de Mínimas Quantidades de Fluidos de Corte nos Processos de Furação e Rosqueamento Interno de Eixos para Motores Elétricos”**. Dissertação. Universidade Federal de Santa Catarina, 2009.

KLOCKE, F. et al. **Improved cutting processes with adapted coating systems**. *Annals of CIRP*, v. 47, p. 65-68, 1998.

KLOCKE, F. **Manufacturing Processes 1: Cutting**. Berlin: Springer, 2011. 506 p.

KLOCKE, F., KRIEG, T. 1999. **Coated tools for metal cutting – features and applications**. *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, v.48, n.2, p.515-525.

KÖNIG, W. e KLOCKE, F. **“Fertigungsverfahren: drehen, fräsen, bohren”**. 5. Berlin: Springer, 1997.

KURODA, M. **Aumentando a lucratividade com óleos vegetais. O Mundo da Usinagem**. São Paulo, n. 3, p. 16-19. 2006.

LOREDANA, P; et al. **Basestock oils for lubricants from mixtures of corn oil and synthetic diesters**. Journal of America Oil Chemists' Society. Timisoara, v. 85, p.71-76, jan. 2008.

MACHADO, A. R.; et al. **Teoria da Usinagem dos Materiais**. São Paulo: Edgard Blücher, 2009. 384 p.

MACHADO, A. R.; DINIZ E. D. **Corte a Seco, com Mínima Quantidade de Fluido e com Fluido em Abundância: Usos, Aplicações, Vantagens e Desvantagens**. In: CONGRESSO USINAGEM 2000, 2000, São Paulo. Anais... São Paulo: ABCEM, 2000. 1 CD-ROM.

MACHADO, A. R., SILVA, M. B. **“Usinagem dos Metais”**. Apostila, Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, MG, 4ª Versão, 1999.

MALIK, H. I.; MGALOBILISHVILI, R.; MILLS, B. 2000. **Effect of TiN coating thickness on performance of HSS cutting tools when machining free cutting steels**. Journal Of Materials Science Letters, v.19, p.1779 – 1781.

MARQUES, F. M. **“Avaliação do desempenho de brocas helicoidais de aço rápido revestidas na usinagem de ferro fundido nodular GGG50.”** (2012).

MCCABE M., **New Hard/Lubricant PVD Coating Opens Exciting Machining Possibilities In: Proc. of 3rd International Machining & Grinding Conference**, Cincinnati, 1999. p.711–724.

MIRANDA, G. W. A. **Uma Contribuição ao Processo de Furação sem Fluido de Corte com Broca de Metal Duro Revestida com TiAlN**. 2003. 260 f. Tese de Doutorado - Universidade Estadual de Campinas, Campinas.

PAWLAK, Z.; KLAMECKI, E. B.; RAUCKYTE, T.; SHPENKPV, P. G.; KOKOWSKI, A. **The Tribochemical and Micellar Aspects of Cutting Fluids**. Tribology International, vol. 38, 2004.

PRENGEL, H. G.; et al. 1997. **Advanced PVD-TiAlN coatings on carbide and cermet cutting tools**. Surface and Coatings Technology, v.94-95, p.597-602

REDDY, N. S. K., NOUARI, M., YANG, M. **Development of electrostatic solid lubrication system for improvement in machining process performance** / International Journal of Machine Tools & Manufacture 50 (2010) 789–797.

RICHTER, V., et al. 1996. **Characterisation and wear behaviour of TiN- and TiC<sub>x</sub>N<sub>1-x</sub> - coated cermets**. Materials Science and Engineering A, v.209, p.353-357.

SAHM, D. and SCHNEIDER, 1996, **“A Produção sem Refrigeração é Interessante e Deve ser mais Conhecida”**, Máquinas e Metais, Editora Aranda, agosto, pp 38-55.

SALES, W. F., 1999, **Determinação das Características Refrigerantes e Lubrificantes dos Fluidos de Corte**, Tese de Doutorado a ser defendida no dia 16 de abril de 1999, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, MG, Brasil.

SANDVIK COROMANT, 1994, **Modern metal cutting – a practical handbook**, Sweden: 1. ed. 840 p. ISBN 91972299-0-3.

SANTOS, S. C. **“Furação de Ferro Fundido Cinzento com Brocas de Metal Duro Integral”**. Dissertação. Universidade Federal De Uberlândia, 1999.

SANTOS, S. C.; SALES, W. F., 2008, **“Aspectos Tribológicos da Usinagem dos Materiais”**, Ed. Artliber, São Paulo, Brazil, 246p.

SCANDIFFIO, I. **Uma Contribuição ao Estudo do Corte a Seco e ao Corte com Mínima Quantidade de Lubrificante em Torneamento de Aço**. 2000. 63 f. Dissertação de Mestrado – Universidade Estadual de Campinas, Campinas.

SMITH, G. T. **“Cutting Tool Technology: Industrial Handbook”**. Girona: Springer, 2008.

SOKOVIC, M.; MIJANOVIC, K., **Ecological aspects of the cutting fluids and its influence on quantifiable parameters of the cutting processes**. Journal of Materials Processing Technology, vol. 109, pp. 181-189, 2001.

SU, Y. L.; et al.1997. **Comparison of tribological behavior of three films - TiN, TiCN and CrN - Grown by physical vapor deposition**. Wear, v.213, n.1-2, p.165-174.

THOMÉ, R., BIANCHI, E. C., ARRUDA, O. S., AGUIAR, P. R., 2007, **Estudo microbiológico das micobactérias e fungos contaminantes dos fluidos de corte**, In: **Anais do 8º. CIBIM Congresso Ibero-americano de Engenharia Mecânica**, Cusco – Peru, Anais... outubro de 2007.

TÖNSHOFF, H. K.; et al. 1997. **Wear mechanisms of (Ti1-X,Alx)N coatings in dry drilling**. Surface And Coatings Technology, v.94-95, p.603-609.

TRENT, E. M. (1991). **Metal Cutting**. 3rd ed. Oxford [England]; Boston: Butterworth Heinemann.

TRENT, E. M. e WRINGT, P. K., **“Metal Cutting”**. 4<sup>th</sup>: Burtterworth Heinemann, 2000.

VIANA, H. **Desempenho de Brocas de HSS Revestidas na Furação de Ligas de Al-Si**. 2004. 143 f. Dissertação de Mestrado - Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia.

Y. Q. Wei, X. Y. Zong, Z. Z. Wu, X. B. Tian, C. Z. Gong, S. Q. Yang, Z. Q. Jiang, L. J. Chen, **Ef-fects of modulation ratio on microstructure and properties of TiN/TiAlN multilayer coating**, Surf. Coat. Technol. 229 (2013) 191–196.

WEINGAERTNER, W. L. **discussão técnica [maio 2001]**. Orientado: P. R. A. Castro. Florianópolis: UFSC, 2001.

WOODS, S. **Vegetable oil-based metalworking fluids can provide better performance and environmental results than mineral oil-based fluids**. Cutting Tool Engineering Magazine. Northfield, v. 57, n. 2, p. 47-53, feb. 2005.

ZEGHNI, A. E.; HASHMI, M. S. J. 2004. **Comparative wear characteristics of tin and titanium coated and uncoated tool steel.** Journal of Materials Processing Technology, v.155– 156, p.1923–1926.

ZEILMANN, R. P. **Furação da liga de titânio Ti6Al4V com mínimas quantidades de fluido de corte.** 2003. 207 f. Tese de Doutorado - Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis.