

UNIVERSIDADE DE TAUBATÉ

Sandra Silveira Ferreira

**AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO DE BROCAS ESPECIAIS
DE METAL DURO TRATADAS POR PROCESSO
TERMOQUÍMICO**

Taubaté – SP

2015

Sandra Silveira Ferreira

**AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO DE BROCAS ESPECIAIS
DE METAL DURO TRATADAS POR PROCESSO
TERMOQUÍMICO**

Dissertação apresentada para obtenção do
Título de Mestre pelo Programa de Mestrado
Profissionalizante de Engenharia Mecânica
do Departamento de Engenharia Mecânica
da Universidade de Taubaté,
Área de Concentração: Projeto Mecânico
Orientador: Prof. Dr. Nivaldo Lemos Coppini
Co-orientador: Prof. Elesandro Antonio
Baptista

Taubaté – SP

2015

SANDRA SILVEIRA FERREIRA

**AValiação DO DESEMPENHO DE BROCAS ESPECIAIS DE METAL DURO
TRATADAS POR PROCESSO TERMOQUÍMICO**

Dissertação apresentada para obtenção do
Título de Mestre pelo Programa de Mestrado
Profissionalizante de Engenharia Mecânica
do Departamento de Engenharia Mecânica
da Universidade de Taubaté,
Área de Concentração: Projeto Mecânico

Data: 05/02/2015

Resultado: _____

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Nivaldo Lemos Coppini Universidade de Taubaté - Unitau

Assinatura _____

Prof. Dr. Evandro Luis Nohara Universidade de Taubaté - Unitau

Assinatura _____

Prof. Dr. João Roberto Ferreira Universidade Federal de Itajubá - Unifei

Assinatura _____

*Dedico este trabalho ao Rogério, meu marido,
aos meus filhos Tayná e Guilherme.*

AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar agradeço a Deus, pela minha vida e por me abençoar com mais essa conquista.

Ao meu marido Rogério, aos meus filhos Tayná e Guilherme que desde o início estiveram ao meu lado, me incentivando e apoiando.

Ao professor Dr. Nivaldo Lemos Coppini, pela impecável orientação, confiança e incentivo atribuído ao desenvolvimento desta dissertação.

Ao professor Dr. Elesandro Antonio Baptista, pelo indispensável apoio ao desenvolvimento desta dissertação.

Às Indústrias Müller, nas pessoas do Sr. Oscar Seckler Müller e Cleodo Moisés, pelo indispensável apoio em chão de fábrica e pelo fornecimento dos insertos e material de corpos de prova.

Aos colegas da Turma 32 que estiveram comigo nesta caminhada.

À Universidade de Taubaté e Professores, que forneceram todos os recursos e conhecimentos necessários para a minha formação e para realização deste trabalho, em especial, ao Prof. Evandro Luís Nohara durante as experiências de laboratório de Materiais.

Ao SENAI Mariano Ferraz, nas pessoas do Prof. Dario José Alves e Nathalia Ramalho, agradeço pelo indispensável apoio nos ensaios de MEV e EDS.

À secretária Helena Barros Fiorio, pela atenção, respeito e incentivo.

A todas as pessoas que gentilmente colaboraram e tornaram possível a conclusão deste trabalho.

Os ousados começam, mas só os determinados terminam.

(GEORGE BERNARD SHAW)

RESUMO

Dependendo da característica da indústria, nem sempre, a operação de torneamento de aços é a que aparece com maior frequência. Geralmente a operação de furação destes materiais ocupa espaço relativo abaixo da operação citada. Entretanto, a Empresa Müller Metais Indústria e Comércio que decidiu colaborar de forma decisiva para a elaboração deste trabalho, é totalmente voltada para a usinagem de furos em chapas de grandes dimensões e de diversas espessuras. As chapas são geralmente de Aço Carbono, mas, também existe a incidência de furos em chapas de Aço Inoxidável. O número de furos pode variar entre 500 até 2500 por peça. As brocas possuem um suporte sobre o qual é fixado um inserto de geometria especialmente projetada para atender a qualidade exigida da superfície interna do furo. Os insertos são de metal duro classe ISO K15 e revestidos por PVD multicamadas à base de AlCr sobre o referido substrato. O critério para troca de ferramenta é baseado em um número de furos (vida) previamente adotado em função da experiência acumulada ao longo do tempo. A Empresa Müller Metais Indústria e Comércio vêm trabalhando no sentido de aumentar a produtividade para melhor fazer frente a demanda crescente por parte de clientes de diversas áreas que utilizam tais peças. O objetivo deste trabalho é analisar os mecanismos de desgastes ocorridos em brocas especiais com insertos intercambiáveis de metal duro visando melhorar o desempenho dos mesmos. Os insertos foram banhados por um produto antiatrito e em seguida mantidos em estufa à temperatura da ordem de 80°C por 30 minutos provocando, desta forma, um tratamento termoquímico da superfície do inserto.

Palavras-chave: Usinagem; Furação; Tratamento termoquímico; Mecanismos de desgastes.

ABSTRACT

Depending on the characteristic of the industry, turning operation of steel is not always the one that appears most frequently. Generally drilling operation is less mentioned and used by industries. However, the company Müller Metals Industry and Trade that decided to collaborate decisively to the development of this work. They were fully geared for machining holes in large plates with various thicknesses. The plates are usually carbon steel, but there is also the incidence of holes in plates of stainless steel. The number of holes can vary from 500 to 2500. The drills have a support on which insert are fixed. The inserts are ISO K15 grade carbide and coated multilayer PVD -based AlCr on the carbide substrate. The Company Müller Metals Industry and Commerce has been working to increase productivity to better cope with increasing demand from clients in various areas using such parts. The objective of this study is to analyze wear mechanisms in special drills with interchangeable cemented carbide inserts to improve their behavior. To achieve this goal the drills should be treated by anti friction product at a temperature of about 80 °C.

Keywords: Machining; Drilling; Thermal chemical treatment; Mechanisms of wear.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Partes de uma broca helicoidal	20
Figura 2 - Ponta da broca helicoidal (ângulos da aresta de corte)	21
Figura 3 - Sistema referencial de uma broca helicoidal	21
Figura 4 - Broca com pastilhas intercambiáveis de metal duro	23
Figura 5 - Formação do cavaco mostrando a grande deformação que ocorre na região de cisalhamento	25
Figura 6 - Formação do cavaco durante a usinagem	25
Figura 7 - Formas do cavaco: a) em fita; b) helicoidal; c) espiral; d) em lascas	26
Figura 8 - Desgaste frontal	30
Figura 9 - Desgaste de cratera	31
Figura 10 - Deformação plástica da aresta de corte	31
Figura 11 - Lascamento da broca	32
Figura 12 - Trincas no corpo da broca	32
Figura 13 - Quebra da broca	32
Figura 14 - Aresta postiça de corte	34
Figura 15 - Desgaste frontal x velocidade de corte mostrando a região de formação da aresta postiça de corte	34
Figura 16 - Diferentes componentes no desgaste da ferramenta	36
Figura 17 - Desgaste de flanco	39
Figura 18 - Classificação dos fluidos de corte	42
Figura 19 - Geometria do corpo de prova de aço utilizado nos ensaios	46
Figura 20 - Vista da máquina CNC utilizada nos ensaios, um momento genérico do processo de furação em desenvolvimento	47
Figura 21 - Sistema de refrigeração CoolJet Alta Pressão UltraFlex Series: # 3025	48
Figura 22 - Óleo de corte ECOCOOL MH 6000	49
Figura 23 - Geometria da ponta do inserto	50
Figura 24 - (a) arestas de corte do inserto sobre a superfície de saída. (b) vista lateral do inserto e (c) vista da parte posterior do inserto por onde é fixado no suporte, diâmetro da broca de 19,27mm	51

Figura 25 – Ilustração do suporte da ferramenta sem o inserto fixado. A fixação do inserto é ilustrada na mesma figura e é realizado através de um furo na parte de trás do suporte que dá acesso ao parafuso que prende o inserto.	51
Figura 26 - Inserto montado no suporte, diâmetro da broca de 19,27mm	52
Figura 27 - Fluxograma para demonstração da metodologia utilizada	54
Figura 28 - Dispositivo utilizado para fixação do corpo de prova	54
Figura 29 - Vista da estufa FANEM / ORION 515, utilizada no tratamento termoquímico dos insertos	55
Figura 30 - Vista do microscópio eletrônico de varredura (MEV), marca Hitachi, modelo TM 3000, utilizado para análise do desgaste da ferramenta	56
Figura 31 - Cavaco do tipo fita produzido nos ensaios pelas ferramentas que quebraram	58
Figura 32 - Vista completa da superfície de folga e da aresta de corte do Inserto 2 (tratado com PROTECTOR) e a região extrema da aresta de corte, mostrando que o desgaste nesta região é maior	59
Figura 33 - Observação do fenômeno de aderência na posição extrema da aresta de corte do Inserto 2 (tratado com PROTECTOR) e aresta postiça de corte formada sobre a superfície de saída do inserto 3 (não tratado)	60
Figura 34 - Aresta do Inserto 2, mostrando que as dendritas são de Cloro e o mapeamento dos elementos químicos presentes na aresta do Inserto 3	61
Figura 35 - Dimensões do desgaste da superfície de folga: 38,4µm expondo o metal duro 13,8µm e expondo o desgaste do recobrimento no arredondamento da aresta de corte do Inserto 2. Medida dos desgastes na superfície de folga do Inserto 3: 103µm sendo o valor de 12µm referente ao desgaste sobre o arredondamento da aresta de corte	63
Figura 36 - Mapeamento dos elementos químicos presentes sobre a superfície de saída da aresta do Inserto 2 em duas regiões diferentes	65
Figura 37 - Medida da largura do desgaste de cratera (CL) na superfície de saída do Inserto 2 (tratado com PROTECTOR) e medida do desgaste da superfície de saída CL do Inserto 3 (não tratado)	67
Figura 38 - Distribuição dos elementos químicos na superfície de saída do Inserto 3	68
Figura 39 - Distribuição dos elementos químicos no cavaco	70

Figura 40 - Mapeamento dos elementos químicos do cavaco resultante da usinagem

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Composição química do corpo de prova	45
Tabela 2 - Parâmetros de usinagem utilizados em cada broca	57
Tabela 3 - Análise comparativa dos elementos químicos encontrados na superfície de folga e aresta de corte do Inserto 2 e do Inserto 3	62
Tabela 4 - Análise do desgaste de flanco VB máx. do Inserto 2 (tratado com PROTECTOR) e do Inserto 3 (NÃO TRATADO)	64
Tabela 5 - Análise comparativa dos elementos químicos encontrados na superfície de saída em duas regiões diferentes do Inserto 2 (tratado com PROTECTOR)	66
Tabela 6 - Análise do desgaste CL na superfície de saída do Inserto 2 (tratado com PROTECTOR) e do Inserto 3 (NÃO TRATADO)	68

LISTA DE ABREVIATURAS, SIGLAS E SÍMBOLOS DO ALFABETO LATINO

UNITAU	- Universidade de Taubaté
ABNT	- Associação Brasileira de Normas Técnicas
ASME	- Society of Automotive Engineers – Sociedade de Engenheiros Automotivos
MQL	- <i>Minimum Quantity Lubricant</i> – Mínima quantidade de lubrificante
MEV	- Microscopia Eletrônica de Varredura
EDS	- Espectroscopia de Energia Dispersiva
TiN	- Nitreto de titânio
AlCr	- Alumínio e cromo
Vc	- Velocidade de corte [m/min]
f	- Velocidade de avanço [mm/volta]
Ve	- Velocidade efetiva de corte [mm/min]
VB	- Largura média de desgaste de flanco [mm]
V _{Bmax}	- Largura máxima de desgaste de flanco [mm]
KB, KM e KT	- Parâmetros do desgaste de cratera [mm]
Cm, Ct	- Desgaste do gume transversal [mm]
W	- Desgaste de quina [mm]
Mw	- Desgaste de guia [mm]
Pm, Pt	- Parâmetros de lascamento [mm]

LISTA DE SÍMBOLOS DO ALFABETO GREGO

α	Ângulo de incidência [°]
β	Ângulo de cunha [°]
γ	Ângulo de saída [°]
ψ	Ângulo do gume transversal [°]
σ	Ângulo de ponta [°]
ε	Ângulo de quina [°]
$r\varepsilon$	Raio de quina [mm]

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	16
1.1. Formulação do Problema	17
1.2. Objetivo	17
1.3. Justificativa	18
1.4. Estrutura do trabalho	18
2. REVISÃO DA LITERATURA	19
2.1. O Processo de Furação	19
2.1.1. Brocas Helicoidais	19
2.2. A História do Processo de Furação	22
2.3. Formação do Cavaco na Furação	24
2.3.1. Influência do cavaco	29
2.4. Desgaste e Vida de Ferramentas	29
2.4.1. Avarias e Desgastes	30
2.4.2. Mecanismos de Desgaste	33
2.4.3. Medida do Desgaste	36
2.4.4. Conceito de Vida de Ferramenta	37
2.4.5. Avarias, Desgastes e Vida em Ferramentas de Furação	38
2.5. Fluidos de Corte	40
2.5.1. Tipos, Funções e Aplicações de Fluidos de corte	41
3. MATERIAIS E MÉTODOS	45
3.1. Material Utilizado	45
3.2. Máquina Ferramenta	46
3.3. Sistema de Refrigeração	47
3.4. Meio lubri-refrigerante	49
3.5. Brocas	50
3.6. Parâmetros de corte utilizados	52
3.7. Método	53
3.8. Tratamento Termoquímico dos Insertos	55
3.9. Equipamento para análise do desgaste da ferramenta e do cavaco	56
4. RESULTADOS E DISCUSSÕES	57
4.1. Caracterização da aresta de corte e superfície de folga dos insertos	59
4.2. Caracterização da superfície de saída dos insertos	64

4.3. Caracterização do cavaco	69
5. CONCLUSÕES	71
5.1. Sugestões para trabalhos futuros	72
REFERÊNCIAS	73

1. INTRODUÇÃO

Com a concorrência, as empresas de transformação necessitam obter máxima eficiência para atender a demanda do mercado. Portanto, devem fornecer condições para oferecimento de prazos mais curtos, com menor custo. As empresas que empregam processos de usinagem também fazem parte dessa realidade. Os custos e os prazos de fabricação por usinagem dependem da abordagem de gestão e das tecnologias adotadas. Logo, a busca pelo aumento de produtividade e/ou redução de custo de fabricação é uma preocupação permanente para este tipo de empresa (SHARMA, 2009; SILVA, 2004).

Geralmente a operação de furação ocupa espaço relativo abaixo da operação de torneamento de aços. Entretanto a Empresa Müller Metais realiza uma atividade que é totalmente voltada para usinagem de furos. Uma grande quantidade de furos é realizada em peças de grandes dimensões denominados espelhos. Este é o principal componente utilizado na fabricação de trocadores de calor para as indústrias petrolíferas e químicas. Na verdade, dentre as operações por usinagem de espelhos, a furação é a mais incidente.

Nestes furos são montados tubos. A tolerância dimensional de montagem é bastante apertada e qualquer problema ou dificuldade com a qualidade das superfícies furadas, pode comprometer sua montagem. Portanto, todo o procedimento de furação é realizado com muito cuidado e com brocas especiais que garantam a qualidade do processo. É oportuno ressaltar que devido às dimensões dos espelhos e considerando que a furação é uma das últimas operações a ser realizada, qualquer possibilidade de refugo é inimaginável.

Qualquer retrabalho pode acarretar aumento no tempo total de fabricação do espelho, implicando na necessidade de prorrogação de prazos e incidência de pagamento de multas altas por atraso na entrega. Este fato ocorre, porque os clientes são grandes empresas, geralmente estatais que trabalham com contratos rigorosos e baseados em licitação entre os concorrentes da área. Os trocadores de calor podem ser equipamentos fabricados por encomendas para substituição de um existente na linha de produção ou podem ser fabricados a partir de novos projetos.

As características operacionais são sempre definidas pelo cliente e o tempo de fabricação de um trocador de calor é relativamente longo, em torno de 120 dias.

Sua instalação na fábrica do cliente normalmente depende de uma parada programada da linha de produção, que pode levar dias, por esse motivo o não cumprimento do prazo de fabricação do equipamento pode paralisar uma linha inteira de produção.

Os problemas e dificuldades encontrados na operação de furação dessas peças normalmente são paradas excessivas para troca de ferramentas. A troca de insertos pode ocorrer devido à formação de aresta postiça, quebra do inserto, enroscamento do cavaco no furo, entre outros. Esses fatores comprometem o acabamento do furo, requisito essencial para o produto. Outro fator importante é a redução significativa da vida da ferramenta, o que representa um aumento do custo de fabricação dessas peças, ou seja, maior número de afiações e de trocas de ferramentas por unidade de peça usinada.

1.1. Formulação do Problema

A empresa Müller Metais onde se desenvolveu este trabalho está instalada na cidade de Barueri, São Paulo há 28 anos. Atualmente está entre as principais empresas fabricantes de trocador de calor. Apesar desta boa colocação no mercado, a empresa tem um custo alto com a aquisição de insertos especiais para brocas na furação de espelhos, componente principal dos trocadores de calor. Aumentar a vida dos insertos, que seria uma das formas de melhorar a produtividade e/ou o custo de fabricação, não fazia parte da preocupação da Empresa Müller. Entretanto, decidiu apoiar o presente trabalho, permitindo que o mesmo fosse realizado em chão da fábrica.

1.2. Objetivo

Diante do exposto, o objetivo deste trabalho é analisar os mecanismos de desgastes ocorridos em insertos de metal duro tratados por processo termoquímico visando aumentar a vida dos mesmos. Para tanto, tais insertos foram banhados por um produto condicionador metálico antiatrimento e, em seguida, foi realizado um

tratamento termoquímico a uma temperatura da ordem de 80°C em estufa durante 30 minutos. Tal produto passará a ser denominado de PROTECTOR e não será revelado neste trabalho, para proteger possível proteção do procedimento e aplicação do produto junto ao INPI.

1.3. Justificativa

Aumentar a vida de ferramentas implica diretamente em resultados melhores em termos de produtividade e custos de fabricação. Este trabalho, ao perseguir tal objetivo fica plenamente justificado. Além disso, justifica-se também, por ter todo o seu desenvolvimento apoiado pela empresa Müller, significando um trabalho de parceria entre a Universidade e a Indústria, enriquecendo sobremaneira tais relacionamentos ainda em pouca quantidade de ocorrer no cenário nacional brasileiro.

1.4. Estrutura do trabalho

A dissertação está estruturada em capítulos e subcapítulos.

O capítulo 1 introduz o tema, o problema que motivou a pesquisa, os objetivos gerais, a justificativa e a estrutura do trabalho.

O capítulo 2 apresenta uma revisão da literatura sobre processo de furação, brocas helicoidais de aço rápido e metal duro, cavacos, desgaste das brocas, insertos de metal duro intercambiável, recobrimento sobre o material das brocas e fluido de corte.

O capítulo 3 trata de materiais e método utilizados na pesquisa, apresentando como foram feitos os ensaios e a obtenção dos dados e como foi conduzida a pesquisa na empresa Müller Metais.

No capítulo 4 são apresentados os resultados e suas discussões.

O capítulo 5 apresenta as considerações finais, conclusões e sugestões para trabalhos futuros.

Por fim, são apresentadas as referências adotadas neste trabalho.

2. REVISÃO DA LITERATURA

O objetivo desta revisão bibliográfica é formar uma base teórica a fim de fundamentar o estudo realizado neste trabalho, apresentando os principais tópicos que podem influenciar o tema nele tratado.

2.1. O Processo de Furação

Serão abordados os diversos aspectos relacionados com o processo de furação, brocas helicoidais inteiriças de aço rápido e metal duro com insertos intercambiáveis e brocas especiais. Formação de cavacos na furação, desgastes em brocas, recobrimento sobre o material das brocas e fluido de corte.

2.1.1. Brocas Helicoidais

As diversas partes de uma broca helicoidal são ilustradas na Figura 1.

- a) haste: destina-se a fixação da broca na máquina. Para brocas de até 15 mm de diâmetro, usa-se brocas de haste cilíndrica e a fixação na máquina ocorre através de mandris. Para diâmetros maiores a fixação é realizada através de cone morse;
- b) diâmetro da broca (d): é a medida entre duas guias da broca;
- c) núcleo: parte interior da broca de diâmetro igual a $0,16 D$. Serve para dar rigidez à broca;
- d) guias: a superfície externa de uma broca helicoidal apresenta duas regiões (uma em cada aresta de corte) que tem o diâmetro maior que o diâmetro das paredes da broca. Tem a função de guiar a broca dentro do furo e de impedir que toda a parede externa atrite com a parede do furo, diminuindo os esforços exigidos na furação;

- e) canais helicoidais: são as superfícies de saída do cavaco. O ângulo de hélice de brocas normais, pode ser de 28° para brocas de aplicação geral, 15° para brocas destinadas a furação de materiais com cavacos curtos e 40° para brocas utilizadas em materiais com cavacos longos. O comprimento do canal helicoidal também pode variar dependendo do diâmetro da broca e do comprimento do furo;
- f) aresta de corte: as duas arestas de corte de uma broca helicoidal não se encontram em um ponto, mas são ligadas por uma terceira aresta chamada de aresta transversal de corte. O ângulo formado pelas duas arestas de corte principais, chamado de ângulo de ponta é normalmente igual a 118° (DINIZ *et al.*, 2014, p.191).

A Figura 1, 2 e 3 mostram as várias partes de uma broca helicoidal com haste cônica.

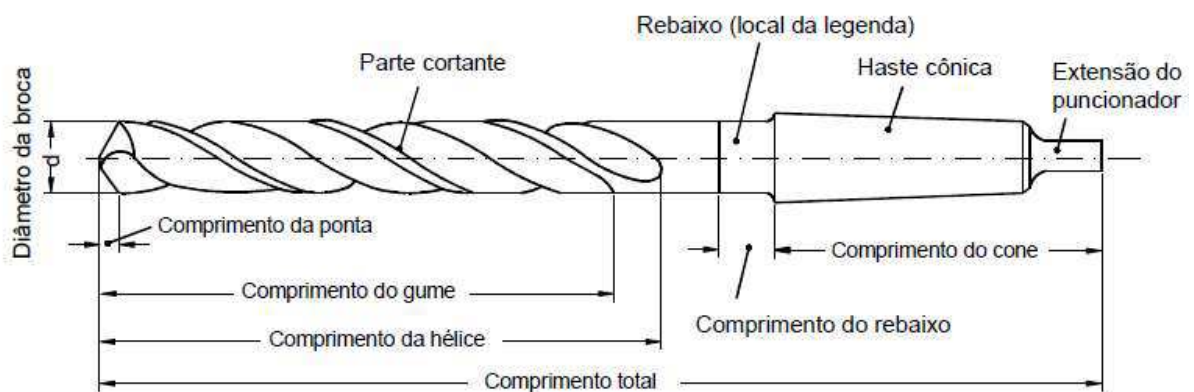


Figura 1 – Partes de uma broca helicoidal (KÖNIG *et al.*, 1997 citado por CASTILLO, 2005).

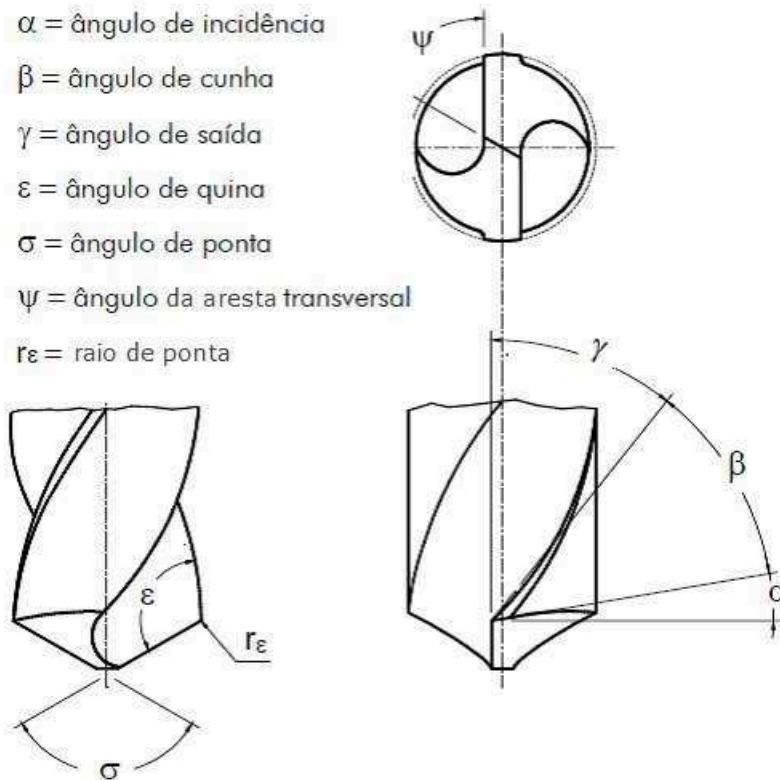


Figura 2 – Ponta da broca helicoidal, ângulos da aresta de corte (SCHROETER *et al.*, 1999 citado por CASTILLO, 2005).

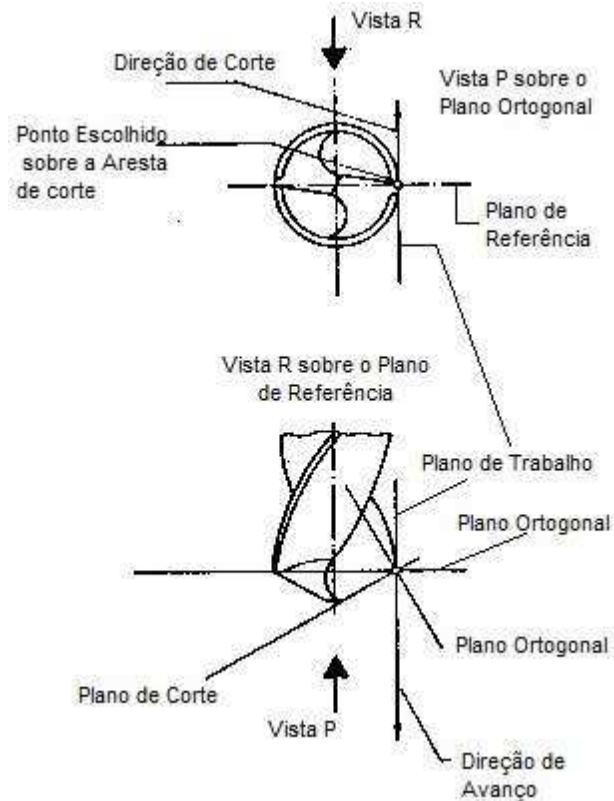


Figura 3 – Sistema referencial de uma broca helicoidal (DINIZ *et al.*, 2014, p. 31).

2.2. A História do Processo de Furação

De acordo com a norma alemã DIN 8589, o processo de furação é definido como um processo de usinagem com movimento de corte circular, ou seja, com movimento rotativo principal. A ferramenta possui movimento de avanço apenas na direção do seu eixo de rotação, que mantém sua posição em relação à ferramenta e à peça.

A furação com brocas está incluída no grupo de processos de fabricação por usinagem com arestas de geometria definida. É uma das operações mais importantes, envolvendo aproximadamente 30% de todas as operações que são realizadas em usinagem de metais (CASTILLO, 2005).

Apesar da importância do processo de furação, os avanços recebidos são recentes, quando comparado com o torneamento e fresamento. Esta dificuldade no desenvolvimento do processo ocorreu porque a introdução de novos materiais, como o metal duro, material cerâmico, recobrimentos de Nitreto de Boro cúbico e diamante são relativamente recentes no processo de furação, no entanto, ainda é muito utilizada a broca helicoidal de aço-rápido comum (DINIZ *et al.*, 2014, p.187).

Nos últimos anos houve um crescimento na utilização de máquinas do tipo Centros de Usinagem para realizar o processo de furação. Com isso, vários desenvolvimentos têm ocorridos com os materiais das ferramentas de furação (brocas), entre eles:

- broca de aço-rápido revestida com nitreto de titânio, que possibilitou um aumento na velocidade de corte, desde que a máquina propicie sua utilização, como rotação, rigidez e potência suficiente. Possui, além do carbono, vários elementos de liga, tais como tungstênio (W), cobalto (Co), cromo (Cr), vanádio (Va), molibdênio (Mo) e boro (Bo), que são responsáveis pelas propriedades de resistência de corte a quente até 550 °C;

- broca inteiriça de metal duro, excelente alternativa para furos até 20mm, fabricada pela metalurgia do pó, é produzida a partir de partículas duras de carbonetos de metais refratários, que são sinterizados com um ou mais elementos

do ferro (ferro, níquel ou cobalto) formando um corpo de alta dureza e resistência à compressão e ao desgaste;

- broca com pastilhas intercambiáveis de metal duro, como mostra a Figura 4, boa opção para brocas de diâmetros médios, suficiente para fixação dos insertos e máquina que propicie sua utilização. O corpo da broca é constituído por um material e a ponta da broca por outro, mais resistente ao desgaste e todo o conjunto apresenta boa relação custo/benefício, uma vez que apenas a ponta da broca é trocada quando a ferramenta atinge o seu fim de vida.



Figura 4 – Broca especial com insertos intercambiáveis de metal duro.

Um estudo realizado com brocas helicoidais de aço rápido mostrou que para avanços mais elevados a força axial não variou significativamente com a presença de fluido de corte (BORDINASSI *et al.*, 2004).

Utilizando-se parâmetros de corte adequados, a ferramenta de metal duro possibilita um processo bastante vantajoso no que diz respeito ao tempo de produção (RIGO *et al.*, 2012).

2.3. Formação do Cavaco na Furação

“A formação do cavaco influencia diversos fatores ligados à usinagem, tais como o desgaste da ferramenta, os esforços de corte, o calor gerado na usinagem, a penetração do fluido de corte, etc.” (DINIZ *et al.*, 2014, p. 39).

O cavaco é resultado da remoção do material em excesso da matéria prima bruta, para que seja conseguido atingir o formato final da peça, com suas tolerâncias de forma e posição exigidas pelo projeto, as Figura 5 e 6 mostram a formação do cavaco durante a usinagem.

Formação do cavaco – ocorre da seguinte forma:

- uma pequena porção do material é recalcada contra a superfície de saída da ferramenta. Ocorrem deformações elástica e plástica;
- esta deformação plástica aumenta progressivamente até iniciar um deslizamento (sem que haja perda de coesão) entre a porção de material recalcada e a peça;
- continuando penetração da ferramenta, haverá uma ruptura (cisalhamento) parcial ou completa do cavaco dependendo da ductilidade do material e das condições de usinagem;
- prosseguindo, devido ao movimento relativo entre a ferramenta e a peça, inicia-se um escorregamento da porção do material deformada e cisalhada que já é o cavaco, que sai pela superfície de saída da ferramenta, a Figura 5 mostra a deformação que ocorre na região de cisalhamento;
- uma nova porção do material repete o ciclo mencionado.

Portanto, o fenômeno de formação do cavaco é periódico.

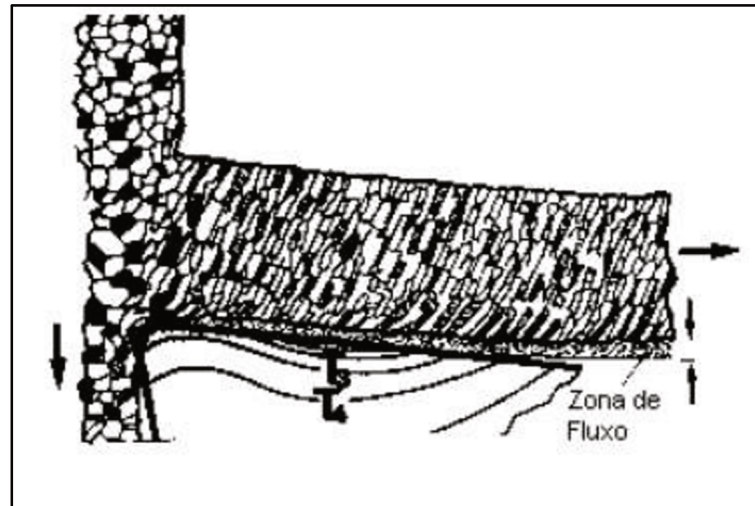


Figura 5 – Formação do cavaco mostrando a grande deformação que ocorre na região de cisalhamento (DINIZ *et al.*, 2014, p. 42).

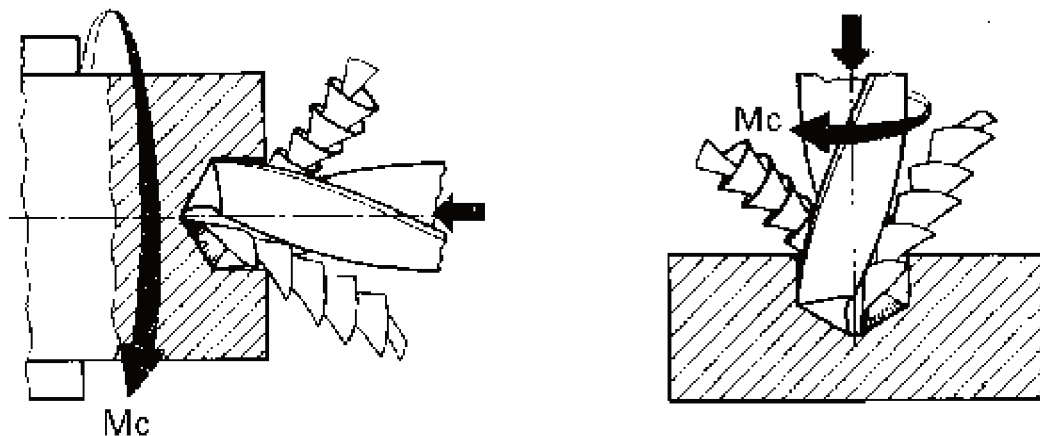


Figura 6 – Formação do cavaco durante a usinagem (Adaptado de KOLE *et al.*, 1997 citado por FORTUNATO, 2012).

Tipos e formas de Cavaco

Tipos - Os tipos de cavacos dependem exclusivamente do material da peça. Não é possível e nem economicamente viável mudar o tipo de cavaco. São eles:

Cavaco contínuo – é constituído de porções justapostas numa disposição contínua. A distinção das porções é quase imperceptível. O cavaco contínuo se forma durante a usinagem de materiais dúcteis (o aço, por exemplo). O ângulo de

saída deve ser maior que zero, podendo, em alguns casos ficar muito próximo ou igual a zero.

Cavaco de cisalhamento – é constituído de porções justapostas bem distintas. Ocorre com materiais de ductilidade mais baixa ou de pouca fragilidade. É típico de aços inoxidáveis.

Cavaco de ruptura - é constituído de fragmentos arrancados da peça usinada. O ângulo de saída deve assumir valores baixos, nulos ou negativos. São formados quando o material apresenta alta fragilidade, como por exemplo, os ferros fundidos cinzentos.

Formas - Os cavacos do tipo contínuo ou de cisalhamento podem apresentar diversas formas, conforme ilustradas na Figura 7:

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

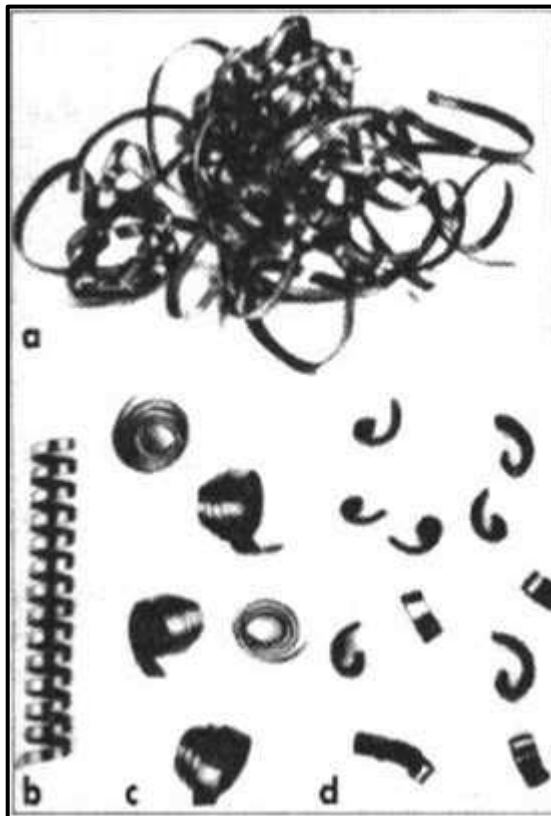


Figura 7 - Formas do Cavaco: a) em fita; b) helicoidal; c) espiral; d) em lascas (DINIZ *et al.*, 2014, p. 45).

De acordo com MORENO *et al.* (2013), o grau de encruamento da raiz do cavaco na região da aresta transversal de brocas helicoidais, é influenciado pelos parâmetros de corte e pelas formas de afiação. O alívio na aresta transversal providenciados durante as afiações tende a reduzir o aumento da dureza na raiz do cavaco. Este comportamento resulta em maior deformação do cavaco podendo influenciar na forma do cavaco e resultando em maior dificuldade de seu escoamento. Por outro lado maiores valores de avanço e velocidade de corte aumentam a dureza da raiz do cavaco. Este comportamento, por seu lado, pode ser um facilitador do escoamento do cavaco pelo fato de que o mesmo pode quebrar mais facilmente.

Outro estudo realizado para analisar a raiz do cavaco próximo da aresta transversal de brocas helicoidais mostrou uma camada endurecida do mesmo nesta região. Foi encontrado um cavaco de pequenas proporções ratificando a hipótese de que efetivamente ocorre corte, além de esmagamento com grandes deformações na referida região. Estes dados foram obtidos pela realização de ensaios de microdureza (SARATT *et al.*, 2010).

A necessidade de eliminar a utilização dos fluidos de corte no processo de usinagem, devido aos efeitos nocivos provocados ao meio ambiente e saúde do ser humano, tem gerado diversos estudos sobre o assunto, porém quando se trata do processo de furação, essa tarefa torna-se mais complexa, devido as particularidades que caracterizam este processo, como a quantidade de calor gerada no atrito entre a broca, o cavaco e a peça, além da dificuldade de escoamento do cavaco. Um estudo desenvolvido com o objetivo de investigar a formação do cavaco na furação sem fluido de corte do aço AISI P20 revelou a existência de problemas com o escoamento, explicado pelo elevado fator de empacotamento, ocorrência de entupimento dos canais e quebra da ferramenta. As análises metalográficas realizadas com as amostras do cavaco gerado mostraram a ocorrência de elevadas cargas de compressão e atrito no cavaco, provocando um significativo aumento da dureza, que em contato com a parede do furo dificulta o seu escoamento. Outra análise realizada com a broca quebrada presa no interior do furo mostrou que o corte do material estava sendo realizado pelas guias da broca, o que é prejudicial ao processo, uma vez que essas partes da broca não foram projetadas para realizar o

corte, mas sim para servir de guia no furo. Foi detectado, neste caso, que houve a tendência do escoamento do cavaco na direção da parede do furo, ao invés de escoar pelos canais helicoidais da broca. Todo esse processo levou a broca ao colapso. Como alternativa para resolver este problema foi adotado, além do uso do fluido de corte, a furação intermitente, que provocou uma melhora significativa no escoamento do cavaco, evitando os micros lascamentos nas guias e quebra de ferramenta (ZEILMANN *et al.*, 2011).

Foi realizado um estudo sobre a usinabilidade do Aço SAE 4144 para a operação de furação profunda (>3d), que é o caso em que o processo de furação é bastante ruim, gerando cavaco em forma de fita, quebra de broca e variações de medida. Foram avaliados parâmetros de corte, características da ferramenta, influência da cobertura PVD-TiN e da pressão do óleo lubri-refrigerante. Os resultados mostraram que os parâmetros de corte assim como a cobertura da ferramenta apresentam grande influência sobre o mecanismo de formação do cavaco na furação profunda. A pressão do óleo é fundamental para remoção do cavaco, evitando que o mesmo se enrole na broca. Foi observada presença marcante de formação do cavaco emaranhado na condição afiação manual e sem cobertura da broca. A faixa de velocidade de corte de 76 a 79 m/min, juntamente com a faixa de velocidade de avanço 104 a 115 mm/min, é muito crítica para o processo, pois gera o cavaco do tipo fita emaranhado, o que aumenta o risco de quebra da ferramenta. As duas faixas que apresentaram bons resultados para o processo foram as velocidades de corte de 76 a 80 m/min, em conjunto com os avanços de 90 a 93 mm/min, e a velocidade de corte de 84 m/min, juntamente com os avanços de 111 a 115 mm/min (WOSNIAK *et al.*, 2009).

2.3.1. Influência do cavaco

Um dos principais problemas do processo de furação é a saída dos cavacos de dentro do furo. Se os cavacos não forem formados adequadamente de modo que facilite a sua retirada do interior do furo, eles podem causar entupimento, provocando aumento do momento torsor, e dependendo da magnitude deste, quebrar a ferramenta.

Quando a ferramenta quebra dentro do furo, causa grandes prejuízos, pois além dos custos com a perda da ferramenta, ocorrem custos inconvenientes de hora máquina e hora homem dedicados a esta tarefa de remoção do pedaço da broca remanescente no furo. Frequentemente o prejuízo pode ser ainda maior, quando também a peça precisa ser refugada.

Por este motivo é necessário procurar as condições para que os cavacos sejam adequados e que sejam de fácil remoção de dentro do furo. Os cavacos helicoidais, espirais ou em forma de lascas são os mais adequados.

Pode-se ainda utilizar um ciclo de furação que retire com frequência a broca de dentro do furo. Este procedimento é chamado de furação “pica-pau”. Porém, esse processo gera tempos passivos que podem significar perda de produtividade. Outra alternativa é utilizar fluido de corte sob pressão através de canais especialmente construídos na broca que leva o fluido diretamente para o fundo do furo e por uma ação mecânica, este impulsiona o cavaco para fora.

2.4. Desgaste e Vida de Ferramentas

A preocupação em reduzir o desgaste da ferramenta é cada vez maior, pois o desgaste provoca paradas do processo para troca da ferramenta ou sua afiação, prejudicando a produção e os custos envolvidos. Para reduzir o desgaste na ferramenta foi realizado um estudo para avaliar o desempenho das brocas helicoidais de aço rápido AISI M2 tratadas por processo de nitretação a plasma, visando melhorar o seu desempenho na furação de ferro fundido cinzento (ROST *et al.*, 2010). A nitretação a plasma foi realizada nas ferramentas variando-se a

temperatura e o tempo de tratamento. Os resultados obtidos mostraram que as ferramentas que receberam nitretação a plasma com temperaturas mais baixas e tempos menores apresentaram melhor desempenho.

2.4.1. Avarias e Desgastes

Segundo DINIZ *et al.* (2014, p. 105), o desgaste é um fenômeno de perda gradativa e progressiva de material da ferramenta devido à ação do corte. O desgaste é impossível de ser evitado, porém pode ser controlado.

Os diversos tipos de desgastes são:

Desgaste Frontal (ou de flanco) é causado pelo contato e atrito entre a ferramenta e a peça e ocorre na superfície de folga. Este tipo de desgaste é o mais comum e modifica totalmente a forma da aresta de corte original, prejudicando o acabamento superficial da peça e comprometendo sua precisão dimensional.

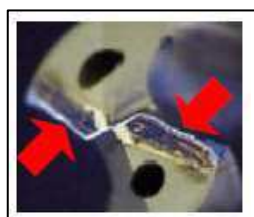


Figura 8 – Desgaste Frontal (Adaptado de SANDVIK COROMANT, 2006 citado por FORTUNATO, 2012).

Desgaste de Cratera é causado pelo atrito entre a ferramenta e o cavaco e ocorre na superfície de saída. Dificilmente ocorre em ferramentas de metal duro recobertas, principalmente se for com Al_2O_3 . O aumento do desgaste de cratera provoca a quebra da ferramenta, quando este, paralelamente também já se encontra com presença do desgaste frontal.

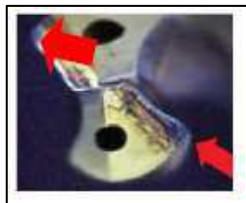


Figura 9 – Desgaste de Cratera (Adaptado de SANDVIK COROMANT, 2006 citado por FORTUNATO, 2012).

Avaria é uma deformação acidental que pode ocorrer com a ferramenta. Se a causa for conhecida pode ser evitada, mas não pode ser controlada, há vários tipos de avarias, são elas:

Deformação Plástica da Aresta de Corte - é causada por esforços elevados de corte que provocam aumento da temperatura, essas deformações comprometem o controle do cavaco e prejudica o acabamento superficial da peça. O crescimento dessa deformação pode levar a quebra da ferramenta. A forma de evitar essa ocorrência é alterar as condições de usinagem controlando o nível dos esforços de corte e diminuindo os choques no primeiro contato com a peça, pela preparação de chanfros de entradas e ou diminuição da velocidade de corte.



Figura 10 – Deformação plástica da aresta de corte (Adaptado de SANDVIK COROMANT, 2006 citado por FORTUNATO, 2012).

Lascamento - é causado quando se usa ferramentas com aresta de corte com ângulos de cunha pequenos, conseqüentemente de baixa resistência à choques e incrustações duras inerentes ao processo. Comprometem o acabamento superficial da peça e, com o aumento do número de lascas, provocam a quebra da ferramenta.

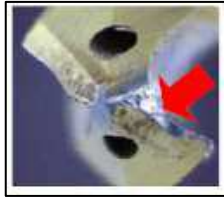


Figura 11 – Lascamento da broca (Adaptado de SANDVIK COROMANT, 2006 citado por FORTUNATO, 2012).

Trinca – é causada por aquecimento da ferramenta seguido de resfriamento brusco. As tensões superficiais e da subsuperfície variam com grande intensidade podendo atingir o limite de resistência à tração/compressão do material da ferramenta, provocando a trinca e como consequência, a quebra da ferramenta.



Figura 12 – Trincas no corpo da broca (Adaptado de SANDVIK COROMANT, 2006 citado por FORTUNATO, 2012).

Microtrinca – é causada pelas oscilações de temperatura e ou esforços mecânicos. As trincas ocorrem perpendicularmente a aresta de corte quando há variação de temperatura e paralelas a aresta de corte quando há variação de forças.

Quebra – pode ocorrer inesperadamente devido a diversos fatores como: ferramenta muito dura, carga excessiva sobre a ferramenta, entupimento de canais de expulsão de cavacos, crescimento de um ou mais desgaste ou avarias, etc. Quando ocorre a quebra a pastilha é danificada. A quebra pode gerar outras consequências imprevisíveis com relação ao sistema da máquina e do suporte de ferramentas.



Figura 13 – Quebra da broca (Adaptado de SANDVIK COROMANT, 2006 citado por FORTUNATO, 2012).

Um estudo realizado com o objetivo de relacionar o desgaste e a força de avanço na determinação do critério de fim de vida de uma broca helicoidal mostrou que a força de avanço é maior para as ferramentas em fim de vida do que para as ferramentas novas. O mesmo pode ser observado para a furação com utilização de pré-furo. O desgaste abrasivo encontrado tanto para as arestas de corte principais quanto para a aresta transversal colaborou na elevação da força de avanço para a ferramenta na condição em fim de vida. Comparando-se furação com pré-furo e sem pré-furo, para a mesma ferramenta em final de vida é possível notar o crescimento dos esforços de corte. Os esforços são relacionados com o desgaste que ocorre na aresta principal de corte (BORDIN *et al.*, 2011).

2.4.2. Mecanismos de Desgaste

Diversos fatores causam o desgaste da ferramenta. Estes são chamados de mecanismos de desgaste. Os principais são:

Mecanismo de desgaste devido à presença da Aresta Postiça de Corte

– é formada na superfície de contato entre o cavaco e a superfície de saída da ferramenta. É um fenômeno intermitente que aparece para valores de velocidades de corte inferiores a aproximadamente 50 m/min para aços. A porção do material da peça que se solda sobre a superfície de saída da ferramenta fica endurecido pelo encruamento provocado pela alta pressão do cavaco sobre ele. Assim, esta porção de material substitui a aresta de corte e passa a representar o papel de realizar a usinagem de forma precária. Como se trata de um fenômeno intermitente, a aresta postiça se forma e se quebra com frequência. Ao quebrar, parte do material sai pela superfície de saída ou pela superfície de folga. No primeiro caso pode não provocar nenhum dano à ferramenta, porque esta se encontra protegida pela própria aresta postiça de corte. Entretanto, exercerá um efeito de cunha e alta pressão ao sair entre a superfície de folga e a peça. A peça fica com acabamento superficial ruim e a ferramenta sofre uma intensificação do desgaste VB. Provoca danos no acabamento superficial da peça e reduz drasticamente a vida da ferramenta. A

Figura 14 ilustra esquematicamente uma aresta postiça de corte. A Figura 15 mostra a região afetada pela aresta postiça de corte. O crescimento exagerado do desgaste nesta região tem sido justificado como sendo devido ao alto encruamento do cavaco, que deixa de ocorrer para temperaturas acima da temperatura de recristalização do material da peça (DINIZ *et al.*, 2014, p.111).

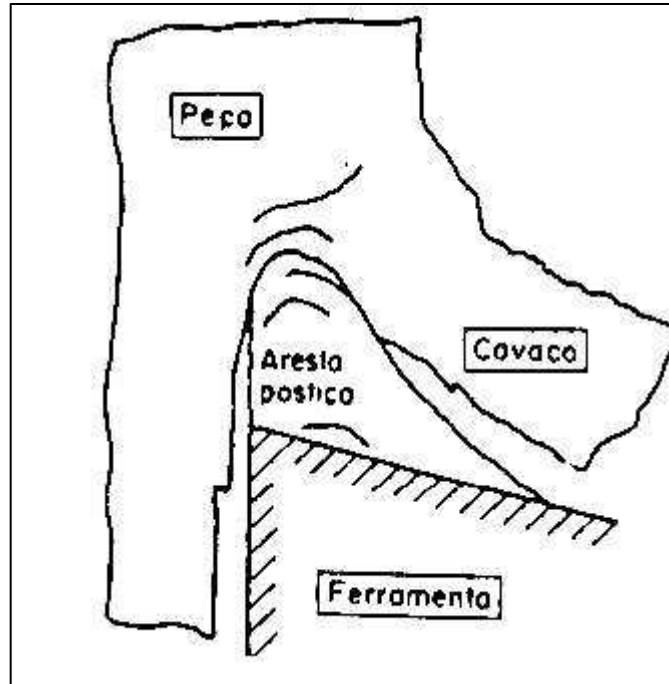


Figura 14 - Aresta Postiça de Corte.

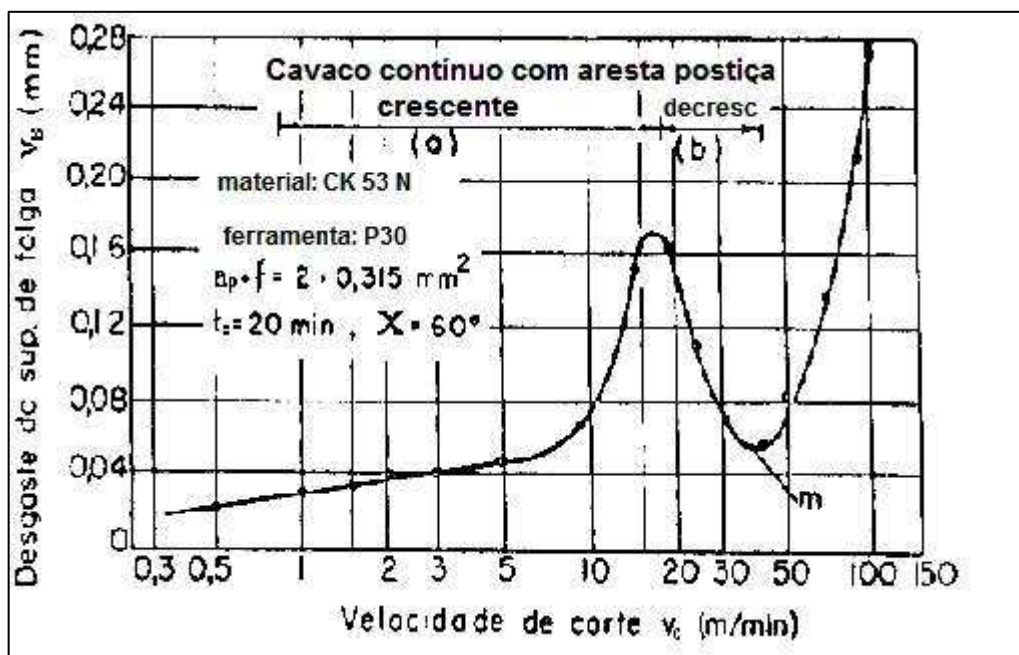


Figura 15 - Desgaste Frontal x Velocidade de Corte mostrando a região de formação da Aresta Postiça de Corte.

A abrasão (ou atrito) mecânica – é causada quando a superfície de folga atrita com partículas duras do material da peça, que combinado com alta temperatura de corte compromete a dureza da ferramenta. A abrasão gera principalmente o desgaste frontal, mas pode gerar também o desgaste de cratera.

Quanto maior a dureza da ferramenta a quente, maior sua resistência ao desgaste abrasivo.

Aderência – é a formação de camadas de material da peça aderentes às superfícies da ferramenta nas regiões de contato com o cavaco e com a peça. Este mecanismo é tão mais presente quando ocorrem a combinação de condições de altas temperaturas e baixas velocidades de corte. A aderência é prejudicial por que devido a sua instabilidade como extrato metálico, pequenas partes da mesma se soltam e resultam em partículas abrasivas que intensificam o desgaste da ferramenta.

Difusão - consiste na transferência de átomos de um metal sólido para outro. Depende da temperatura, da duração do contato, da afinidade físico-química dos dois metais envolvidos no contato ferramenta/cavaco. É um mecanismo que ocorre devido à existência do mecanismo de aderência mencionado anteriormente. A difusão representa uma deterioração do material da ferramenta que perde sua característica de resistência ao desgaste.

Oxidação - Altas temperaturas e a presença de ar e água (contida nos fluidos de corte) podem gerar oxidação. O material da ferramenta oxidado é facilmente perdido na forma de desgaste da ferramenta.

Sumarizando, o desgaste de flanco é causado principalmente por abrasão (em altas velocidades de corte) e pelo cisalhamento da aresta postiça de corte, quando esta ocorre. O desgaste de cratera é devido principalmente à difusão e o desgaste de entalhe à aderência e à oxidação. Em velocidades de corte baixas, o desgaste é relativamente elevado por causa do cisalhamento da aresta postiça de corte e da aderência. Em velocidades de corte maiores, o desgaste é causado principalmente pelos fatores cuja intensidade depende da temperatura de corte.

Referente ao desgaste, outro mecanismo de falha são as solicitações mecânicas formadas por fadiga, fluxo plástico, fratura e sobrecarga progressiva. A Figura 16 apresenta a participação do componente no desgaste total em função da velocidade de corte ou temperatura (BUNSHAH, 2001 citado por CARDOSO, 2014).

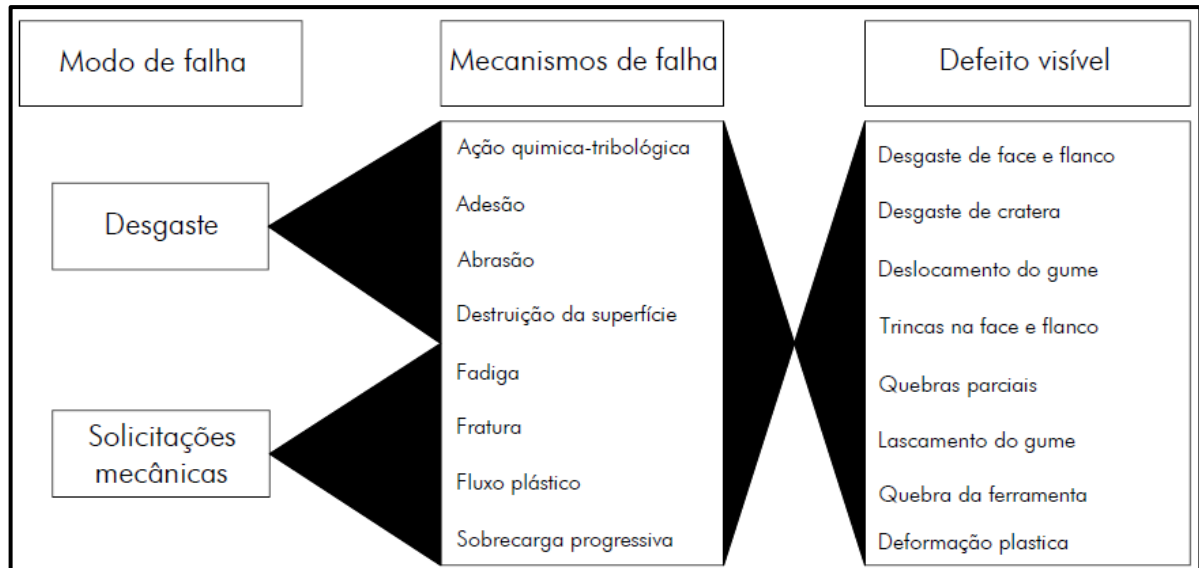


Figura 16 – Diferentes componentes no desgaste da ferramenta.

2.4.3. Medida do Desgaste

A medida do desgaste é realizada na superfície de saída e na superfície de folga da ferramenta. Na superfície de saída mede-se a profundidade da cratera (KT), a largura (KB) e distância do centro da cratera à aresta de corte (KM). Na superfície de folga mede-se a largura do desgaste de flanco (VB), calcula-se o valor médio do desgaste e a largura máxima do desgaste de flanco ($V_{Bmáx}$) (DINIZ *et al.*, 2014, p.109).

A norma ISO 3685/1993, (“Tool life testing with single point turning tools”) define os parâmetros que quantificam esses desgastes. Os principais são KT (profundidade de cratera), VB (desgaste de flanco médio), $V_{Bmáx}$ (desgaste de flanco máximo) e VN (desgaste de entalhe).

O tempo que uma ferramenta de corte trabalha efetivamente antes de ser afiada ou substituída é denominado de “vida da ferramenta de corte”. O fim da vida é determinado por um critério. Os critérios determinados pela norma ISO para ferramentas de aço rápido, de metal duro e de cerâmica são:

Desgaste de flanco médio, $VB_B=0,3$ mm.

Desgaste de flanco máximo, $VB_{m\acute{a}x}=0,6$ mm.

Profundidade da cratera, $KT=0,06+0,3f$, sendo f o avanço em mm/rotação.

Falha catastrófica.

2.4.4. Conceito de Vida de Ferramenta

Taylor desenvolveu a equação (1) que relaciona a vida T [min] de um par ferramenta/peça com a velocidade de corte V_c [m/min].

$$T \cdot v_c^x = K \quad (1)$$

Onde: x é o coeficiente da equação que expressa o quão significativo é a influência da variação da velocidade de corte na vida da ferramenta, e K representa a vida específica do par ferramenta/peça, ou seja: é a vida da ferramenta para velocidade de corte de 1 m/min.

As indicações que determinam a adoção de um determinado valor-limite para o fim de vida da ferramenta são diversas. A ferramenta deve ser descartada quando:

- a) em situações de usinagem quando não são necessárias tolerâncias apertadas e bom acabamento superficial, fazendo com que o desgaste atinja proporções elevadas, podendo ocorrer a quebra da aresta de corte;
- b) quando não se atinge mais a tolerância apertada e/ou bons acabamentos superficiais, devido ao desgaste da superfície de folga da ferramenta;
- c) quando ocorre aumento de temperatura na aresta de corte, fazendo com que esta perca o fio de corte, isso ocorre em ferramentas de aço rápido que não suportam altas temperaturas;
- d) quando do comprometimento do funcionamento da máquina, devido ao aumento da força de usinagem.

Sempre deve ser evitada a quebra da ferramenta. Os efeitos da quebra da ferramenta podem comprometer a peça, a máquina, o suporte da ferramenta, etc.

Normalmente a quebra ocorre para valores de VB de 0,8 a 1,5 mm em ferramentas de metal duro.

No caso de ferramentas de metal duro com cobertura, o desgaste cresce muito lentamente, quando atinge valores de VB de 0,3 a 0,4 mm, inicia-se o desgaste do substrato da ferramenta. Quando atinge valores de VB de 0,8 a 1 mm a ferramenta deve ser descartada.

Em operações de acabamento, na qual o operador verifica as dimensões da peça com maior frequência, torna-se fácil detectar o desgaste da ferramenta, pois, os valores das medidas revelam a dimensão do desgaste pelo recuo da aresta de corte. Assim é possível corrigir o desvio de posição e continuar com a mesma ferramenta, até que não seja mais possível conseguir qualidade exigida pelo projeto da peça. Por isso, é fundamental que o operador tenha bons conhecimentos sobre tolerância de forma e posição, para conseguir estabelecer o fim de vida da ferramenta o mais adequado possível.

O uso de diversas tecnologias para o controle de desgaste da ferramenta tais como, sensores de vibração, amperímetros, torquímetros, entre outros, auxiliam o operador na decisão do momento ideal para troca da ferramenta (DINIZ *et al.*, 2014).

2.4.5. Avarias, Desgastes e Vida em Ferramentas de Furação

No processo de furação, o atrito com a peça e os cavacos, juntamente com a energia gasta para deformar o material, geram grandes quantidades de calor no interior do furo. Este calor é responsável pelo desgaste acentuado da aresta transversal de corte, quando o avanço é exagerado. Quando a velocidade de corte é muito alta, o desgaste fica mais acentuado na periferia da broca (DINIZ *et al.*, 2014).

A Figura 17 apresenta o desgaste médio VB e o máximo V_{Bmax} nos flancos da broca. Devido à geometria relativamente complexa das cunhas cortantes de

brocas, geralmente é bastante complicado realizar a medida dos desgastes. Isto porque, quando a aresta de corte não é retilínea, o foco em estereomicroscópios nem sempre é possível de ser conseguido. Quando as brocas são providas de insertos de metal duro padronizados, as medidas dos desgastes se tornam bastante mais fáceis de serem realizadas.

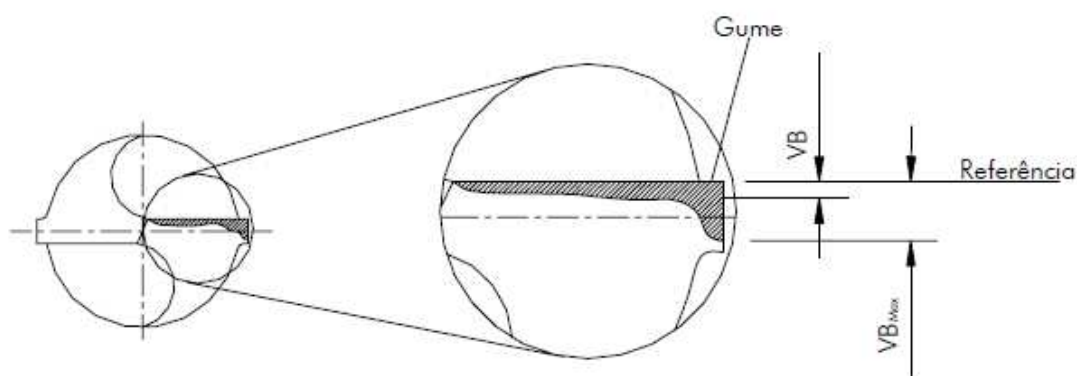


Figura 17 – Desgaste de flanco (SCHROETER *et al.*, 1999 citado por CASTILLO, 2005).

ZEILMANN *et al.* (2011), realizaram um trabalho sobre o comportamento dos desgastes em brocas helicoidais de metal-duro na furação de material aço AISI P20 endurecido sob diferentes condições de aplicação de fluido de corte: fluido refrigerante em abundância, MQL (mínima quantidade de lubrificante) e usinagem sem fluido de corte. Alternou os ensaios utilizando furação com e sem o processo pica-pau. Os resultados mostraram que a condição de MQL e sem fluido de corte com o processo pica-pau foi a que apresentou os melhores resultados. Como o pior desempenho da broca foi com o uso de fluido em abundância, concluiu que deve ter havido a presença de choque térmico prejudicando o processo. Os mecanismos de desgastes identificados foram a aderência e micro lascamento.

Outro estudo realizado sobre desgastes, porém em brocas de aço rápido (HSS) sem e com tratamento por Nitretação a Plasma foi realizado por DOS SANTOS *et al.* (2013). O material ensaiado foi o ferro fundido nodular, utilizando duas condições de teste: velocidade de corte 30 m/min e avanço 0,15 mm/volta e velocidade de corte 50 m/min, e avanço de 0,25 mm/volta. Constatou que tanto para menores velocidades de corte como para maiores velocidades de corte, a broca com tratamento apresentou melhores resultados, superando a broca sem tratamento

superficial em até 140%. Tal resultado, relativamente previsível demonstra a influência da velocidade de corte na vida da broca.

2.5. Fluidos de Corte

O primeiro relato sobre a utilização de fluido de corte na usinagem dos materiais foi em 1890 por F. W. Taylor, que utilizou água para resfriar a ferramenta. Ao longo do tempo diversos estudos foram realizados permitindo o aparecimento de novos tipos de fluidos além da água, pois, esta promove oxidação da peça e tem praticamente nenhum poder lubrificante. Recentemente vem se intensificando pesquisas nessa área com o objetivo de eliminar ou minimizar o uso de fluido de corte na usinagem de peças, considerando, principalmente os custos operacionais da produção, questões ecológicas, preservação do meio ambiente, saúde do ser humano, etc. (DINIZ *et al.*, 2014).

Para que o uso de fluidos de corte seja minimizado, duas técnicas têm sido intensamente utilizadas: o corte sem fluido de corte e o corte com mínima quantidade de fluido MQL. Porém o uso da MQL pode ser considerado indesejável, pois a névoa do fluido, caso não seja contida de alguma forma, poderá ser prejudicial, provocando poluição do ar.

Um estudo sobre a usinagem do aço inoxidável ABNT 136 UF com a aplicação de fluido de corte a alta pressão, 10 MPa, 15MPa e 20 Mpa, com fluido de corte a base vegetal com concentração 5% e 10%, utilizando pastilhas de metal duro, mostraram que o fluido de corte em alta pressão aumentou o tempo de vida das ferramentas, gerando um menor desgaste na aresta de corte, os resultados foram comparados na condição de usinagem a seco e na forma de jorro (NAVES, 2013).

2.5.1. Tipos, Funções e Aplicações de Fluidos de corte

A função do fluido de corte está relacionada com a necessidade de redução na quantidade do calor gerado (lubrificação), ou retirada do calor da região de corte (refrigeração). Além disso também minimiza o desgaste da ferramenta e dilatação térmica da peça usinada. Vem sendo desenvolvido novos materiais para ferramentas ou camadas de coberturas protetoras, materiais de peça com usinabilidade melhorada e fluido de corte com capacidade lubrificante, com o objetivo de diminuir esse atrito. Apesar de todo o esforço, o calor continua sendo gerado, não existe usinagem sem geração de calor (DINIZ *et al.*, 2014).

Outra função do fluido de corte é retirar o cavaco de região da corte, como no processo de furação profunda. Também pode atuar como proteção contra a corrosão.

As características que o fluido de corte deve ter para retirar calor de região de corte são: baixa viscosidade para fluir facilmente; capacidade de aderir bem ao material a fim de melhorar o contato térmico; alto calor específico e alta condutibilidade térmica. O objetivo final no uso do fluido de corte com ação refrigerante é aumentar a vida da ferramenta.

O fluido de corte com ação refrigerante pode também, beneficiar a qualidade da peça, evitando sua dilatação térmica e com isso propiciando sua precisão dimensional.

Em alguns casos o uso do fluido de corte não tem grande influência na vida da ferramenta, como a usinagem de ferro fundido cinzento (exceto furação profunda), usinagem de materiais plásticos ou resinas. Os materiais de ferramenta, como os cerâmicos, o uso de fluido de corte deve ser evitado, pois esse material não suporta variações de temperatura.

A ação lubrificante do fluido de corte consiste na redução do coeficiente de atrito entre cavaco e ferramenta. O fluido penetra entre as superfícies em contato

pelo fenômeno da capilaridade. A ação lubrificante dos fluidos de corte é mais eficaz quando a velocidade de corte for mais baixa. Quando a velocidade de corte for alta é melhor que o fluido seja impulsionado com alta pressão ou tenha uma ação mista de lubrificação e refrigeração, pois o acesso do mesmo na região da cunha cortante da ferramenta fica dificultada. É bom lembrar, que o acesso do fluido de corte depende de uma penetração contra o movimento natural da usinagem.

Para que um fluido de corte seja um bom lubrificante, deve possuir as seguintes características: resistência a pressões e temperaturas elevadas sem vaporizar; boas propriedades de antifricção, de anti solda e baixa viscosidade.

Entre todas as propriedades necessárias para refrigeração e lubrificação, o fluido de corte também deve: não apresentar odores desagradáveis; não ser corrosivo, não se solidificar nos tubos de circulação e nas guias da máquina, não causar danos à saúde humana.

Os vários tipos de fluidos de corte são classificados conforme a Figura 18.

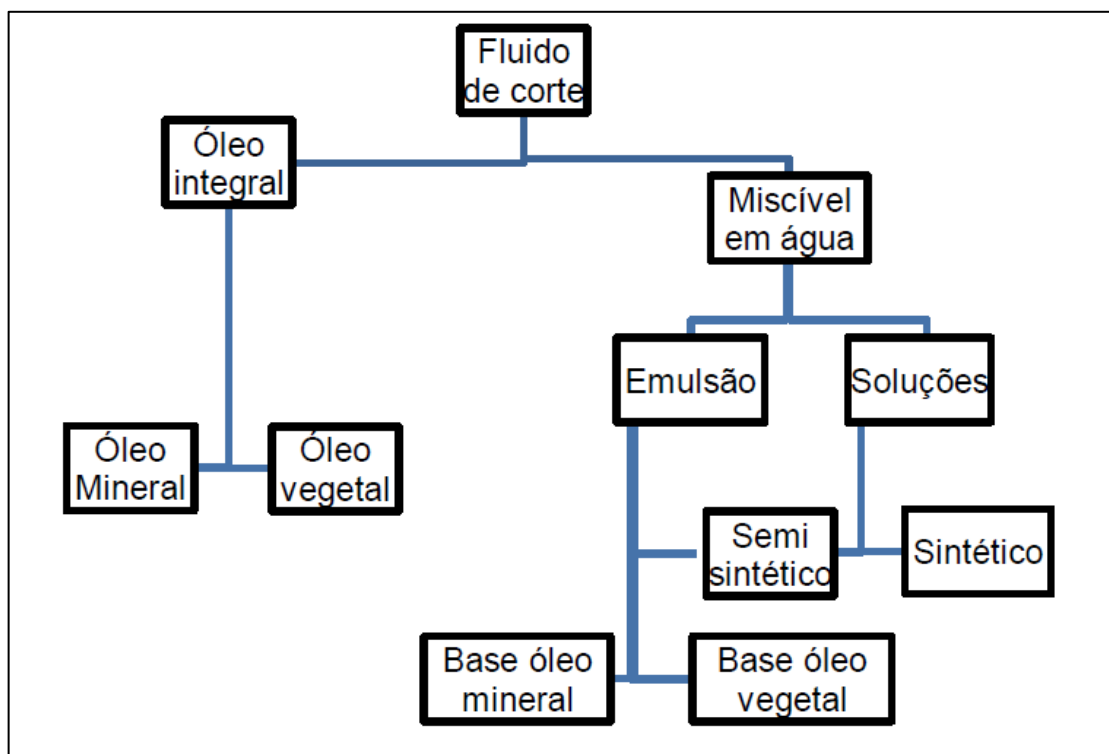


Figura 18 – Classificação dos Fluidos de Corte

As emulsões são compostas de pequena porcentagem de óleo emulsificável, um composto de óleo mineral e vegetal, dispersos em pequenas gotículas na água.

Como tais emulsões possuem maior porcentagem de água, sua atuação é principalmente como fluido refrigerante, ao mesmo tempo que protege o sistema contra corrosão devido a presença do óleo mineral ou vegetal. São usados ainda biocidas, que inibem o surgimento de bactérias e fungos, causadores de mau cheiro.

Essas emulsões são adequadas em operações de usinagem em que o principal requisito é a refrigeração, nas quais a retirada de material não é muito grande, em operações onde a velocidade de corte e profundidade de usinagem são médias ou altas.

Microemulsões (fluidos semissintéticos), esses fluidos apresentam de 5% a 50% de óleo mineral.

Soluções químicas (fluidos sintéticos): São soluções monofásicas de substâncias químicas dissolvidas totalmente na água, são livres de óleo mineral em sua composição. Essas substâncias químicas são sais orgânicos e inorgânicos, aditivos de lubricidades, biocidas, inibidores de corrosão, etc. Possuem uma vida maior, por serem menos suscetíveis à formação e ação de bactérias.

Os óleos sintéticos possuem boas propriedades de refrigeração e lubrificação, em comparação com a emulsão, pesquisas mostram que realmente os fluidos sintéticos e semissintéticos aumentam a vida de ferramenta.

Óleos são usados em operações de usinagem em que as velocidades de corte são baixas. Como dito anteriormente, sua eficácia ocorrerá se for formado um filme do fluido entre as superfícies em contato ferramenta cavaco e peça. Podem ser integrais, minerais, vegetais ou sintéticos.

Para selecionar o fluido de corte deve-se considerar como principal fator o material da peça. Para materiais como alumínio, bronze, latão, cobre e magnésio deve ser utilizado óleos inativos sem enxofres, devido a combustão, ou

preferivelmente realizar a usinagem sem fluido de corte. Na usinagem de níquel e suas ligas é recomendado o uso de emulsões.

Na usinagem do aço carbono, qualquer tipo de fluido de corte pode ser utilizado. Para aço inoxidável austenítico é recomendável que se use o óleo do tipo EP. Estes são óleos com aditivos de extrema pressão e são compostos de enxofre, cloro ou fósforo, que reagem em altas temperaturas, formando na zona de contato sulfetos, cloretos ou fosfetos. Isto cria uma película protetora contra solda, na face da ferramenta minimizando a formação da aresta postiça de corte e reduzindo o empastamento do cavaco na ferramenta.

Para as ferramentas de aço-rápido é recomendável usar fluidos de corte com aditivos antiferruginosos eficientes, já o metal duro suporta qualquer tipo de fluido de corte.

Tratamento termoquímico pode ser entendido conforme definido pelo CIMM – Centro de Informações Metal Mecânica, como sendo:

Um conjunto de operações realizadas no estado sólido que compreendem modificações na composição química da superfície da peça, em condições de temperatura e meio adequados. Este tipo de tratamento consiste, além do aquecimento e posterior resfriamento, como nos tratamentos térmicos, em modificar também a composição química da camada superficial da peça. Entre os tratamentos termoquímicos, destacam-se: cementação, nitretação, carbonitretação, cianetação, boretação, nitruração e carbonitruração (CENTRO DE INFORMAÇÃO METAL MECÂNICA, 2015).

3. MATERIAIS E MÉTODOS

Este capítulo apresenta o método utilizado na pesquisa e os materiais utilizados na realização dos experimentos, assim como da sistemática utilizada para sua realização. A metodologia deste trabalho foi baseada no desenvolvimento experimental em chão de fábrica, procurando-se uma aproximação a maior possível das atividades diariamente utilizadas pela empresa.

3.1. Material Utilizado

O material usinado foi chapa laminada de Aço Carbono, especificação ASME SA 516 GR. 70, que corresponde a especificação SAE 1030. Este material com parâmetros adequados de usinagem apresenta cavacos tipo lasca durante a furação.

A Tabela 1 mostra a composição química do material.

A tabela 1 – Composição química do corpo de prova

Elemento	Especificado (%) pela norma SAE 1030	Verificado (%) Certificado do Fornecedor
C	0,30	0,23
Si	0,15 a 0,40	0,20
Mn	0,85 a 1,20	1,06
P	Max. 0,035	0,017
S	Max. 0,035	0,008

Os corpos de prova foram retirados da chapa laminada por meio do corte a plasma, utilizados nos ensaios e cedidos pela Empresa Müller. Conforme ilustra a Figura 19, as dimensões dos anéis foram: espessura de 100 mm, diâmetro interno de 420 mm e 710 de diâmetro externo. A Figura 19 também ilustra a distribuição dos furos realizados durante os testes.

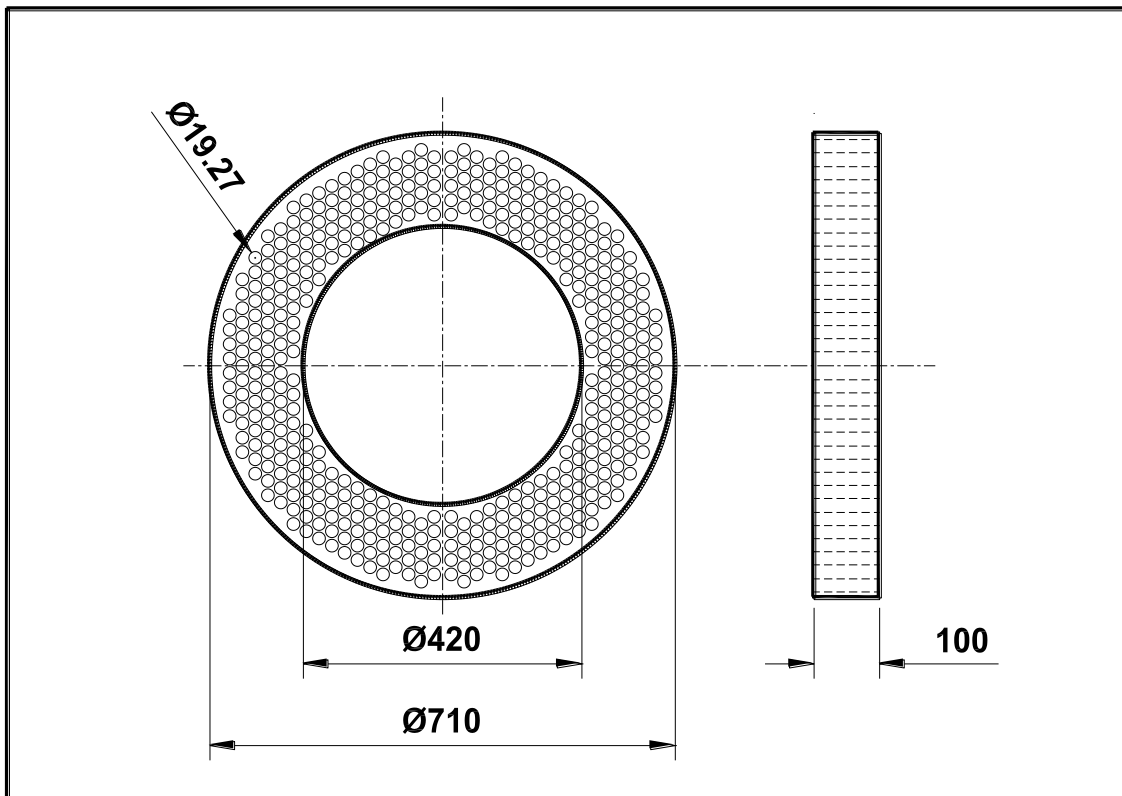


Figura 19 - Geometria do corpo de prova de aço utilizado nos ensaios

3.2. Máquina Ferramenta

O centro de usinagem utilizado para realização dos ensaios de furação foi um centro de usinagem CNC QUICKMILL modelo INTIMIDATOR / 2li mesa grande fixa com as seguintes características:

- 55 KW acionamento do fuso principal;
- correia de transmissão de alto torque, servo motor em ambos os eixos X e Y;
- suporte para ferramenta;
- rotações até 4000 rpm;
- eixo Z: 0,762 m;
- X e Y velocidade máxima de deslocamento: 15,24 m/min.;
- eixo Z velocidade máxima de deslocamento: 7,62 m/min.;
- fluido através dos sistemas de arrefecimento do eixo;

- 1,03 MPa, ou 6,89 MPa de pressão de refrigeração;
- programação utilizando códigos G & M;
- comando GE Fanuc 21i CNC;
- ar condicionado nos painéis elétricos.

Os ensaios foram feitos na própria empresa Müller utilizando a mesma máquina que a empresa emprega rotineiramente na produção das peças similares para seus clientes.

A Figura 20 ilustra uma vista da máquina CNC, bem como tem-se uma visão das operações de usinagem realizadas durante os ensaios. Os corpos de prova foram fixados sobre suportes amortecedores de vibração, e os furos de centro para guiar as brocas foram realizados na mesma preparação da máquina utilizada para os ensaios de furação.



Figura 20 - (a) vista da máquina CNC utilizada nos ensaios. (b) um momento genérico do processo de furação em desenvolvimento.

3.3. Sistema de Refrigeração

O sistema de refrigeração especialmente desenvolvido para Máquina CNC QUICKMILL encontra-se ilustrado na Figura 21. Foi utilizado nos ensaios o modelo CoolJet Alta Pressão UltraFlex Series: # 3025, com as seguintes características:

- pressão máxima de descarga **6,89 MPa**;
- vazão: **1,13 litros/s**;
- motor Potência 7,5 KW;
- unidade de alta tensão de três fases: 460 VAC;
- frequência: 50//60 Hz;
- consumo em plena carga: 18 Amps @ 460 VAC;
- nível de ruído (decibéis): .69 db;
- chicote elétrico, 7,6 m;
- descarga Montagem, Macho: 0,019 m (#12) JIC 37º;
- mangueira de descarga: 0,0127 m x 0,00304 m (por saída);
- mangueira de entrada: 1-1/2" NPT;
- quantidade de Filt.ro: 2;
- área do Filtro (Total): 3.5 m²;
- filtro de avaliação (padrão): 10-micron (nom.);
- medida: 1,21 m L x 0,64 m W x 1,5 m H;
- volume do Tanque: 265 litros;
- peso (a seco): 537 kg;
- máx. viscosidade: 500 SUS (110 cst).



Figura 21 - Sistema de refrigeração CoolJet Alta Pressão UltraFlex Series: # 3025.

3.4. Meio lubri-refrigerante

O fluido lubri-refrigerante utilizado nos testes a jorro foi o fluido de corte ECOCOOL MH6000 da marca FUCHS solúvel em água com concentração de 8% e isento de óleo mineral e com aditivos especiais que lhe conferem ação de lubrificação e ação anticorrosiva.

O fluido de corte ECOCOOL MH6000 apresenta as seguintes características físico-química:

- densidade a 20°C, g/ mm³: método ASTM D 1298 = 1.060;
- pH da emulsão a 2% em água: método MR 125 = 9,2;
- aspecto da emulsão a 2% em água: método MR 079 = límpido;
- concentração recomendada: >8% em água para usinagem severa;
- fator de refração: método MR 044 = 1,33;
- composição química: produto a base de amina terciária e primária, amida bórica, glicóis, benzotriazol e água.

O fluido de corte ECOCOOL MH6000 foi injetado pelo interior do suporte da ferramenta através de canais que combinam com os canais do inserto de metal duro. O suporte apresenta uma haste com comprimento sete vezes maior que o diâmetro do furo. Trata-se, portanto, de uma operação de usinagem de furação profunda.



Figura 22 - Óleo de corte ECOCOOL MH 6000.

3.5. Brocas

Os insertos utilizados são de metal duro classe ISO K15 e revestidos por PVD multicamadas à base de AlCr sobre o substrato de metal duro, com canais para refrigeração interna injetado pelo interior do suporte, conforme mostra a Figura 25.

O inserto de metal-duro apresentou composição química WC-6%Co, com tamanho do grão variando entre 1 e 2 μm .

Os insertos foram tratados por Deposição Física de Vapor (PVD) para formar revestimentos. O PVD é um tratamento em temperaturas relativamente baixas (400-600°C). O processo envolve a evaporação de um metal que reage, para formar uma cobertura dura na superfície da ferramenta de corte.

Os insertos foram produzidos pela Kennametal e de acordo com seu catálogo são classificados pelo código KSEM1927HPCM, KC7410. O código do suporte do inserto é WN\WD KSEM. A Figura 23 apresenta a geometria da ponta do inserto e a Figura 24 apresenta fotos do inserto em diversas posições. Não foram apresentadas as escalas porque são fotos ilustrativas da broca. O diâmetro da broca D1 é de 19,27 mm.

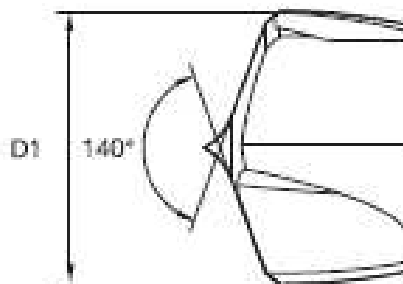


Figura 23 – Geometria da ponta do inserto



Figura 24 - (a) arestas de corte do inserto sobre a superfície de saída. (b) vista lateral do inserto e (c) vista da parte posterior do inserto por onde é fixado no suporte, diâmetro da broca é de 19,27mm.



Figura 25 – Suporte da ferramenta: (a) ilustração do suporte da ferramenta sem o inserto, (b) ilustração do furo na parte de trás do suporte que dá acesso ao parafuso que prende o inserto, (c) ilustração da ferramenta utilizada para fixação do inserto no suporte. Não foram apresentadas as escalas porque são fotos ilustrativas da broca. O diâmetro da broca é de 19,27 mm.

A Figura 26 mostra o conjunto montado do inserto sobre o suporte. Observa-se que ao executar o furo, o fluido de corte injetado pela parte posterior do suporte penetra no fundo do furo, atingindo esta região pela superfície de folga do inserto. Não foram apresentadas as escalas porque são fotos ilustrativas da broca. O diâmetro da broca é de 19,27 mm.



Figura 26 - Inserto montado no suporte, diâmetro da broca é de 19,27mm.

3.6. Parâmetros de corte utilizados

Os parâmetros de corte foram definidos com base na experiência da indústria, a qual vem realizando tais furações há bastante tempo. É relevante mencionar que diversos tipos de ferramentas foram testados até que foi possível decidir sobre a que faz parte desta pesquisa.

Os parâmetros de corte utilizados foram:

- velocidade de corte de 100m/min;
- velocidade de avanço de 410 mm/min;
- avanço por volta 0,25 mm/v;
- rotação de 1650 rpm;
- diâmetro da broca 19,27 mm;
- espessura da chapa de aço 100 mm;
- diâmetro externo da chapa 710 mm;
- diâmetro interno da chapa 420 mm;
- número de furos possíveis de serem usinados 300 furos, equivalente a 30 metros de comprimento de avanço usinado.

Com base na experiência da empresa foi adotado como critério de fim de vida 300 furos por broca equivalente a 30 metros de comprimento de avanço usinado. A comparação dos desgastes e seus mecanismos foi utilizada para verificar se a aplicação do PROTECTOR trouxe melhorias ou não.

3.7. Método

A sistemática empregada na realização dos ensaios foi sempre a mesma ao longo do trabalho. De maneira geral, a cada 75 furos usinados, era realizada a medição dos furos, por meio do paquímetro e feita a verificação da qualidade do acabamento superficial da parede dos mesmos através de um exame visual. Por meio do medidor do momento torsor instalado na máquina era realizada a avaliação dos esforços gerados na ferramenta, a fim de prever uma possível quebra da mesma.

Foram utilizados dez insertos cedidos pela Empresa Müller Metais Indústria e Comércio, os quais foram numerados de 1 a 10, do mesmo tipo utilizado pela empresa na furação de espelhos em aço carbono. Os insertos 2, 4, 6, 8 e 10 foram submetidos ao tratamento termoquímico com o PROTECTOR, enquanto que os insertos 1, 3, 5, 7 e 9 foram mantidos da mesma forma que os utilizados pela empresa.

A Figura 27 mostra a descrição detalhada do procedimento experimental para o desenvolvimento do trabalho, apresentando a estrutura da metodologia utilizada.

Para análise dimensional, foi utilizado o paquímetro para medição do diâmetro dos furos e a análise da qualidade superficial dos furos foi realizada pelo controle da qualidade da empresa, através de exame visual sem utilização de instrumentos.

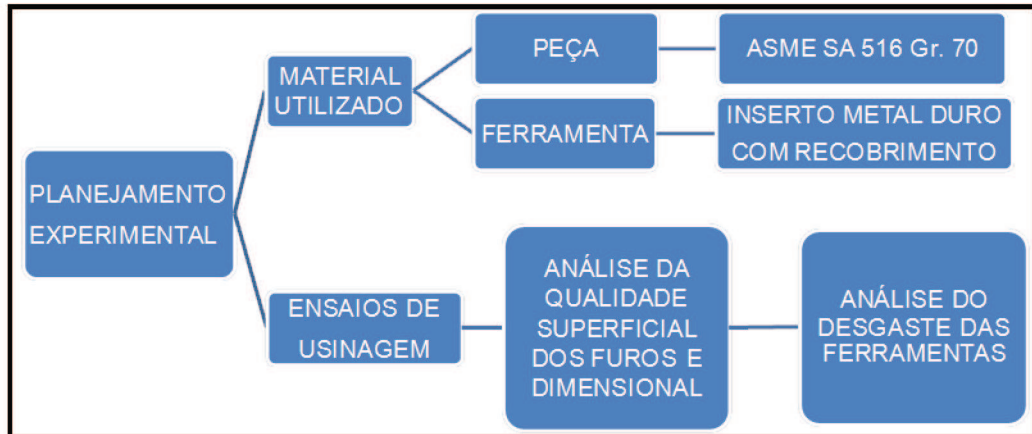


Figura 27 - Fluxograma para demonstração da metodologia utilizada.

As demais variáveis de entrada do processo foram mantidas constantes durante todo o experimento, o que tornou possível descartar a possível influência destes parâmetros nos resultados do experimento.

A fixação do corpo de prova foi feita com um dispositivo especial para garantir a rigidez do sistema e para evitar a movimentação do corpo de prova durante o ensaio. A Figura 28 mostra o dispositivo usado no ensaio.



Figura 28 - Dispositivo utilizado para fixação do corpo de prova.

3.8. Tratamento Termoquímico dos Insertos

Os insertos 2, 4, 6, 8 e 10 que foram tratados passaram pelos seguintes procedimentos:

- primeiramente foram mergulhados no PROTECTOR;
- em seguida foram deixados por duas horas para que escorresse o excesso do produto;
- foram então, tratados termicamente em uma estufa existente no laboratório de Materiais da UNITAU de marca FANEM ORION 515, a qual é mostrada na foto da Figura 29, aquecidos a 80°C por 30 minutos;
- finalmente foram deixados esfriar ao ar e ficaram prontos para serem utilizados nos testes de usinagem.

Para tratar termicamente os insertos depois de mergulhados no PROTECTOR, foram aquecidos a 80°C na estufa FANEM / ORION 515 do laboratório de materiais da UNITAU. A Figura 29 ilustra este equipamento.



Figura 29 - Vista da Estufa FANEM / ORION 515, utilizada no tratamento TERMOQUÍMICO dos insertos.

3.9. Equipamento para análise do desgaste da ferramenta e do cavaco

Para análise do desgaste da ferramenta foi utilizado o microscópio eletrônico de varredura (MEV), marca Hitachi, modelo TM 3000. Este equipamento permite a análise microscópica com aumento de até 30.000 vezes, com feixes de 5 e 15 keV. É pertencente ao laboratório móvel de Nanotecnologia da ESCOLA SENAI "MARIANO FERRAZ" e é utilizado para capturar imagens ampliadas das regiões de corte da ferramenta, possibilitando a visualização dos tipos de desgaste ocorridos na aresta de corte para análise e conclusões após realização dos experimentos. Neste equipamento foi feita a análise química dos materiais presentes na aresta da ferramenta utilizando o processo de Espectroscopia de Energia Dispersiva (EDS).



Figura 30 - Vista do microscópio eletrônico de varredura (MEV), marca Hitachi, modelo TM 3000, utilizado para análise do desgaste da ferramenta.

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo são discutidos os resultados obtidos para os ensaios detalhados no Capítulo 3. Conforme a apresentação dos resultados, foram avaliadas as respostas do material sob as condições de tratamento em que foi submetido.

Como o trabalho consistiu em comparar o efeito do tratamento termoquímico aplicado nos insertos de metal duro, a apresentação dos resultados e suas discussões foram sempre aos pares, ou seja, sempre as figuras procuraram mostrar os efeitos da usinagem dos insertos 2 e 3, respectivamente tratado e não tratado.

A Tabela 2 apresenta um quadro com os parâmetros de usinagem, e o número de furos executados com cada broca.

Tabela 2 - Parâmetros de usinagem utilizados em cada broca

Número do Inseto	Tratado	Número de furos possíveis de serem usinados	Observação
1	Não	38	Inseto quebrou
2	Sim	300	
3	Não	300	
4	Sim	38	Inseto quebrou
5	Não	70	Inseto quebrou
6	Sim	300	
7	Não	52	Inseto quebrou
8	Sim	300	
9	Não	300	
10	Sim	68	Inseto quebrou

O índice de quebra apresentado na Tabela 2 foi de 50%. Considerado muito alto. As quebras que ocorreram tanto com os insertos tratados quanto com aqueles não tratados foram decorrentes de fenômenos acidentais. Por se tratar de uma operação de furação profunda, a dificuldade de remoção do cavaco de dentro do furo é aumentada, principalmente quando a operação de furação começa a produzir cavacos em forma de fita, conforme ilustração da Figura 31.

Na produção normal da empresa, quando a operação de furação começava a produzir o cavaco em forma de fita, a operação era interrompida para troca da ferramenta, ou seja, antes de ocorrer a quebra da mesma, portanto a produção desse tipo de cavaco determinava o final da vida da ferramenta.

Nos ensaios realizados neste trabalho quando foram produzidos cavacos em forma de fita, o processo não foi interrompido porque o critério de vida visava medir os desgastes após a realização de 300 furos. Esta é uma possível hipótese considerada para o número de quebras tão elevado.



Figura 31 – Cavaco do tipo fita produzido nos ensaios pelas ferramentas que quebraram (sem escala).

4.1. Caracterização da aresta de corte e superfície de folga dos insertos

A primeira avaliação realizada para analisar a microestrutura e composição química do inserto 2 (tratado com PROTECTOR) e do inserto 3 (não tratado), com a microscopia (MEV) e a composição química (revelada por EDS).

O intuito dessa análise foi mostrar que há uma diferença entre a superfície de folga e aresta de corte do inserto 2 (tratado) e do inserto 3 (não tratado) e indicar quais são os elementos mais importantes revelados nas superfícies indicadas.

A Figura 32 mostra a imagem obtida pelo MEV da superfície de folga e da aresta de corte do inserto 2 (tratado com PROTECTOR). Observa-se que o desgaste é coerentemente maior na periferia da broca.

Na Figura 32 é possível observar também a presença de uma região mais escurecida relativamente próxima da aresta de corte da ferramenta. Novas imagens mais adiante, neste trabalho, foram realizadas para revelar o significado destas regiões.

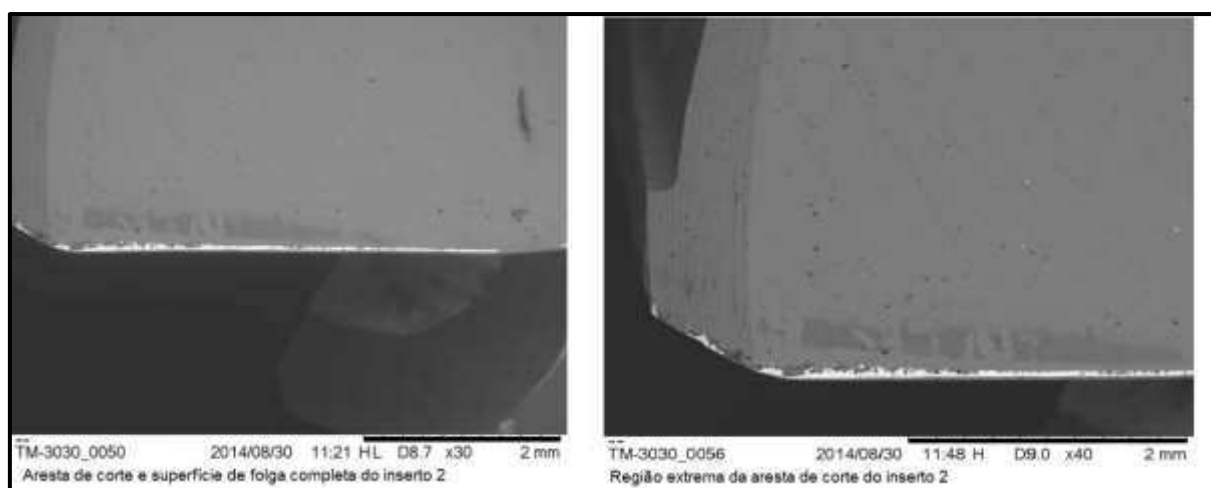


Figura 32 - Vista completa da superfície de folga e da aresta de corte do inserto 2 (tratado com PROTECTOR) e a região extrema da aresta de corte, mostrando que o desgaste nesta região é maior.

A Figura 33 mostra a imagem da superfície de folga do inserto 2 (tratado com PROTECTOR) e do inserto 3 (não tratado), obtidas pelo MEV. Observa-se a aderência de material da peça em ambos os insertos e no inserto 3 a presença da aresta postiça. Em nenhum dos insertos tratados ocorreu a formação da aresta postiça de corte. Em pelo menos um dos insertos não tratados, observou-se a formação deste fenômeno.

Esta é uma observação importante porque, imediatamente já revela uma das vantagens do tratamento termoquímico.

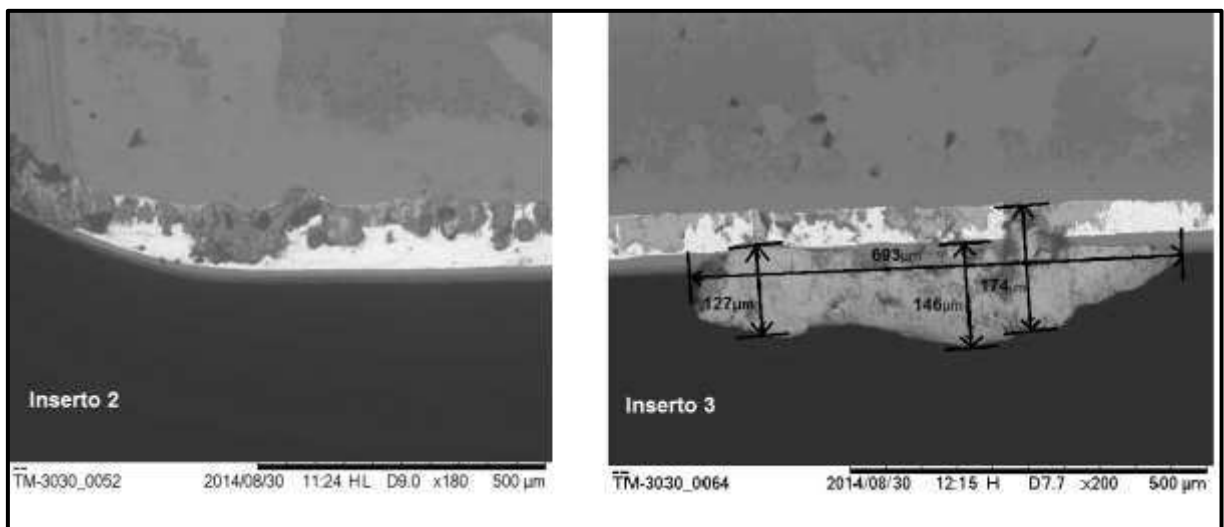


Figura 33 - Observação do fenômeno de aderência na posição extrema da aresta de corte do inserto 2 (tratado com PROTECTOR) e Aresta postiça de corte formada sobre a superfície de saída do inserto 3 (não tratado).

A Figura 34 mostra a imagem da superfície de folga e da aresta de corte do inserto 2 e do inserto 3.

Para facilitar a discussão dos resultados mostrados na Figura 34, foi elaborada a Tabela 3. O método de comparação foi baseado na composição química do substrato e do recobrimento dos insertos, na composição química do material do corpo de prova e na composição química do fluido de corte.

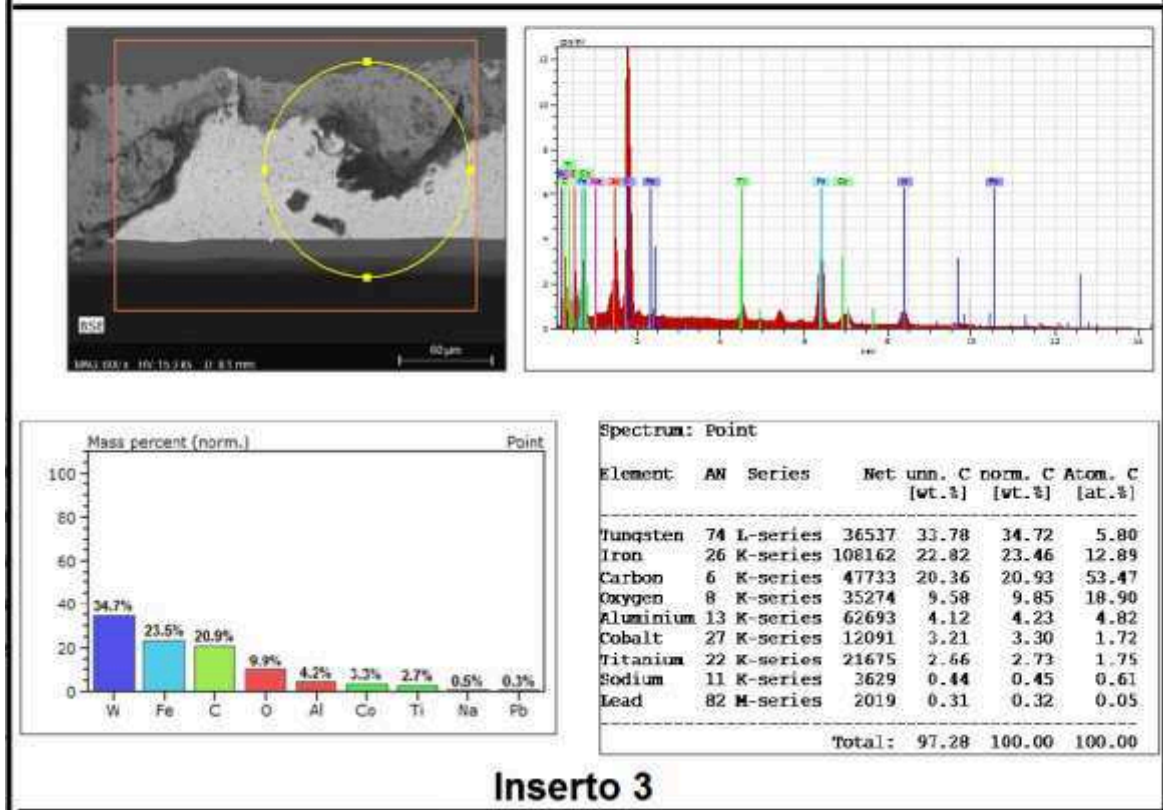
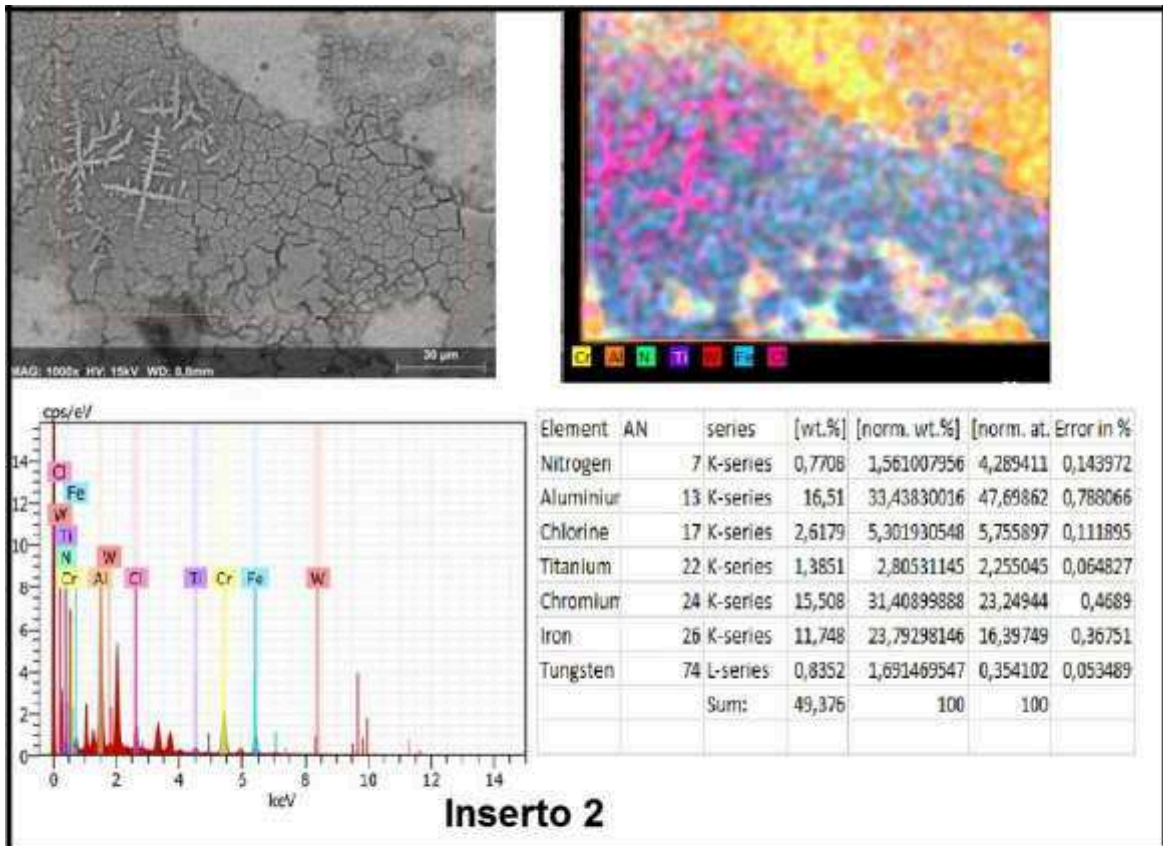


Figura 34 - Aresta do Inserto 2, mostrando que as dendritas são de Cloro e o Mapeamento dos elementos químicos presentes na aresta do inserto 3.

Tabela 3 - Análise comparativa dos elementos químicos encontrado na superfície de folga e aresta de corte do Inserto 2 e do inserto 3

Elemento Químico	(wt. %) Inserto 2	(wt. %) Inserto 3	Análise Comparativa dos elementos químicos encontrado após os ensaios
Al	16,51	4,120	A % encontrada no inserto 2 foi 4 vezes maior do que a encontrada no inserto 3. Isto mostra que o inserto 3 perdeu maior parte do recobrimento de AlCr durante a usinagem
Cr	15,5	0	Não foi encontrado Cromo no inserto 3, elemento do recobrimento foi totalmente removido durante os ensaios. Pode-se atribuir este fato à proteção mais efetiva do PROTECTOR para o caso do inserto 2
W	0,87	33,7	A % encontrada no inserto 3 foi muito superior do que a encontrada no inserto 2. Mostra que o desgaste durante os ensaios atingiu a camada do substrato composta por tungstênio.
Ti	1,38	2,66	A % encontrada no inserto 3 foi 2 vezes mais do que a encontrada no inserto 2. Mostra que o desgaste durante os ensaios atingiu a camada do substrato composta por titânio.
Fe	11,74	22,82	A % encontrada no inserto 3 foi 2 vezes maior do que a encontrada no inserto 2. Mostra que ocorreu, com maior intensidade, o fenômeno de aderência do Fe proveniente do corpo de prova, provavelmente devido à participação do PROTECTOR.
C	0	20,36	O Carbono encontrado no inserto 3, deve ter sido proveniente do fluido de corte.
Cl	2,61	0	O Cloro foi encontrado somente no inserto 2. Deve ter sido proveniente do PROTECTOR, por ser esta a única explicação. A formação das dendritas de Cloro ainda depende de aprofundamento da pesquisa bibliográfica. Até o momento nenhuma referência sobre o assunto foi encontrada

A Figura 35 apresenta imagens típicas da superfície de folga e da aresta de corte do inserto 2 e do inserto 3.

As regiões brancas em ambas as figuras revelam o desgaste de flanco VB. As regiões acinzentadas revelam a presença de aderências, tipicamente com maior intensidade no inserto 3 (não tratado) e as regiões escuras são provenientes de impurezas do ambiente. A região próxima da aresta de corte revela o desgaste incidente no raio de arredondamento da aresta de corte. A menor dimensão do desgaste no raio de arredondamento da aresta de corte do inserto 3 é uma indicação de que o mesmo foi mais intenso e avançou mais sobre esta região.

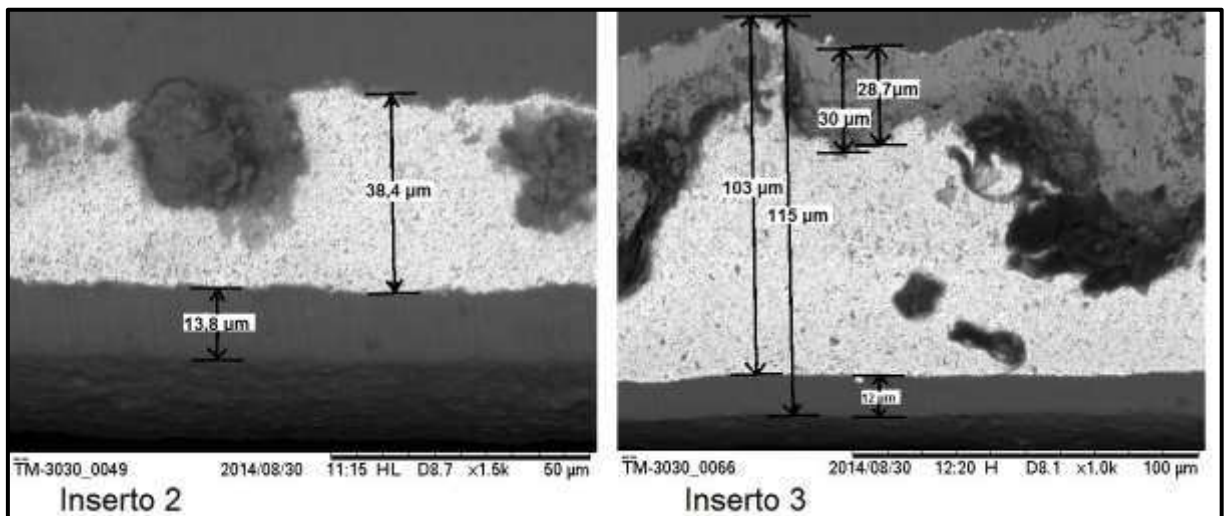


Figura 35 - Dimensões do desgaste da superfície de folga: 38,4μm expondo o metal duro 13,8μm expondo o desgaste do recobrimento no arredondamento da aresta de corte do inserto 2. Medida dos desgastes na superfície de folga do inserto 3: 103μm sendo o valor de 12μm referente ao desgaste sobre o arredondamento da aresta de corte.

A Tabela 4 mostra uma análise comparativa entre o desgaste do flanco VB máx. no inserto 2 e 3.

Tabela 4 - Análise do desgaste de flanco VB máx. do Inserto 2 (tratado com PROTECTOR) e o inserto 3 (NÃO TRATADO)

	Inserto 2	Inserto 3	Análise Comparativa
VB máx.	38,4 μ m	103 μ m	O maior valor do desgaste medido no inserto 3 revela que o tratamento termoquímico agiu protegendo superfície de folga da ferramenta.

4.2. Caracterização da superfície de saída dos insertos

A avaliação realizada para a superfície de saída apresentada a seguir, foi semelhante à realizada para a superfície de folga.

O intuito dessa análise foi mostrar que há uma diferença entre a superfície de saída do inserto 2 e do inserto 3 e indicar quais são os elementos mais importantes revelados nas superfícies indicadas.

A Figura 36 apresenta ensaios de EDS em duas regiões diferentes do inserto 2 com a finalidade de identificar e explicar a presença dos elementos químicos encontrados.

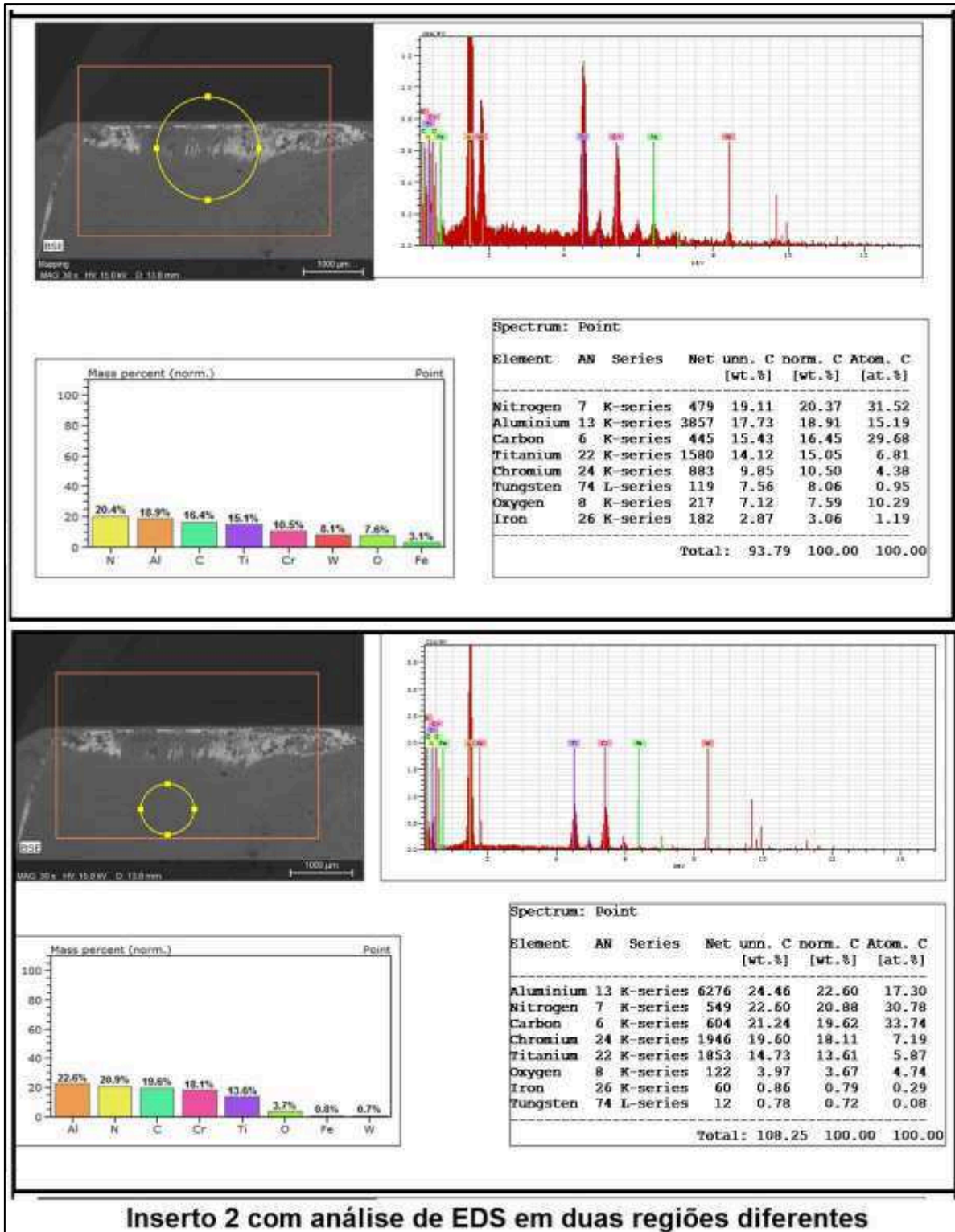


Figura 36 - Mapeamento dos elementos químicos presentes sobre a superfície de saída da aresta do inserto 2 em duas regiões diferentes.

A Tabela 5 mostra uma análise comparativa entre os elementos químicos da Figura 36 comparando sempre a figura superior com a inferior. Na verdade, deve ser observado que a variação percentual é relativa, ou seja, quando cresce ou decresce o percentual de um determinado elemento químico, os demais sofrem esta influência quantitativa. O método de comparação foi baseado na composição química do substrato e recobrimento dos insertos, na composição química do material do corpo de prova e na composição química do fluido de corte.

Tabela 5 - Análise comparativa dos elementos químicos encontrado na superfície de saída em duas regiões diferentes do inserto 2 (tratado com PROTECTOR)

Elemento Químico	(wt. %) Região superior	(wt. %) Região inferior	Análise Comparativa
Al	17,7	24,4	A região sem desgastes mostra a presença de maior quantidade de Alumínio. A região desgastada revela que parte do Alumínio foi consumida.
Cr	9,85	19,6	No caso do Cromo a explicação é a mesma que para o Alumínio.
W	7,56	0,78	A presença do Tungstênio nas proporções encontradas é coerente, pois ele faz parte do substrato sobre o qual está aplicado o recobrimento de AlCr.
Ti	14,2	14,7	A presença do Titânio nas proporções encontradas deveria estar presente de forma semelhante ao Tungstênio, ou seja em menor percentual.
Fe	2,87	0,86	A presença do Ferro nas proporções encontradas está de acordo com o esperado. A região mais afastada da aresta de corte apresentou um percentual muito menor deste elemento.
C	15,4	21,4	O Carbono encontrado nas duas regiões, deve ter sido proveniente do fluido de corte.

Observa-se ainda na Figura 36 tanto superior como inferior, a presença dos seguintes elementos químicos cuja explicação não é simples. São eles o Nitrogênio, o Titânio e o Oxigênio. O par Nitrogênio/Titânio e o par Oxigênio/Cromo apresentam uma relação química e, portanto, podem ser apenas induções entre eles que aparece na análise de EDS. Estas relações são mostradas na Tabela Periódica dos <http://www.xenometrix.com/images/Brochures/Periodic_table.pdf> Acesso em: 08 dezembro 2014). O Oxigênio pode ser proveniente da oxidação do Ferro aderente à superfície da Ferramenta. O Titânio não teria motivo para aparecer nesta figura e, portanto, deve ser entendido como Nitrogênio. O Carbono pode ter sido proveniente do fluido de corte.

A Figura 37 mostra a imagem obtida pelo MEV na superfície de saída do Inserto 2 e do Inserto 3. Em ambos os casos, observa-se uma região da mesma coloração da região do inserto não afetada pelo desgaste. Este aspecto será discutido mais à frente.

A Tabela 6 mostra uma análise comparativa entre a largura do desgaste de cratera CL dos Insertos 2 e 3.

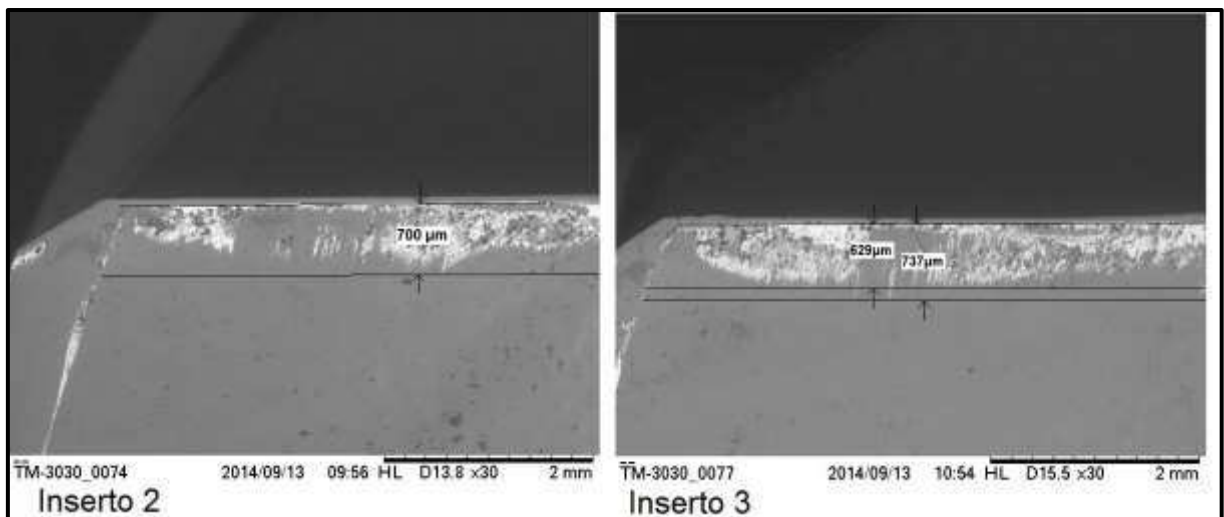


Figura 37 - Medida da largura do desgaste de cratera (CL) na superfície de saída do inserto 2 (tratado com PROTECTOR) e medida do desgaste da superfície de saída CL do inserto 3 (não tratado).

Tabela 6 - Análise do desgaste CL na superfície de saída do Inserto 2 (tratado com PROTECTOR) e o inserto 3 (NÃO TRATADO)

	Inserto 2 (Tratado com PROTECTOR)	Inserto 3 (Não tratado)	Análise Comparativa do desgaste CL dos insertos após os ensaios
Largura de Cratera CL	700 μ m	737 μ m	A medida CL do Inserto 2 foi ligeiramente menor que o do Inserto 3.

A proximidade dos valores dos desgastes de cratera, apesar de mostrar um pequeno efeito positivo da aplicação do tratamento termoquímico, mostra que a ação do cavaco sobre a superfície de saída foi muito mais agressiva do que aquela que ocorreu com a superfície de folga.

A Figura 38 mostra a distribuição dos elementos químicos na superfície de saída do Inserto 3.

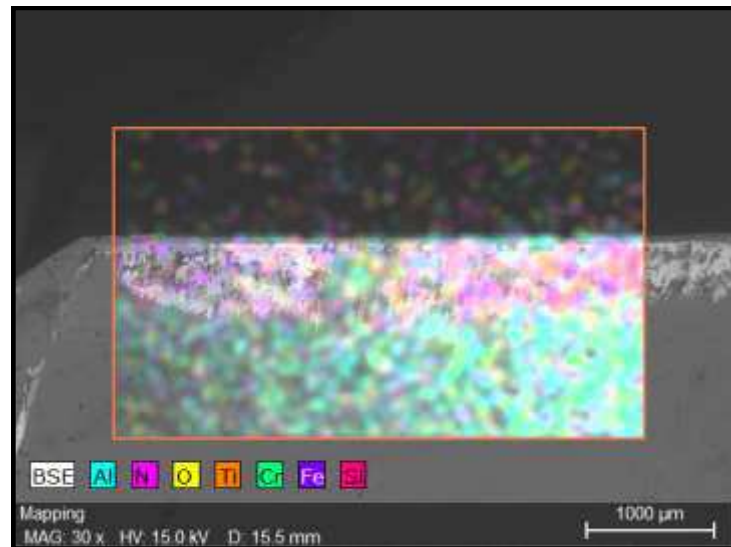


Figura 38 - Distribuição dos elementos químicos na superfície de saída do inserto 3.

Conforme mencionado anteriormente e pela comparação entre a Figura 37 e a Figura 38, observa-se que a citada região de mesma coloração da região do inserto não afetada pelo desgaste, apresenta a presença de Cromo e Alumínio. É possível que esta região tenha sido protegida por aderência instável do material da peça. Uma hipótese é que esta seria a região de possível desaparecimento da aresta postiça de corte. A velocidade de corte no diâmetro extremo da broca é de 100 m/min. Observa-se, pelo mostrado na Figura 38 que o diâmetro no qual se situa a região em análise, é menor e que, portanto, a velocidade de corte deve ser da ordem de 70 m/min. Este é próximo do valor que a aresta postiça de corte estaria instabilizada e desaparecendo intermitentemente e, assim, protegendo a superfície do inserto.

4.3. Caracterização do cavaco

A mesma avaliação foi realizada para analisar a composição química do cavaco resultante da usinagem do corpo de prova, com a microscopia (MEV) e a composição química (revelada por EDS).

O intuito dessa análise foi indicar quais são os elementos químicos presentes no cavaco.

A Figura 39 mostra a distribuição dos elementos químicos. Observa-se nesta figura que ocorre o esperado, ou seja, os elementos químicos presentes no aço utilizado como corpo de prova são compostos por Ferro e Carbono. A presença do Oxigênio é devido ao fenômeno de oxidação, ocorrido no intervalo de tempo entre a formação do cavaco e a análise EDS.

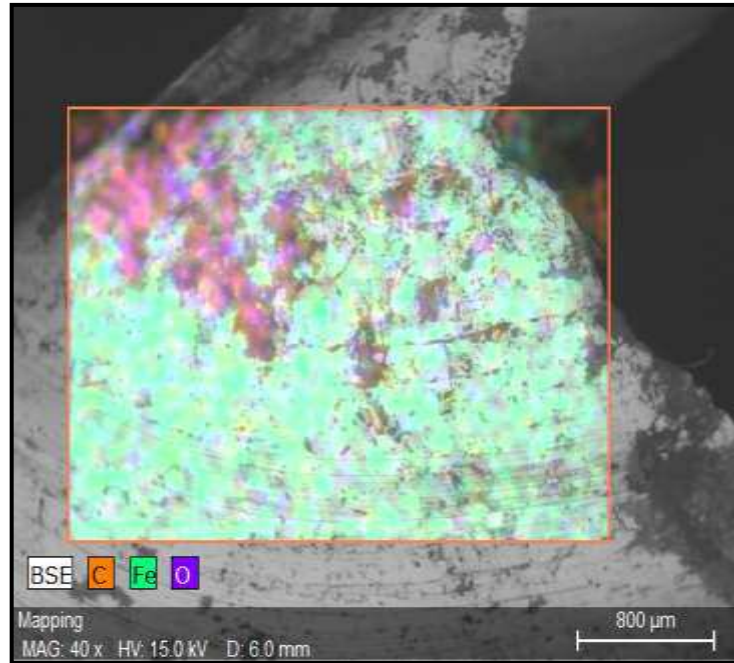


Figura 39 - Distribuição dos elementos químicos no cavaco

A Figura 40 quantifica os percentuais dos elementos químicos presentes no aço utilizado como corpos de prova.

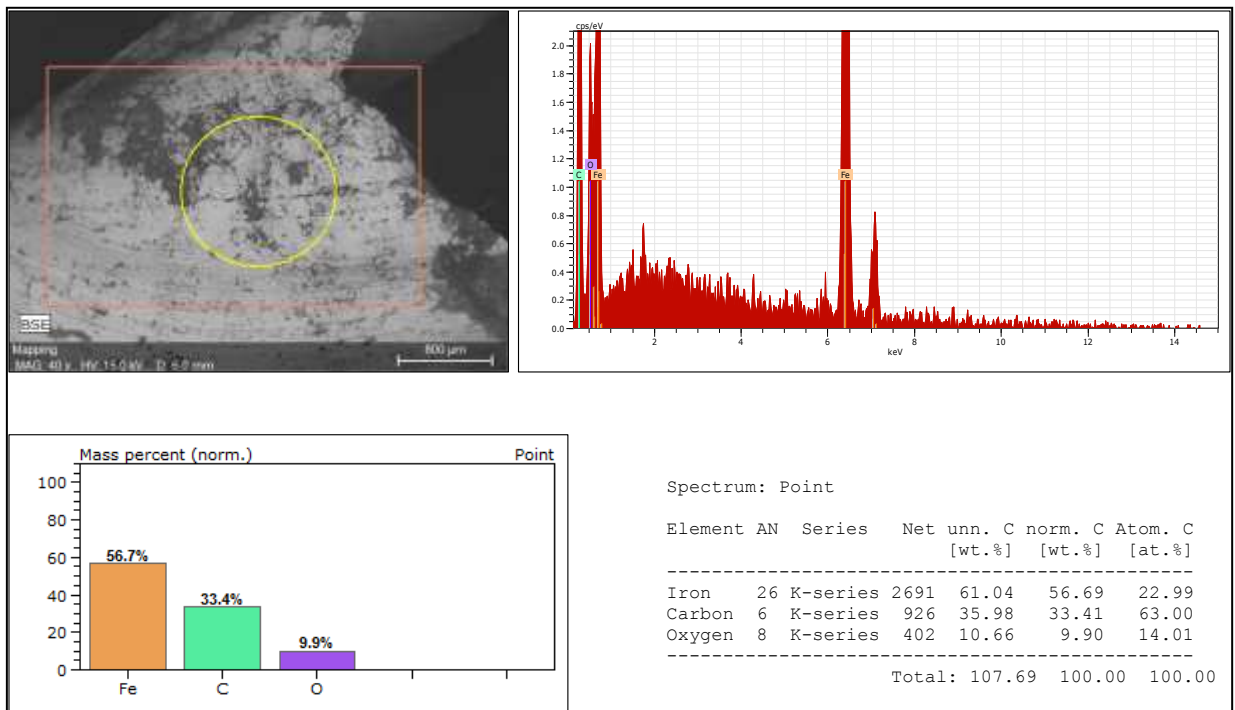


Figura 40 - Mapeamento dos elementos químicos do cavaco resultante da usinagem.

5. CONCLUSÕES

Este trabalho apresenta as seguintes conclusões:

- o tratamento termoquímico de insertos de metal duro com o PROTECTOR realmente apresenta proteção à aresta de corte e à superfície de folga da ferramenta, reduzindo o mecanismo de aderência do material do corpo de prova, da mesma forma, aparentemente evita a formação de aresta postiça de corte;
- o tratamento da ferramenta com o PROTECTOR protegeu a superfície de saída, reduziu a aderência do material do corpo de prova, da mesma forma, aparentemente evita a formação de aresta postiça de corte;
- o tratamento com o PROTECTOR reduziu a remoção do recobrimento da ferramenta. Portanto reduziu o desgaste da ferramenta, o que representa uma redução no custo do processo e uma melhoria da produtividade;
- uma hipótese a ser melhor avaliada é que o tratamento termoquímico com o PROTECTOR resulta em uma alteração da resistência da ferramenta, pelo menos no início da usinagem;
- o procedimento de aplicação do PROTECTOR é extremamente simples e possível de ser realizado sem necessidade de equipamentos sofisticados e caros.

5.1. Sugestões para trabalhos futuros

- aplicar o tratamento termo químico com PROTECTOR em furação de outros tipos de aços e ou materiais;
- aprofundar as pesquisas para melhor explicar o que ocorre com a superfície das ferramentas tratadas termo quimicamente com o PROTECTOR;
- aplicar o tratamento para outros materiais de ferramentas;
- pesquisar o que realmente ocorre com o tratamento termoquímico com PROTECTOR no início da usinagem e no desenrolar do processo, para verificar a extensão temporal de sua ação.

REFERÊNCIAS

BORDIN, F. M.; NABINGER, E.; ZEILMANN, R. P. **Relação entre o Desgaste e a Força de Avanço na Determinação do Fim de Vida Efetivo de uma Broca Helicoidal**. 6º COBEF, Caxias do Sul. 2011.

BORDINASSI, C. E.; ALMEIDA, C. O. C. F.; STIPKOVIC M. F.; BATALHA, G. F. **Investigação Sobre o Processo de Furação**, 2004. Estudo - Universidade Estadual de São Paulo, São Paulo. 2004.

CARDOSO, M. J. **Análise do Processo de Furação Profunda no Aço SAE 4144M Endurecido Utilizando MQL e Broca Helicoidal Revestida**, 2014. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica e de Materiais) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba. 2014.

CASTILLO, W J. G. **Furação Profunda de Ferro Fundido Cinzento GG25 com Brocas de Metal Duro com Canais Retos**, 2005. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis. 2005.

CENTRO DE INFORMAÇÃO METAL MECÂNICA. CIMM **O que é Tratamentos Termoquímicos**. Disponível em: <http://www.cimm.com.br/portal/verbetes/exibir/563-tratamentos-termoquimicos>. Acesso em: 19 fev. 2015.

DINIZ, A.; MARCONDES, F.; COPPINI, N. L. **Tecnologia da Usinagem dos Materiais**. 9. ed., São Paulo: Artliber Editora LTDA., 2014.

DOS SANTOS, E. M.; KIECKOW, F.; CASARIN, J. J. **Avaliação do Desgaste de Brocas Helicoidais de Aço-Rápido Modificadas Superficialmente por Nitretação a Plasma**. Vivências. Vol.9, N.16: p. 68-76, 2013.

FORTUNATO, F. A. P. S. **Medição do Desgaste de Brocas Helicoidais de Aço Rápido Por Meio do Uso de um Dispositivo a LASER**, 2012. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção) – Diretoria de Ciências Exatas, Universidade Nove de Julho, São Paulo. 2012.

MORENO, D. A. N.; SCHROETER, R. B.; BÜTTNER, H.; BOING, D. **Análise das Características do Cavaco na Região do Gume Transversal para Diferentes Condições de Usinagem e Geometrias de Brocas**. 7º COBEF, Itatiaia. 2013.

NAVES, V. T. G. **Usinagem do Aço inoxidável ABNT 136 UF com a Aplicação de Fluido de Corte a Alta Pressão**, 2013. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) - Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia. 2013.

RIGO, J. A.; MARCHIORI, M. M.; SOUZA, A. J. **Aperfeiçoamento de Operações de Furação e Roscamento na Fabricação de Peças em Centro de Usinagem: Um Estudo de Caso**. VII CONEM, São Luiz. 2012.

ROST, B.; SILVA, L. F.; KIECKOW, F. **Avaliação do Desempenho de Brocas Helicoidais de Aço Rápido AISI M2 em Diferentes Parâmetros de Nitretação a Plasma**. VI CONEM, Campina Grande. 2010.

SARATT, B. F.; PONTEL, R. C.; BLÖDORN, R.; SCHROETER, R. B. **Análise da Raiz de Cavaco no Âmbito do Gume Transversal de Brocas Helicoidais Visando a Modelagem de Forças**. VI CONEM, Campina Grande. 2010.

SHARMA V. S.; DOGRA M.; SURI N. M. **Cooling Techniques for Improved Productivity in Turning**, 2009. International Journal of Machine Tools & Manufacture, 435–453.

SILVA L. R.; COELHO R. T.; CATAI R. E. **Desgastes de Ferramentas no Torneamento com Alta Velocidade de Corte da Superliga “wapaloy”**, 2004. Metalurgia e Materiais, 109-114.

WOSNIAK, F. A.; POLLI M. L.; BELTRÃO, P. A. C. **Influência dos Parâmetros de Corte na Furação Profunda do Aço SAE 4144.** 5º COBEF, Belo Horizonte. 2009.

ZEILMANN, R. P.; NICOLA, G. L.; VIDOR, M.; BORDIN, F. M.; VACARO, T. **Análise do Desgaste em Ferramentas de Metal-Duro na Furação do Aço AISI P20.** 6º COBEF, Caxias do Sul. 2011.

ZEILMANN, R. P.; VACARO, T.; SOARES, R. M.; TEIXEIRA, C. R.; HEILER, R. **Estudo da Formação de Cavaco na Furação a Seco do Aço AISI P20 Endurecido.** 6º COBEF, Caxias do Sul. 2011.