

CENTRO FEDERAL DE EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA DE MINAS GERAIS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE MATERIAIS
CURSO DE ENGENHARIA DE MATERIAIS

ARTHUR HERMSDORFF CEZAR

**MECANISMOS DE DESGASTE DE FERRAMENTAS NO TORNEAMENTO COM
ALTA VELOCIDADE DE CORTE NA LIGA Ti-6Al-4V**

BELO HORIZONTE

2015

ARTHUR HERMSDORFF CEZAR

MECANISMOS DE DESGASTE DE FERRAMENTAS NO TORNEAMENTO COM ALTA
VELOCIDADE DE CORTE NA LIGA Ti-6Al-4V

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado no Curso de Graduação em Engenharia de Materiais do Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais como requisito parcial para obtenção do título de Bacharel em Engenharia de Materiais.

Orientador: Prof. Leonardo Roberto da Silva

BELO HORIZONTE

2015

ARTHUR HERMSDORFF CEZAR

**MECANISMOS DE DESGASTE DE FERRAMENTAS NO TORNEAMENTO COM
ALTA VELOCIDADE DE CORTE NA LIGA Ti-6Al-4V**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado no Curso de Graduação em Engenharia de Materiais do Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais como requisito parcial para obtenção do título de Bacharel em Engenharia de Materiais.

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Leonardo Roberto da Silva – Orientador

Prof. Dr. Wellington Lopes

Prof.^a Dr.^a Elaine Carballo Siqueira Corrêa

Dedico este trabalho a Deus e à toda a minha família, que sempre estiveram ao meu lado.

AGRADECIMENTOS

A Deus, pois Ele é o meu pastor e sempre me guia durante as tribulações.

À toda a minha família, por estar sempre ao meu lado.

Ao professor Leonardo, pela constante ajuda durante a realização do trabalho.

Ao mestrando Odilon, pelo amparo e colaboração.

Aos colegas Francisco e Matheus, pelo apoio na realização dos ensaios.

Ao DEMAT/CEFET-MG, por disponibilizar os equipamentos e laboratórios utilizados no decorrer da pesquisa.

“A tarefa não é tanto ver aquilo que ninguém viu, mas pensar o que ninguém ainda pensou sobre aquilo que todo mundo vê.”

(ARTHUR SCHOPENHAUER)

RESUMO

A usinagem com altas velocidades (High Speed Machining - HSM) tem sido cada vez mais importante, já que a usinagem influencia bastante no custo final das peças mecânicas. Conseqüentemente, têm sido mais valorizados a elaboração e o fornecimento de tecnologias para altas velocidades de avanço e de rotações. O objetivo deste trabalho foi analisar os mecanismos de desgaste de ferramentas de corte de PCD (diamante sintético policristalino) e metal duro no tornamento com alta velocidade de corte na liga Ti-6Al-4V, nas condições de lubri-refrigeração por jorro e a seco. Para isto, primeiramente utilizou-se um microscópio ferramenteiro para medir o desgaste de flanco máximo ($VB_{Bmáx}$) das ferramentas e em seguida, imagens dessas ferramentas foram obtidas através do Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV) para identificação dos mecanismos de desgaste. Os resultados obtidos mostraram que as condições de lubri-refrigeração influenciaram de maneira considerável as variáveis analisadas. Além disso, o desgaste de flanco foi o principal tipo de desgaste atuante, sendo predominante no insertos os mecanismos de desgaste de abrasão, de adesão e *attrition* (aderência e arrastamento), destacando que o desgaste adesivo ocorreu em todas as ferramentas de corte. Concluiu-se também que a velocidade de corte e o avanço influenciaram significativamente o comportamento do desgaste.

Palavras-chave: Liga Ti-6Al-4V. Fluido de corte. Torneamento com alta velocidade de corte. Ferramentas de corte. Mecanismos de desgaste.

ABSTRACT

The High Speed Machining have been increasingly important, since the machining influences a lot on the final cost of mechanical parts. Therefore, the development and supply of technologies for very high feed rates and cutting speeds have been more valued. This work aimed to analyze the wear mechanisms of PCD (polycrystalline diamond) and carbide cutting tools in the high speed turning of Ti-6Al-4V alloy, using cutting fluids or not. To do this, firstly a toolmaker microscope was used to measure the tools maximum flank wear ($VB_{B_{\max}}$) and then images of these tools were obtained by Scanning Electron Microscope (SEM) in order to identify the wear mechanisms. The results showed that the conditions of cooling-lubrication influenced considerably on the analyzed variables. Furthermore, the flank wear was the main active wear and the predominant wear mechanisms on the inserts were abrasion, adhesion and attrition, as the adhesive wear occurred in all of the cutting tools. It was also concluded that the cutting speed and the feed rate significantly influenced on the wear behavior.

Keywords: Ti-6Al-4V alloy. Cutting fluids. High speed turning. Cutting tools. Wear mechanisms.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Classificação dos processos de fabricação	17
Figura 2 – Torneamento cilíndrico	18
Figura 3 – Torneamento cônico	18
Figura 4 – Torneamento radial	19
Figura 5 – Torneamento curvilíneo	19
Figura 6 – Parâmetros de corte e superfície em um torneamento cilíndrico externo	21
Figura 7 – Cunha de corte da ferramenta	22
Figura 8 – Elementos da cunha de corte de uma ferramenta de tornear	23
Figura 9 – Esquema ilustrativo do processo de metalurgia do pó para obtenção dos metais duros	25
Figura 10 – Fatores que influenciam o processo HSM	28
Figura 11 – Faixas de velocidade de corte para operações HSM	28
Figura 12 – Formação de sulcos distribuídos em forma de pente	33
Figura 13 – Desgaste de flanco	33
Figura 14 – Desgaste de cratera	34
Figura 15 – Desgaste de entalhe	34
Figura 16 – Diagrama dos mecanismos de desgaste das ferramentas de corte em função da temperatura	35
Figura 17 – Mecanismos de desgaste que ocorrem nas ferramentas de corte	37
Figura 18 – Sequência de usinagem dos corpos de prova	41
Figura 19 – Torno Romi CNC Centur 30D utilizado nos testes	41
Figura 20 – Dimensões do Porta ferramenta externo	42
Figura 21 – Inserto intercambiável de PCD utilizado nos testes	42
Figura 22 – Inserto intercambiável de metal duro utilizado nos testes	43
Figura 23 – Refratômetro portátil ATAGO	43
Figura 24 – Microscópio Ferramenteiro utilizado para a medição do desgaste de flanco	44
Figura 25 – Microscópio Eletrônico de Varredura utilizado na análise dos mecanismos de desgaste	45
Figura 26 – Desgaste da ferramenta (VBB) em função do comprimento de corte na condição a seco utilizando avanço de 0,10 mm/rot.	47

Figura 27 – Desgaste da ferramenta (VBB) em função do comprimento de corte na condição a seco utilizando avanço de 0,05 mm/rot.	48
Figura 28 – Desgaste da ferramenta (VBB) em função do comprimento de corte na condição com jorro utilizando avanço de 0,10 mm/rot.	50
Figura 29 – Desgaste da ferramenta (VBB) em função do comprimento de corte na condição com jorro utilizando avanço de 0,05 mm/rot.	51
Figura 30 – Aspectos do desgaste da ferramenta de metal duro H13A, a seco, na condição 60 m/min. e 0,10 mm/rot.	51
Figura 31 – Aspectos do desgaste da ferramenta de metal duro H13A, a seco, na condição 60 m/min. e 0,05 mm/rot.	52
Figura 32 – Aspectos do desgaste da ferramenta de metal duro H13A, a seco, na condição 120 m/min. e 0,10 mm/rot.	53
Figura 33 – Aspectos do desgaste da ferramenta de metal duro H13A, a seco, na condição 120 m/min. e 0,05 mm/rot.	53
Figura 34 – Aspectos do desgaste da ferramenta de metal duro H13A, a seco, na condição 180 m/min. e 0,10 mm/rot.	54
Figura 35 – Aspectos do desgaste da ferramenta de metal duro H13A, a seco, na condição 180 m/min. e 0,05 mm/rot.	54
Figura 36 – Aspectos do desgaste da ferramenta de metal duro H13A, a seco, na condição 240 m/min. e 0,10 mm/rot.	55
Figura 37 – Aspectos do desgaste da ferramenta de metal duro H13A, a seco, na condição 240 m/min. e 0,05 mm/rot.	55
Figura 38 – Aspectos do desgaste da ferramenta de PCD CD10, a seco, na condição 240 m/min. e 0,05 mm/rot.	56
Figura 39 – Aspectos do desgaste da ferramenta de metal duro H13A, com jorro, na condição 60 m/min. e 0,10 mm/rot.	56
Figura 40 – Aspectos do desgaste da ferramenta de metal duro H13A, com jorro, na condição 60 m/min. e 0,05 mm/rot.	57
Figura 41 – Aspectos do desgaste da ferramenta de metal duro H13A, com jorro na condição 120 m/min. e 0,10 mm/rot.	57
Figura 42 – Aspectos do desgaste da ferramenta de metal duro H13A, com jorro, na condição 120 m/min. e 0,05 mm/rot.	58

Figura 43 – Aspectos do desgaste da ferramenta de metal duro H13A, com jorro, na condição 180 m/min. e 0,10 mm/rot.	58
Figura 44 – Aspectos do desgaste da ferramenta de metal duro H13A, com jorro, na condição 180 m/min. e 0,05 mm/rot.	59
Figura 45 – Aspectos do desgaste da ferramenta de metal duro H13A, com jorro, na condição 240 m/min. e 0,10 mm/rot.	59
Figura 46 – Aspectos do desgaste da ferramenta de metal duro H13A, com jorro, na condição 240 m/min. e 0,05 mm/rot.	60
Figura 47 – Aspectos do desgaste da ferramenta de PCD-CD10, com jorro, na condição 240 m/min. e 0,05 mm/rot.	60
Figura 48 – Aspectos do desgaste da ferramenta de PCD-CD10, com jorro, na condição 300 m/min. e 0,05 mm/rot.	61

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Propriedades dos carbeto utilizados no metal duro	24
Tabela 2 – Propriedades mecânicas do PCD	26
Tabela 3 – Comparação de resistência mecânica e densidade de diferentes materiais metálicos	39
Tabela 4 – Composição química da liga Ti-6Al-4V	40
Tabela 5 – Propriedades mecânicas da liga Ti-6Al-4V	40
Tabela 6 – Parâmetros de usinagem e condições de lubri-refrigeração	46
Tabela 7 – Dados obtidos na condição a seco utilizando avanço de 0,10 mm/rot.	48
Tabela 8 – Dados obtidos na condição a seco utilizando avanço de 0,05 mm/rot.	49

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

A_γ	Superfície de saída
A_α	Superfície principal de folga
A_α'	Superfície secundária de folga
a_p	Profundidade de usinagem
CAD	Desenho Assistido por Computador
CAM	Manufatura Assistida por Computador
CNC	Comando Numérico Computadorizado
d	Diâmetro da peça (mm)
f	Avanço de corte (mm/rot.)
HSC	High Speed Cutting
HSM	High Speed Machining
L_c	Comprimento de corte (m)
MEV	Microscópio Eletrônico de Varredura
MD	Metal duro
n	rotação da peça (rpm)
PCD	Diamante policristalino
S	Aresta principal de corte
S'	Aresta secundária de corte
VB_B	Desgaste de flanco (mm)
$VB_{Bmáx}$	Desgaste de flanco máximo (mm)
v_c	Velocidade de corte (m/min.)

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	14
2 OBJETIVO	15
2.1 Objetivos específicos	15
3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	16
3.1 Usinagem	16
3.2 Processo de Torneamento	17
3.2.1 Tipos de torneamento	17
3.2.2 Movimentos no torneamento	19
3.2.3 Direções dos movimentos no torneamento	20
3.2.4 Grandezas no torneamento	20
3.2.5 Velocidade de corte no torneamento	20
3.3 Ferramentas de corte	21
3.3.1 Ferramentas de metal duro	23
3.3.2 Ferramentas de PCD	25
3.4 Usinagem com alta velocidade de corte	26
3.5 Fluidos de corte	29
3.6 Desgaste da ferramenta de corte	31
3.7 Mecanismos de Desgaste	35
3.8 Liga Ti-6Al-4V	37
4 MATERIAIS E MÉTODOS	40
4.1 Corpos de prova	40
4.2 Torno CNC	41
4.3 Ferramentas de corte e suporte inter cambiável	42
4.4 Condições de lubri-refrigeração	43
4.5 Medição do desgaste das ferramentas de corte	44
4.6 Caracterização dos mecanismos de desgaste	44
4.7 Procedimento experimental	45
5 RESULTADOS E DISCUSSÕES	47
5.1 Desgaste de flanco	47
5.2 Análise dos mecanismos de desgaste	51
6 CONCLUSÕES	62
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	64

1 INTRODUÇÃO

A operação de torneamento é uma das mais comumente empregadas na usinagem de metais. A peça usinada é colocada na placa de um torno e é rotacionada. A ferramenta de corte é rigidamente posicionada em um porta-ferramenta e se move a um avanço constante ao longo do eixo da peça, usinando uma camada de material para formar um cilindro ou uma superfície com um perfil mais complexo. A velocidade de corte e o avanço são os dois parâmetros mais importantes nessa operação, que são ajustados pelo operador para otimizar as condições de corte. A profundidade de corte é na maioria das vezes determinada pela dimensão inicial da barra e a dimensão exigida pelo produto final (TRENT e WRIGHT, 2000).

Com a ampla utilização de máquinas CNC (Comando Numérico Computadorizado) juntamente com os sistemas de alta performance CAD/CAM (Desenho Assistido por Computador/Manufatura Assistido por Computador), a usinagem com alta velocidade tem demonstrado vantagens quando comparada com outras técnicas de fabricação rápida. Além de maior produtividade, a usinagem HSM (*High Speed Machining*) é capaz de gerar melhores acabamentos superficiais, quinas sem rebarbas e pode ser utilizada para usinar peças com paredes finas, porque as forças de usinagem envolvidas nas condições HSM são menores (RAHMAN, WANG e WONG, 2006).

Os materiais para ferramentas de corte empregados na usinagem de ligas de titânio geralmente apresentam uma pequena vida útil da ferramenta e a maioria reage com a peça usinada. Essa desvantagem se deve à ocorrência de altas temperaturas próximo à aresta de corte da ferramenta. Esse fenômeno leva a um rápido desgaste da ferramenta ao usinar ligas de titânio e isso é agravado pelo fato de essas ligas terem uma baixa condutividade térmica (aproximadamente 6,6 W/mK para a liga Ti-6Al-4V). Ou seja, grande parte do calor gerado na operação de usinagem é retido na ferramenta, porque o calor é lentamente conduzido para o cavaco e a peça usinada (EZUGWU *et al.*, 2007).

Vários estudos realizados constatarem que o metal duro sem revestimento e o PCD são os materiais mais viáveis para ferramentas de corte na usinagem de ligas de titânio. Portanto, é necessário investigar a comparação da performance desses dois materiais e seus melhores desempenhos quanto à instabilidade do cavaco gerado, forças de usinagem e resistência da ferramenta à falha mecânica e corrosão (AMIN, ISMAIL e KHAIRUSSHIMA, 2007).

2 OBJETIVO

Analisar os mecanismos de desgaste de ferramentas de PCD e de metal duro no torneamento com alta velocidade de corte na liga Ti-6Al-4V, nas condições de lubri-refrigeração a seco e por jorro.

2.1 Objetivos específicos

- a) Medir o desgaste de flanco máximo ($VB_{Bmáx}$) das ferramentas de PCD e de metal duro;
- b) Obter imagens da morfologia das ferramentas de corte, utilizando a técnica de Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV);
- c) Analisar os mecanismos de desgaste que atuam nas ferramentas no torneamento com alta velocidade de corte;
- d) Verificar o comportamento do corte a seco e por jorro.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo será apresentada a revisão bibliográfica realizada sobre temas relacionados ao trabalho: usinagem, processo de torneamento, ferramentas de corte, usinagem com alta velocidade de corte, fluidos de corte, desgaste de ferramentas, mecanismos de desgaste e a liga Ti-6Al-4V.

3.1 Usinagem

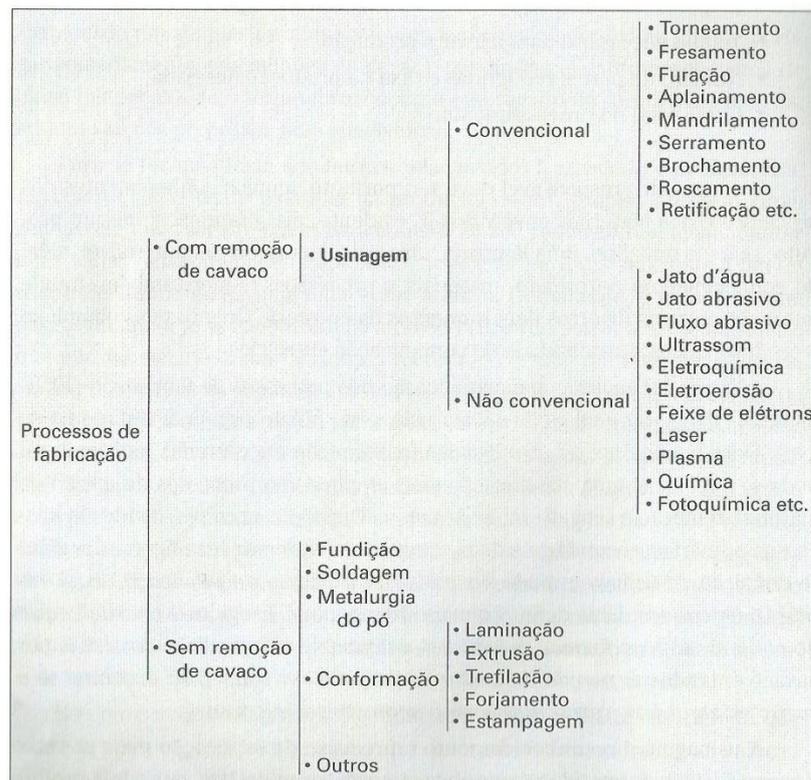
A usinagem é o termo que Ferraresi (1970) define como “operações que, ao conferir à peça a forma, ou as dimensões ou o acabamento, ou ainda uma combinação de qualquer um desses três itens, produzem cavaco”. Trent e Wright (2000) afirmam que a usinagem de metais é uma indústria importante na maioria dos países desenvolvidos. Os gastos com processos de usinagem representam mais de 15% do valor de todos os produtos manufaturados em todos os países industrializados, gerando milhões de empregos, o que mostra a sua enorme importância econômica.

As várias operações de usinagem que existem são divididas em processos de usinagem convencional e não-convencional, conforme mostrado na Figura 1. De acordo com Amorim (2002), o torneamento, o fresamento e a furação são as operações de maior notoriedade dentre os processos de usinagem convencional, já que essas são as operações mais comumente realizadas.

De acordo com Trent e Wright (2000), a maioria dos processos de usinagem é utilizada em metais e suas ligas (alguns materiais poliméricos também podem ser usinados). Além disso, apesar de a usinagem ser muitas vezes associada a processos realizados em indústrias de grande porte como a aeroespacial e a automotiva, onde produtos de tamanhos extensos são usinados, algumas operações de alta precisão, realizadas em peças que exigem maiores cuidados, possuem também grande importância na indústria manufatureira.

Outrossim, segundo Machado *et al.* (2009), a usinagem é um processo de fabricação simples e ao mesmo tempo complexo, já que apesar de ser realizado de forma prática, diversas variáveis estão envolvidas e cada uma delas tem uma determinada importância. Este trabalho descreverá e analisará algumas dessas variáveis de uma forma geral e também especificamente na operação de torneamento.

Figura 1 – Classificação dos processos de fabricação.



Fonte: MACHADO *et al.*, 2009.

3.2 Processo de torneamento

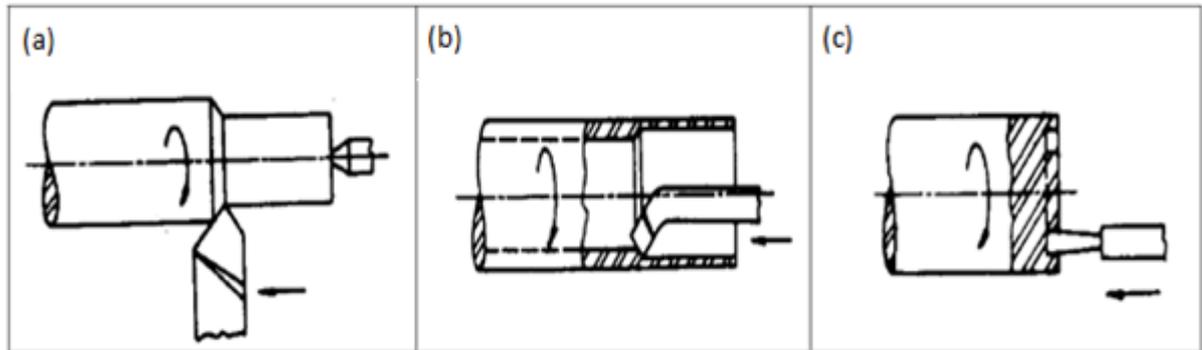
Trent e Wright (2000) destacam que o torneamento é um dos processos de usinagem mais amplamente empregados em estudos empíricos. Ferraresi (1970) caracteriza o torneamento como “processo mecânico de usinagem destinado a obtenção de superfícies de revolução com auxílio de uma ou mais ferramentas monocortantes (ferramenta destinada à remoção de cavaco que possui apenas uma superfície de saída).”

3.2.1 Tipos de torneamento

Segundo Ferraresi (1970), o torneamento é classificado a partir de sua trajetória da seguinte maneira (Figuras 2 a 5):

- Torneamento retilíneo: em que a ferramenta se desloca a partir de uma trajetória retilínea, que se divide em:
 - Cilíndrico:
 - ✓ Externo;
 - ✓ Interno;
 - ✓ Sangramento axial.

Figura 2 – Torneamento cilíndrico.

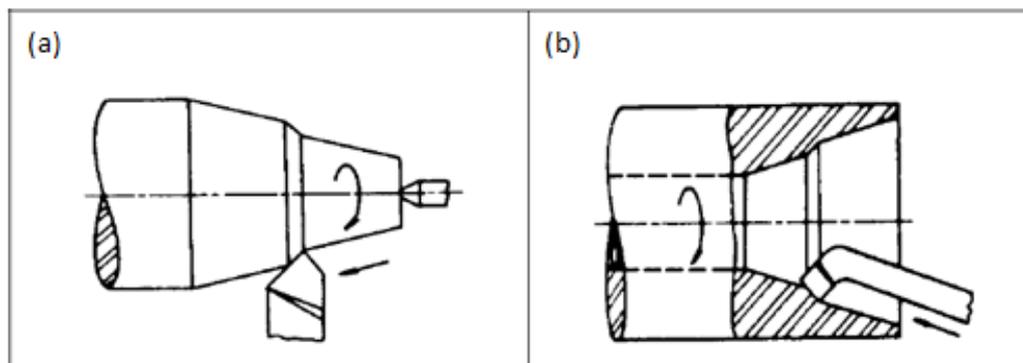


(a) externo (b) interno (c) sangramento axial

Fonte: FERRARESI, 1970.

- Cônico:
- ✓ Externo;
- ✓ Interno.

Figura 3 – Torneamento cônico.

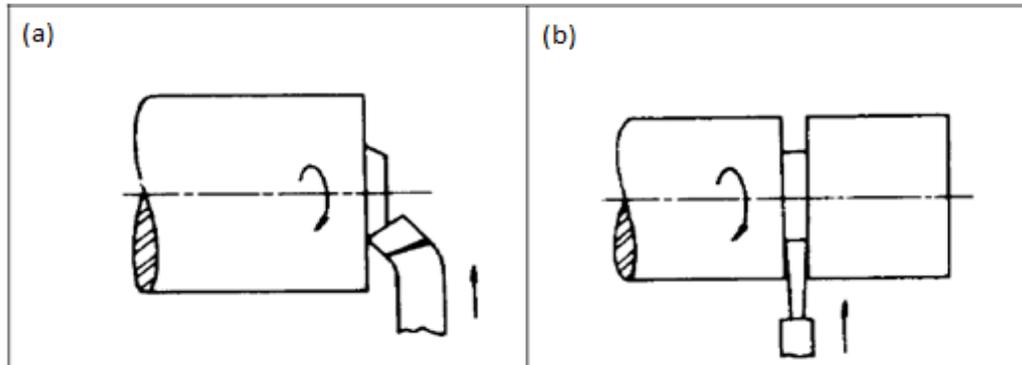


(a) externo (b) interno

Fonte: FERRARESI, 1970.

- Radial:
- ✓ Torneamento de faceamento;
- ✓ Sangramento radial.

Figura 4 - Torneamento radial.

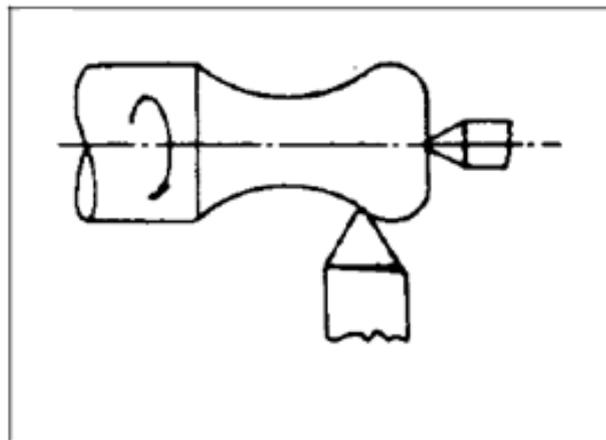


(a) faceamento (b) sangramento radial

Fonte: FERRARESI, 1970.

- Torneamento curvilíneo: em que a trajetória percorrida pela ferramenta é curvilínea.

Figura 5 - Torneamento curvilíneo.



Fonte: FERRARESI, 1970.

Além disso, quanto à sua aplicação, Ferraresi (1970) classifica as operações de torneamento em:

- Torneamento de acabamento: operação de usinagem destinada à obter na peça dimensões finais, ou um acabamento superficial especificado, ou ambos;
- Torneamento de desbaste: operação de usinagem, anterior a de acabamento, visando a obter na peça a forma e dimensões próximas das finais.

3.2.2 Movimentos no torneamento

Os três principais movimentos no torneamento, e de certa forma na usinagem em geral, são definidos por Diniz, Marcondes e Coppini (1999) da seguinte maneira:

- Movimento de corte: é o movimento entre a ferramenta e a peça que, sem a ocorrência concomitante do movimento de avanço, provoca remoção de cavaco durante uma única rotação ou um curso da ferramenta;
- Movimento de avanço: é o movimento entre a ferramenta e a peça que, juntamente com o movimento de corte, possibilita uma remoção contínua ou repetida do cavaco, durante várias rotações ou cursos da ferramenta;
- Movimento efetivo de corte: é o movimento entre a ferramenta e a peça, a partir do qual resulta o processo de usinagem. Quando o movimento de avanço é contínuo, o movimento efetivo é o resultante da composição dos movimentos de corte e de avanço.

Esses três movimentos são considerados ativos, uma vez que promovem a remoção de material. Por outro lado, quatro movimentos são classificados como passivos, já que não promovem diretamente a remoção de material, mesmo sendo essenciais para a prática de um processo de usinagem. Esses movimentos são: movimento de ajuste, de correção, de aproximação e de recuo (DINIZ, MARCONDES e COPPINI, 1999).

3.2.3 Direções dos movimentos no torneamento

Segundo Machado et al. (2009), as direções dos movimentos que promovem de forma direta a remoção de material são definidas da seguinte forma:

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

3.2.4 Grandezas no torneamento

Algumas grandezas devem ser analisadas para um melhor entendimento e conseqüentemente para uma realização mais eficiente de qualquer processo de usinagem. De acordo com Amorim (2002), dois parâmetros de corte envolvidos num processo de torneamento são o avanço e a profundidade de corte, mostrados na Figura 6, que são definidos assim:

- Avanço (f): é a distância percorrida pela ferramenta por revolução da peça (mm/rev.);
- Profundidade de usinagem (a_p): espessura ou profundidade de penetração da ferramenta medida perpendicularmente ao plano de trabalho, que é definido pelas direções de avanço e velocidade de corte da ferramenta (mm).

3.2.5 Velocidade de corte no torneamento

Diniz, Marcondes e Coppini (1999) definem a velocidade de corte como a velocidade instantânea resultante da rotação da ferramenta em torno da peça, para as operações de torneamento, onde os movimentos de corte e avanço ocorrem simultaneamente. Nesse caso, a velocidade de corte é calculada através da Equação 1:

$$v_c = \frac{\pi \cdot d \cdot n}{1000} \quad (1)$$

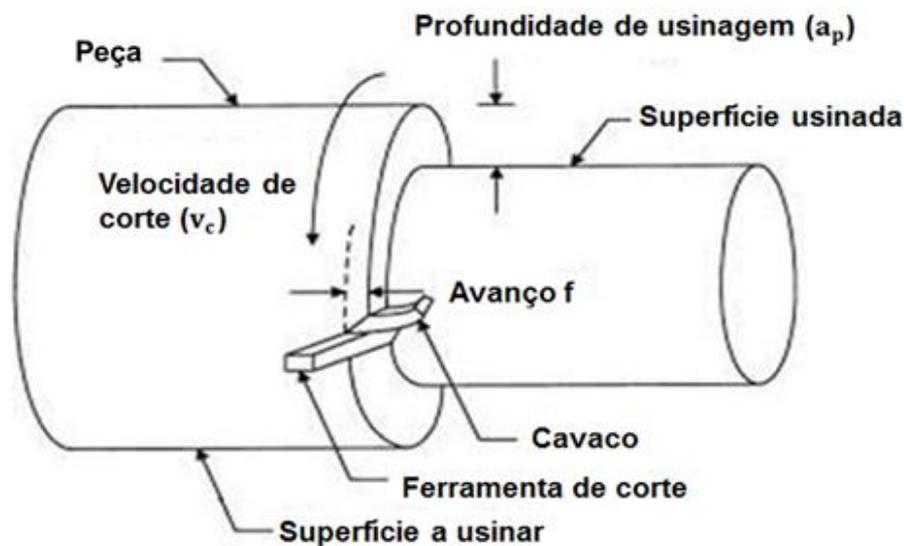
onde:

v_c = velocidade de corte (m/min)

d = diâmetro da peça (mm)

n = rotação da peça (rpm)

Figura 6 - Parâmetros de corte e superfície em um torneamento cilíndrico externo.



Fonte: AMORIM, 2002 (modificada).

3.3 Ferramenta de corte

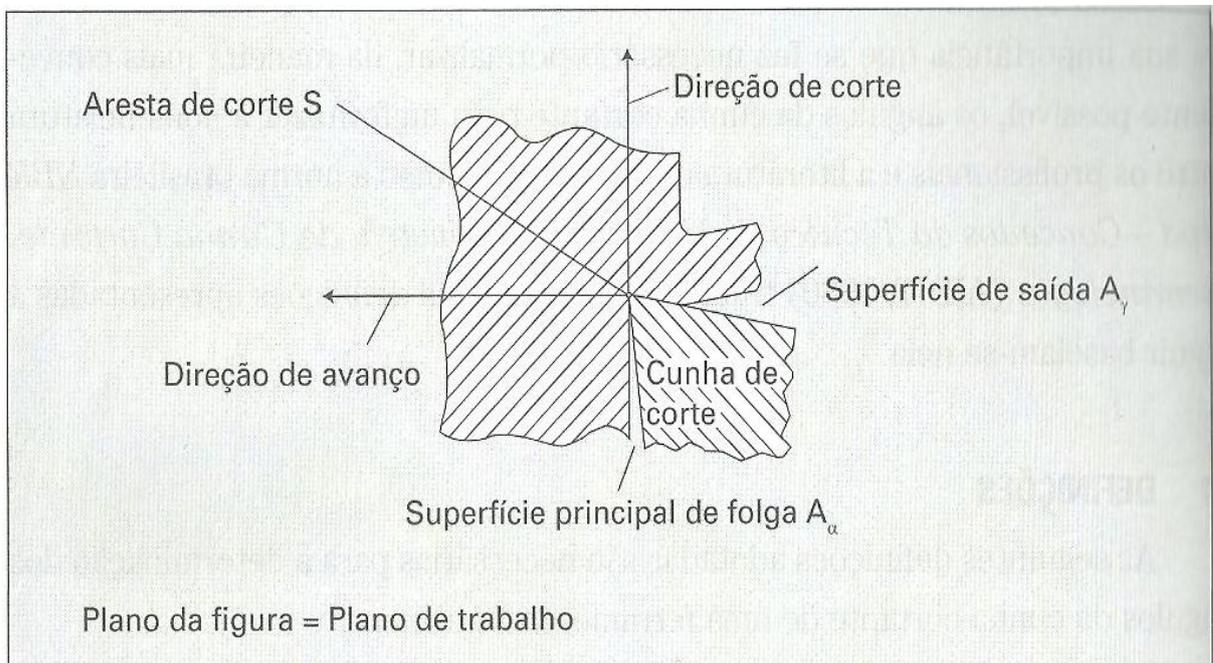
Trent e Wright (2000) destacam a importância de conhecer a geometria e os elementos da cunha de corte de uma ferramenta ao afirmarem que a sua performance é muito dependente dessa geometria. Além disso, algumas características e dimensões da ferramenta devem ser

estabelecidas de uma forma extremamente precisa, já que são fundamentais para que se realize um eficiente processo de usinagem.

A partir das Figuras 7 e 8, Machado *et al.* (2009) definem os principais elementos de uma cunha cortante:

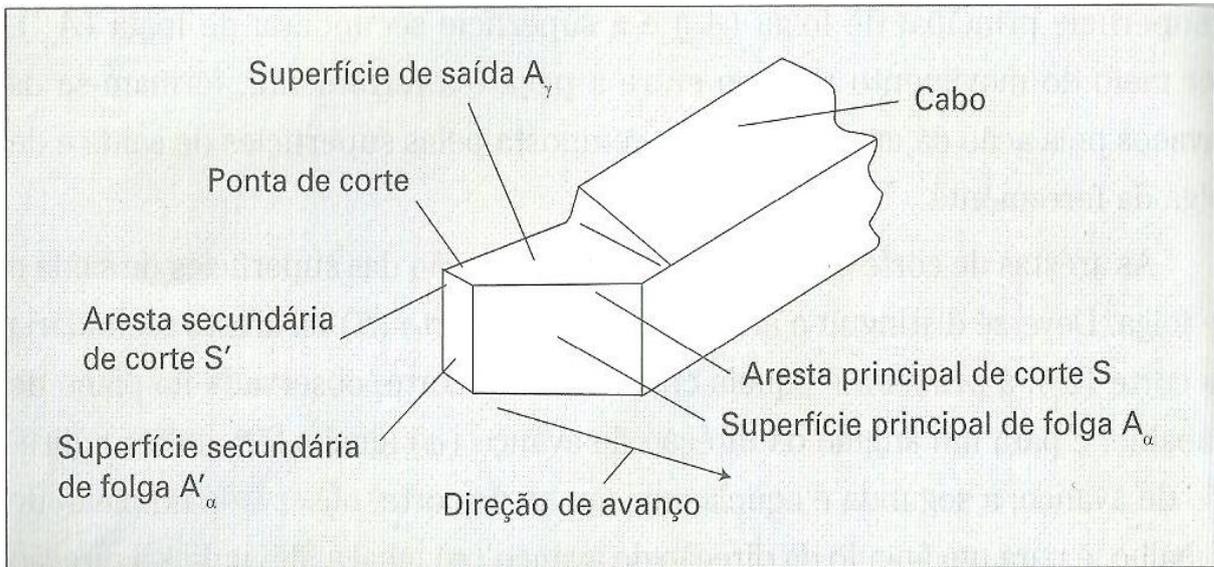
- Superfície de saída (A_γ): a superfície da cunha de corte sobre a qual o cavaco se move;
- Superfície de folga: a superfície que determina a folga entre a ferramenta e a superfície em usinagem. Distinguem-se a superfície principal de folga (A_α) e superfície secundária de folga (A_α');
- Aresta principal de corte (S): aquela cuja cunha de corte, observada no plano de trabalho, e para um ângulo da direção de avanço (φ) igual a 90° , indica a direção de avanço;
- Aresta secundária de corte (S'): aquela cuja cunha de corte, observada no plano de trabalho, e para um ângulo da direção de avanço (φ) igual a 90° , indica a direção contrária à direção de avanço;
- Ponta de corte: a interseção das arestas principal e secundária de corte.

Figura 7 - Cunha de corte da ferramenta.



Fonte: MACHADO *et al.*, 2009.

Figura 8 - Elementos da cunha de corte de uma ferramenta de torneiar.



Fonte: MACHADO *et al.*, 2009.

3.3.1 Ferramentas de metal duro

O metal duro é um compósito de matriz metálica que faz parte da classe dos cermetos e apresenta duas fases em sua estrutura: uma fase cerâmica, normalmente partículas de WC (carbeto de tungstênio), que está aglomerada ou cementada em uma matriz constituída de um metal refratário, macio e dúctil (geralmente o cobalto - Co). A concentração em volume dessa matriz é de aproximadamente 5% (SANTHANAM, TIERNEY E HUNT, 1990 apud ROSA, 2013; XIAO *et al.*, 2009 apud ROSA, 2013; CAMERINI, 2008).

Algumas propriedades desse material são: dureza elevada, alta resistência ao desgaste, refratariedade e boa tenacidade. Essas propriedades fazem com que as ferramentas de metal duro tenham excelentes aplicações em processos de usinagem com alta velocidade de corte, já que nesses casos, o desgaste da ferramenta tende a ser maior por causa das altas temperaturas geradas durante a operação (SANTHANAM, TIERNEY E HUNT, 1990 apud ROSA, 2013; XIAO *et al.*, 2009 apud ROSA, 2013; CAMERINI, 2008).

De acordo com Santhanam, Tierney e Hunt (1990) apud Oliveira (2007), a microestrutura e a composição química do metal duro influenciam muito na performance desse material como ferramenta de corte. Outrossim, suas propriedades dependem do tamanho de grão e da quantidade de aglomerante. Na fabricação do metal duro para ferramentas de corte, vários carbeto podem ser utilizados e algumas de suas propriedades são mostradas na Tabela 1.

Tabela 1 - Propriedades dos carbeto utilizados no metal duro.

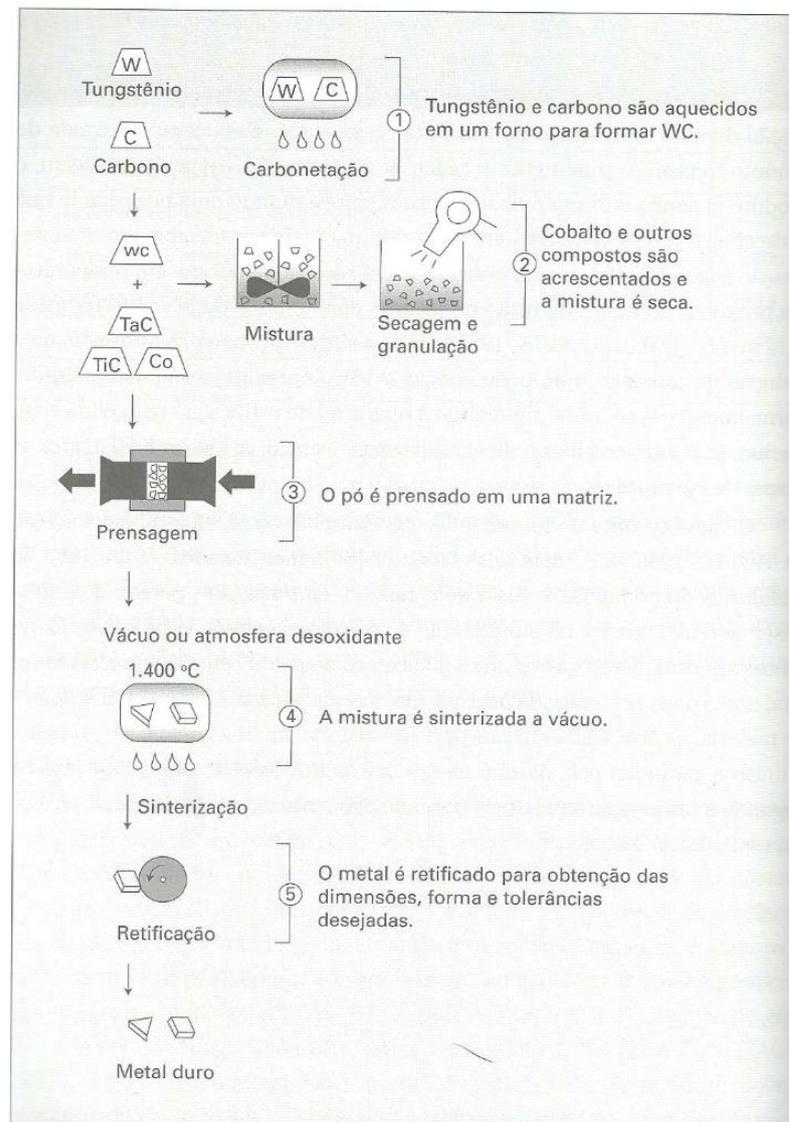
Carbeto	Microdureza [HV ₅₀]	Ponto de fusão [°C]	Densidade [g/cm ³]	Módulo de Elasticidade [GPa]	Coefficiente de Exp. Térmica [µm/mK]
TiC	3000	3100	4,94	451	7,7
VC	2900	2700	5,71	422	7,2
HfC	2600	3900	12,76	352	6,6
ZrC	2700	3400	6,56	348	6,7
NbC	2000	3600	7,8	338	6,7
Cr ₃ C ₂	1400	1800	6,66	373	10,3
WC	2200	2800	15,7	696	5,2
Mo ₂ C	1500	2500	9,18	533	7,8
TaC	1800	3800	14,5	285	6,3

Fonte: EXNER, 1979 apud OLIVEIRA, 2007 (modificada).

Segundo Exner (1979) apud Oliveira (2007), na composição do metal duro, o carbeto de tungstênio (WC) é o carbeto mais aplicado, porque apesar de sua microdureza ser maior apenas que a dos carbeto de tântalo (TaC), cromo (Cr₃C₂) e molibdênio (Mo₂C), quando aumenta-se a temperatura, sua taxa de redução de microdureza é menor, comparando com outros carbeto como carbeto de titânio (TiC), zircônio (ZrC), háfnio (HfC), vanádio (VC), nióbio (NbC) e tântalo (TaC). E esse maior valor de microdureza a quente influencia na resistência ao desgaste abrasivo da ferramenta. Outras duas propriedades que proporcionam uma utilização mais ampla de WC no metal duro são: elevado módulo de elasticidade e alta condutividade térmica.

Além disso, sabe-se que o processo de fabricação do metal duro é feito a partir da metalurgia do pó, como é demonstrado na Figura 9.

Figura 9 - Esquema ilustrativo do processo de metalurgia do pó para obtenção dos metais duros.



Fonte: MACHADO *et al.*, 2009.

3.3.2 Ferramentas de PCD

Camerini (2008) afirma que o PCD (diamante sintético policristalino) “consiste basicamente em cristais de diamante ligados por uma fase metálica (cobalto)”. Sua fabricação teve início no final da década de 80 e o PCD é amplamente aplicado como ferramenta para usinagem de materiais não ferrosos ou como insertos em brocas de perfuração de poços de petróleo. Por outro lado, o cobalto limita um pouco a performance das ferramentas de PCD, porque esse metal contribui para que o diamante se transforme em grafite, que é uma fase termodinamicamente mais estável em condições ambiente, ou seja, o cobalto age como catalisador nas transformações de fases de carbono. E isso prejudica a utilização do PCD como

revestimento em ferramentas de metal duro, já que a energia de ativação requerida para essa transformação é alcançada quando a ferramenta de corte é aquecida durante a operação de usinagem.

Conforme Câmara (2008), o PCD é um material ultra-duro, já que possui dureza maior que 30 GPa. Trent e Wright (2000) constatam que por causa dessa alta dureza, as ferramentas que tem diamante em sua composição apresentam maior vida e menor taxa de desgaste do que o metal duro, quando o mecanismo de desgaste que predomina é o desgaste por abrasão. A Tabela 2 apresenta algumas propriedades do PCD.

Tabela 2 - Propriedades do PCD.

Propriedade	Material da Ferramenta - PCD
Densidade (g/cm ³)	3,4
Resistência à compressão (kN/mm ²)	4,7
Dureza Knoop HK (kN/mm ²)	50
Módulo Young (kN/mm ²)	925
Coef. Exp. Térmica (10 ⁻⁴ /K)	3,8
Condutividade Térmica. (W/mK)	120
Tenacidade à fratura (MN. m ^{-3/2})	6,9

Fonte: CÂMARA, 2008 (modificada).

De acordo com Trent e Wright (2000), a sintetização do diamante pôde ser realizada graças à elaboração da engenharia de um processo de pressão ultra-alta, em que é possível manter a temperatura em aproximadamente 1500°C e a pressão em 8 GPa por um tempo suficiente para que a estrutura hexagonal do carbono se transforme em cúbica e os cristais de diamante cresçam.

Amin, Ismail e Khairusshima (2007) ressaltam que o metal duro não revestido e o PCD são os materiais para ferramentas de corte mais viáveis para serem aplicados na usinagem de ligas de titânio. Esses autores compararam o desempenho de ferramentas de PCD e de metal duro no fresamento de acabamento da liga Ti-6Al-4V e a partir dos resultados do estudo, pode-se concluir que uma capacidade maior de remoção de material foi obtida utilizando as ferramentas de PCD, quando comparadas com o metal duro.

3.4 Usinagem com alta velocidade de corte

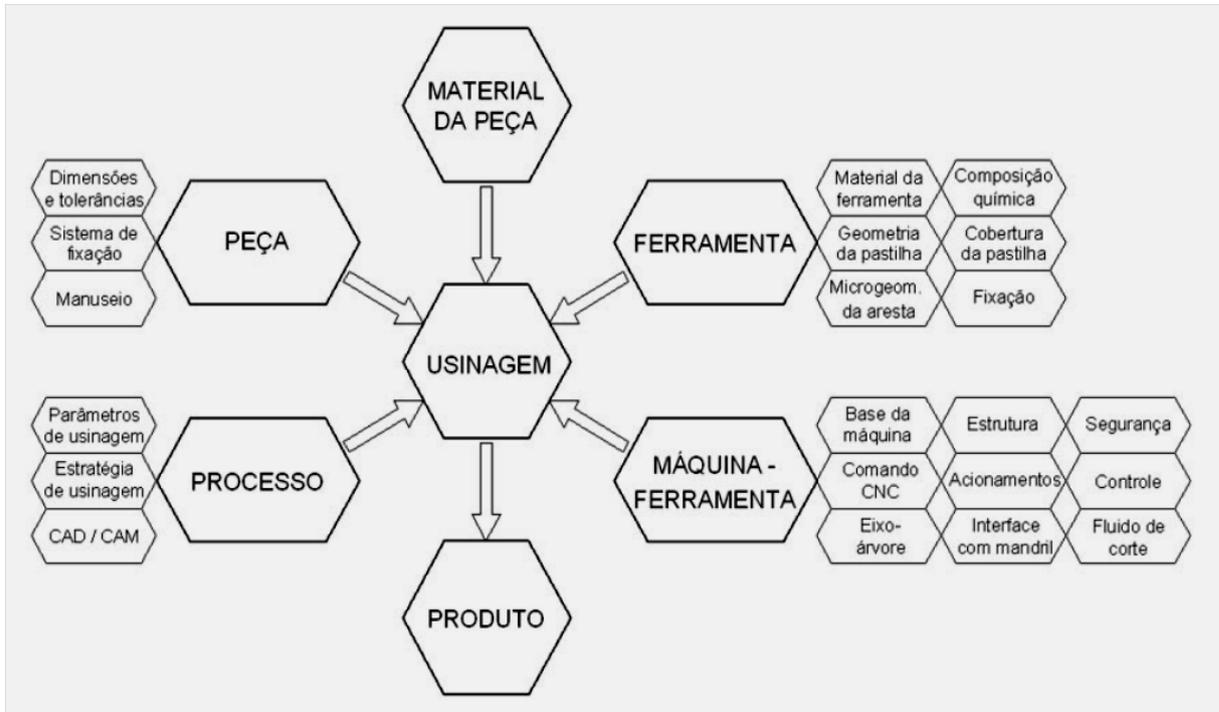
Dewes *et al.* (1999) definem a usinagem com alta velocidade (HSM – *High Speed Machining* ou HSC – *High Speed Cutting*) como “usinagem em que as velocidades de corte e

de avanço são consideravelmente maiores do que aquelas utilizadas na usinagem convencional”, porém, esse processo muitas vezes é descrito como “fresamento de acabamento em altas rotações”. A HSM é utilizada na indústria aeroespacial para remover grandes volumes de alumínio rapidamente e para produzir seções de paredes finas nas asas de aeronaves. Outra aplicação dessa tecnologia é a produção de moldes e matrizes para ferramentas de aço temperado.

De acordo com Fallböhmer *et al.* (2000) apud Silva, Coelho e Catai (2004), a HSM tem sido cada vez mais importante, já que a usinagem influencia bastante no custo final das peças mecânicas. Consequentemente, têm sido mais valorizados a elaboração e o fornecimento de tecnologias para altas velocidades de avanço e de rotações. Entretanto, todas as partes envolvidas nesse novo processo precisam estar de acordo com suas características para que a tecnologia HSM seja aplicada de uma forma viável economicamente. As máquinas devem atender determinados requisitos de segurança e as ferramentas devem suportar as condições severas causadas pelas altas velocidades de corte. A usinagem com alta velocidade pode ser aplicada para todo processo de usinagem de metais leves, não ferrosos e plásticos. Todavia, se o material for aço, ferro fundido ou ligas de difícil usinabilidade, é apropriado somente para o corte final. Conforme Andrae (1999) apud Silva, Coelho e Catai (2004), o corte com altas velocidades em processos de torneamento, roscamento e furação tem sido menos investigado se comparado com o fresamento de acabamento em altas rotações, considerando os estudos publicados.

Conforme Schulz (1999) apud Hioki (2006), a usinagem HSM envolve vários fatores, como o sistema CAD, programas NC, o processo de usinagem, que abrange as características da ferramenta de corte e do material usinado, algumas especificações da máquina-ferramenta, entre outros. Oliveira (2007) também aponta os fatores relacionados à usinagem HSM, conforme Figura 10.

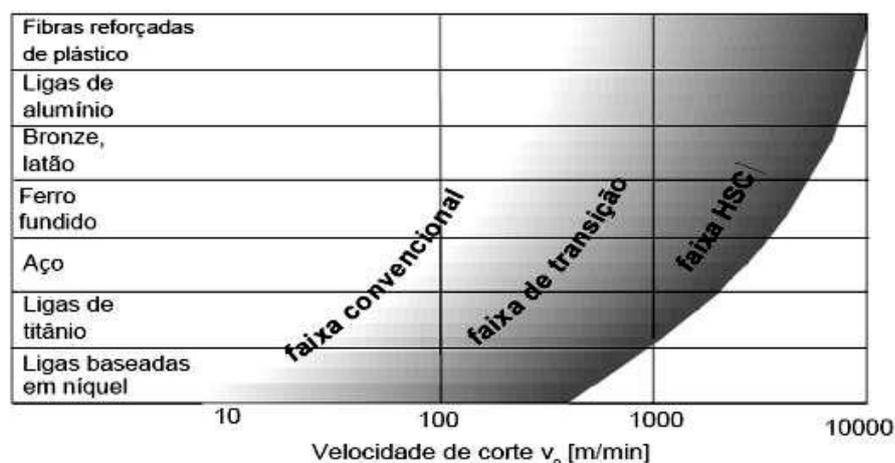
Figura 10 - Fatores que influenciam o processo HSM.



Fonte: SCHULZ e MORIWAKI, 1992 apud OLIVEIRA, 2007.

Guenza (2008) aponta que a composição do material usinado, e por sua vez sua temperatura de fusão, influencia na velocidade de corte do processo de usinagem HSM. A Figura 11 mostra as faixas de velocidade convencional e HSM para materiais diferentes.

Figura 11 - Faixas de velocidade de corte para operações HSM.



Fonte: SCHULZ, 1989 apud GUENZA, 2008.

Comparando a usinagem HSM com o processo convencional, Schulz e Moriwaki (1992) apresentam as seguintes vantagens do corte com altas velocidades:

- Maior produtividade;

- Aumento do nível de precisão, principalmente na usinagem de componentes delgados, graças à menor carga ocasionada pelos cavacos;
- Melhor acabamento superficial e redução dos danos à camada superficial da peça;
- Redução da formação de rebarbas;
- Melhor remoção de cavacos;
- Melhor estabilidade de corte, graças à menor vibração.

Entretanto, Fallböhmer *et al.* (2000) também destacam algumas limitações da usinagem HSM, como desgaste excessivo da ferramenta de corte, necessidade de ferramental específico e caro, de materiais avançados para ferramentas e revestimentos, além de um melhor sistema de fixação da ferramenta para reduzir sua vibração.

3.5 Fluidos de corte

Vieira, Machado e Ezugwu (2011) destacam que nos processos de usinagem, os fluidos de corte são utilizados com o intuito de aumentar a produtividade, melhorar o acabamento superficial, reduzir custos e portanto aumentar os lucros. O primeiro estudo realizado sobre fluidos de corte ocorreu em 1907, em que a velocidade de corte chegou a aumentar 40% na usinagem de um aço, utilizando ferramentas de aço rápido e água como fluido de corte. Apesar da grande capacidade refrigerante da água, essa não é um bom lubrificante e provoca a corrosão dos componentes da máquina-ferramenta e da peça usinada. Por causa disso, desde então, fórmulas e produtos têm sido estudados e desenvolvidos para que tenham boa capacidade refrigerante e lubrificante.

Na indústria manufatureira atual, existe uma grande demanda para redução dos custos e aumento da produtividade. Por causa disso, essa alta produtividade é relacionada a altas velocidades de corte e de avanço e profundidade de corte, o que gera um calor maior na região de corte. Assim, a precisão dimensional, a vida da ferramenta de corte e a integridade superficial da peça são diretamente influenciadas negativamente. Os fluidos de corte prolongam o fim de vida da ferramenta e consequentemente melhoram o controle dimensional da operação e o acabamento superficial da peça (DEBNATH, REDDY e YI, 2014). Portanto, os fluidos de corte têm bastante influência em vários parâmetros de corte em um processo de usinagem.

Machado *et al.* (2009) definem que as principais funções dos fluidos de corte são:

- Lubrificação a baixas velocidades de corte;

- Refrigeração a altas velocidades de corte;
- Remoção dos cavacos da zona de corte;
- Proteção da máquina-ferramenta e da peça contra a oxidação.

Além dessas, Diniz, Marcondes e Coppini (1999) afirmam que em alguns casos, é esperado que o fluido de corte apresente outras três funções, que são definidas da seguinte maneira:

- Prevenção contra a soldagem cavaco-ferramenta: essa é uma função de lubrificação e é bastante necessária quando o material sendo cortado tem tendência à formação de aresta postiça de corte e as condições de usinagem utilizadas propiciam essa formação (baixas temperaturas de corte);
- Redução da dilatação (distorção) térmica da peça, para facilitar a obtenção de tolerâncias reduzidas;
- Evitar dano à estrutura superficial e o crescimento exagerado de tensões residuais na superfície da peça usinada (principalmente em processos de retificação).

Bianchi, Aguiar e Piubeli (2004) classificam e definem cada tipo básico de fluido de corte da seguinte forma:

- Óleos de corte ou fluidos de corte (integral ou aditivado): têm como composto básico o óleo mineral, podendo ser usados no estado puro (sem aditivação) ou aditivado (presença de aditivos polares e/ou aditivos químicos ativos ou inativos);
- Fluidos de corte solúveis em água: transformam-se em misturas, quando seu concentrado é diluído em água. Essas misturas variam entre emulsões e soluções, dependendo da constituição básica do fluido de corte solúvel concentrado (óleo mineral ou sais orgânicos e inorgânicos, respectivamente), da presença e do nível de emulgadores no concentrado. Esses fluidos são divididos assim:
 - Emulsionáveis convencionais: nas emulsões, o óleo mineral está disperso em forma de gotículas de água, devido à presença de emulgadores (substância que faz a dispersão do óleo na água);
 - Emulsionáveis semi-sintéticos: são combinações de fluidos sintéticos e emulsões em água. A porcentagem de óleo mineral emulsionável varia de 5% a 30% do total do fluido concentrado;

- Soluções (fluidos sintéticos): são soluções químicas, constituídas de materiais (sais) orgânicos e inorgânicos dissolvidos em água, não contendo óleo mineral.
- Gases: o ar é o fluido gasoso mais comum. Outros gases, como argônio, hélio e nitrogênio, são utilizados, em alguns casos, para prevenir a oxidação da peça e dos cavacos;
- Pastas e lubrificantes sólidos: dentre esses fluidos de corte, existem aqueles que são aplicados manualmente sobre a peça e na ferramenta em operações de mandrilamento. Os mais utilizados para operações de elevada severidade são o grafite, o bissulfeto de molibdênio, alguns tipos de pastas, sabões e ceras.

3.6 Desgaste da ferramenta de corte

Machado *et al.* (2009) afirmam que existem três fenômenos que fazem com que as ferramentas de corte não sejam mais eficazes em uma operação de usinagem, classificando e definindo-os da seguinte forma:

- Avaria: fenômeno que ocorre de maneira repentina e inesperada causado pela quebra, lascamento ou trinca da aresta de corte.
- Desgaste: o desgaste em ferramentas de corte é definido pela Norma ISO 3685 (1993) como “mudança de sua forma original durante o corte, resultante da perda gradual de material”.
- Deformação plástica: mudança de geometria da aresta de corte pelo deslocamento do material.

Entretanto, Trent e Wright (2000) consideram a deformação plástica como apenas um mecanismo de desgaste e não como um fenômeno que provoca a ineficácia de uma ferramenta de corte, similar à avaria e ao desgaste. Por outro lado, Ferraresi (1970) considera as deformações plásticas como avarias da ferramenta.

Machado *et al.* (2009) destacam que a avaria ocorre raramente em operações de torneamento, em que o corte é contínuo, com a exceção de as condições de corte não estarem apropriadas ao tipo de ferramenta; ou a geometria da ferramenta não estar adequada; ou até quando há um defeito de fabricação na ferramenta. Em geral, a avaria ocorre em operações onde o corte é interrompido, como o fresamento, por causa dos choques mecânicos e térmicos presentes nesses processos. O desgaste e a deformação plástica ocorrem em cortes contínuos ou interrompidos, nas superfícies de saída e nas superfícies de folga.

Conforme Ferraresi (1970), as avarias de uma ferramenta de corte são as quebras, trincas, sulcos distribuídos em forma de pente e as deformações plásticas. A quebra é definida

como a ruptura da ponta ou da aresta cortante da ferramenta, que é causada pela atuação de elevadas forças de usinagem nas seguintes situações: o ângulo da ponta ou ângulo de cunha pequeno; material de corte quebradiço; corte interrompido; parada instantânea do movimento de corte sem a retirada prévia da ferramenta da peça.

Diniz, Marcondes e Coppini (1999) afirmam que as trincas em uma ferramenta ocorrem devido à variação da temperatura e/ou variação dos esforços mecânicos. Se uma trinca tem origem térmica, essa é perpendicular à aresta de corte. Porém, uma trinca de origem mecânica ocorre paralelamente à aresta.

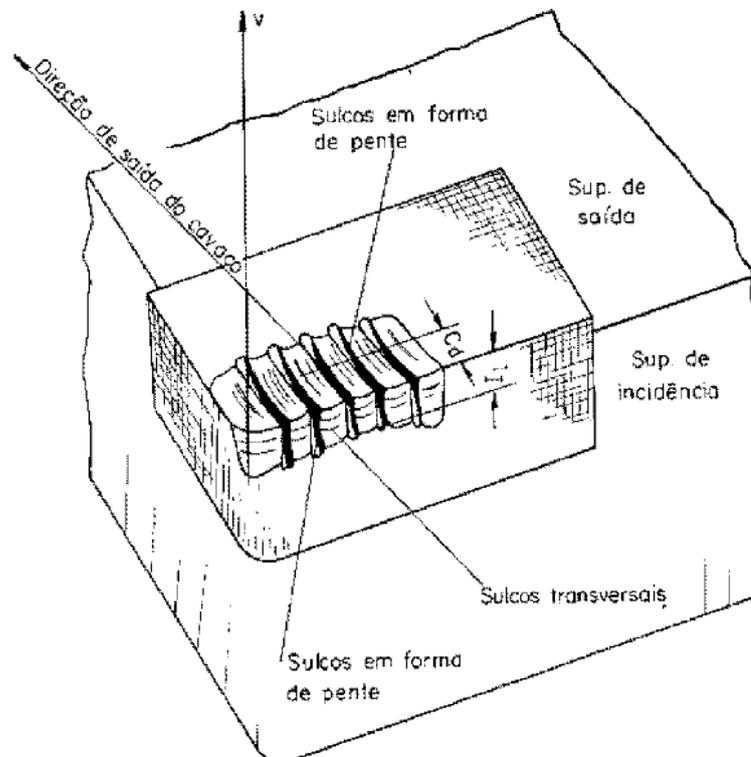
Ainda, de acordo com Ferraresi (1970), os sulcos distribuídos em forma de pente ocorrem no corte interrompido, em processos em que o avanço não é constante e quando o fluido de corte não tem um acesso regular na região de corte. Essas três situações proporcionam uma variação da temperatura de corte. Esses sulcos aparecem comumente em ferramentas de metal duro em operações de fresamento.

À medida que uma pastilha de metal duro sofre uma certa quantidade de variações de solicitações mecânicas e/ou térmicas, há o surgimento de trincas superficiais. Sob ação da peça e do cavaco em movimento, essas trincas formam pequenos sulcos. Na Figura 12, observa-se que os sulcos distribuídos em forma de pente ocorrem nas superfícies de saída e de folga, ou então apenas na superfície de saída. Por outro lado, há também os sulcos transversais, que aparecem apenas na superfície de folga da ferramenta (FERRARESI, 1970).

Amorim (2002) afirma que três tipos principais de desgaste podem ocorrer em uma ferramenta de corte durante o processo de usinagem, definindo-os da seguinte maneira:

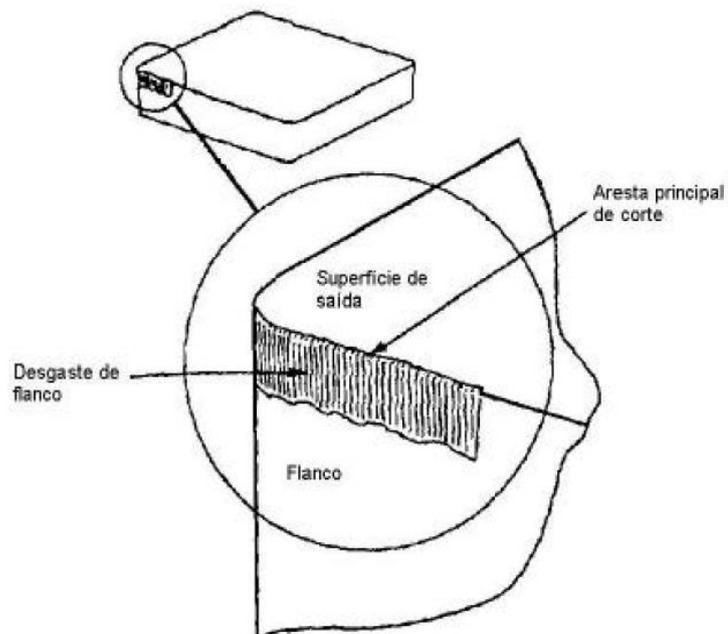
- Desgaste de flanco: ocorre, nas superfícies de folga, atingindo tanto a aresta principal de corte como a secundária, ou ambas. É o tipo de desgaste mais utilizado para determinar o fim de vida da ferramenta, já que é o que apresenta maior risco de danos à peça (Figura 13).

Figura 12 - Formação de sulcos distribuídos em forma de pente.



Fonte: FERRARESI, 1970.

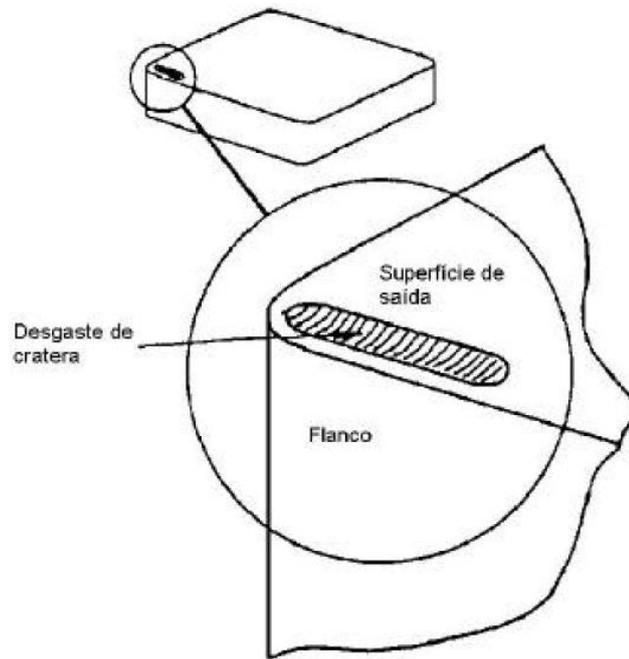
Figura 13 - Desgaste de flanco.



Fonte: AMORIM, 2002.

- Desgaste de cratera: ocorre na superfície de saída da ferramenta, onde se localiza, durante o corte, a zona de deslizamento do cavaco (Figura 14).

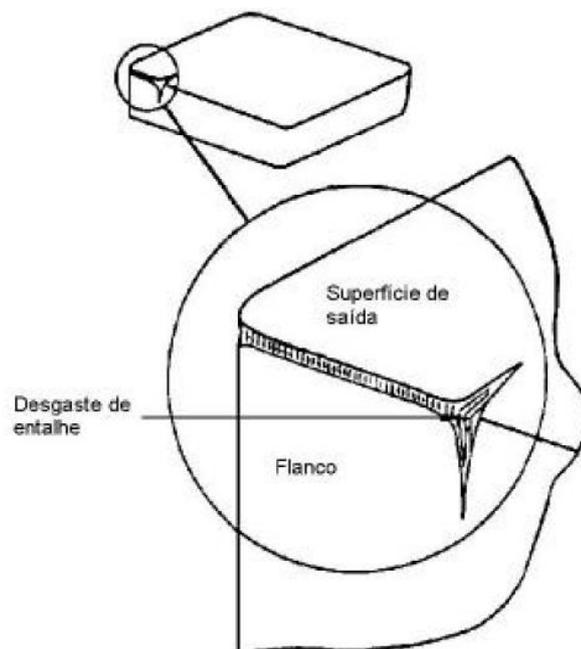
Figura 14 - Desgaste de cratera.



Fonte: AMORIM, 2002.

- Desgaste de entalhe: o desgaste de flanco comumente ocorre mais na região onde há o contato com a superfície externa da peça do que nas demais regiões. Esse desgaste é denominado desgaste de entalhe (Figura 15).

Figura 15 - Desgaste de entalhe.

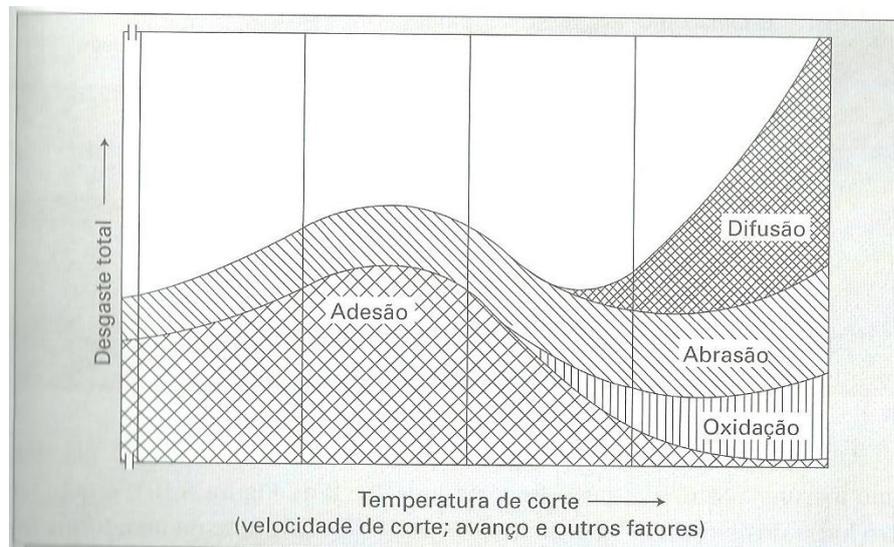


Fonte: AMORIM, 2002.

3.7 Mecanismos de desgaste

Machado *et al.* (2009) afirmam que todas as formas de desgaste acontecem devido aos vários mecanismos de desgaste. Esses mecanismos são mostrados na Figura 16 em função da temperatura de corte, parâmetro que é influenciado por alguns fatores como a velocidade de corte e o avanço.

Figura 16 - Diagrama dos mecanismos de desgaste das ferramentas de corte em função da temperatura.



Fonte: MACHADO *et al.*, 2009.

Esse diagrama apresenta quatro mecanismos de desgaste, que são: adesão abrasão, oxidação e difusão. É possível observar que quanto maior a temperatura de corte, maior será o desgaste total da ferramenta. Em menores temperaturas, somente os mecanismos de adesão e abrasão estão presentes, sendo que a adesão é o mecanismo que predomina. Por outro lado, em altas temperaturas, a adesão diminui enquanto os mecanismos de oxidação e difusão surgem e crescem à medida que a temperatura aumenta, e a difusão cresce de forma exponencial (MACHADO *et al.*, 2009).

De acordo com Pigari (1995), o mecanismo de adesão ocorre quando no contato peça/ferramenta ou cavaco/ferramenta, há um fenômeno similar à soldagem entre as duas partes, graças a um aumento na temperatura. As partículas formadas nessa região são arrancadas e arrastadas periodicamente com a peça ou o cavaco. Essas partículas contém material da peça e também da ferramenta.

Segundo Machado *et al.* (2009), considerando duas superfícies com movimento relativo, o desgaste abrasivo pode ser denominado de “dois corpos” ou de “três corpos”, sendo que o primeiro se refere a quando partículas duras pertencentes a uma dessas superfícies remove ou desloca o material, enquanto o segundo ocorre quando as partículas duras não estão ligadas a nenhuma das superfícies e portanto “são livres para rolar e escorregar entre essas.” Na usinagem, esses dois tipos de desgaste abrasivo podem acontecer. O desgaste de dois corpos ocorre quando precipitados duros (óxidos, carbonetos, nitretos ou carbonitretos) atuam como partículas abrasivas e desgastam a ferramenta, se fizerem parte do material da peça ou do cavaco. A abrasão de três corpos ocorre quando as partículas abrasivas, que podem ser provenientes da peça e do cavaco conjuntamente, são arrancadas pelo mecanismo de adesão e introduzidas no fluxo de material.

Conforme Machado *et al.* (2009), o mecanismo de difusão “envolve a transferência de material, no nível atômico, e é fortemente dependente da temperatura, do tempo e da solubilidade dos elementos envolvidos na zona de fluxo.” A solubilidade dos elementos se refere à afinidade química entre esses. O tamanho dos átomos tem fundamental importância nesse mecanismo, porque átomos menores que os da matriz tendem a formar soluções sólidas intersticiais, enquanto átomos de tamanho igual aos da matriz formam soluções sólidas substitucionais. Por outro lado, átomos maiores que os da matriz não são solúveis na matriz e por isso não ocorre difusão.

Machado *et al.* (2009) afirmam que o mecanismo de difusão ocorre graças à presença de uma zona de aderência, também chamada de zona morta ou zona de fluxo, na interface ferramenta-cavaco. As velocidades relativas entre peça e ferramenta de corte ou entre cavaco e ferramenta são elevadas e o tempo em que esses materiais ficam em contato é muito pequeno, assim a difusão seria mínima. Porém, por causa da zona de aderência, há tempo suficiente para que a difusão ocorra.

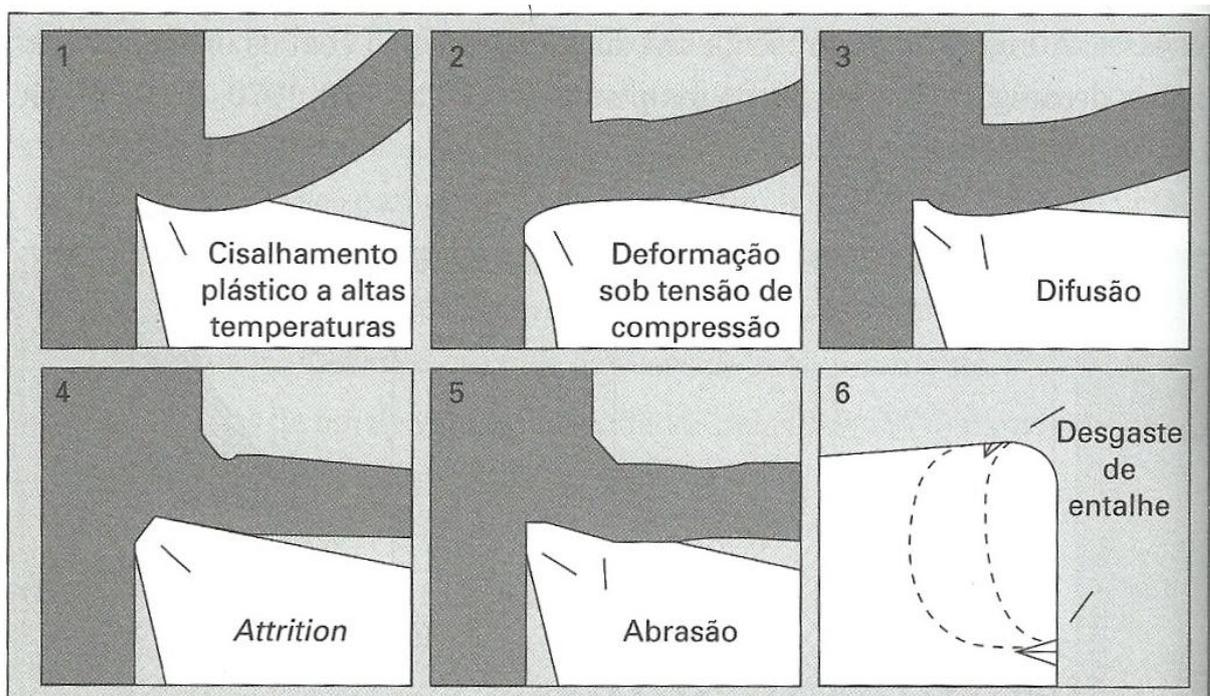
Pigari (1995) afirma que a oxidação da ferramenta de corte ocorre devido ao aquecimento da aresta de corte, proporcionando a formação de uma película de óxido na superfície de saída e próximo à aresta lateral de corte. Segundo Ferraresi (1970), a oxidação muitas vezes provoca o desgaste da aresta lateral de corte, o que rapidamente prejudica o acabamento superficial das peças usinadas, causando o fim de vida da ferramenta.

Um outro mecanismo de desgaste é o de aderência e arrastamento, também chamado de *attrition*. Machado *et al.* (2009) afirmam que o *attrition* acontece, geralmente, em baixas

velocidades de corte, nas quais o fluxo de material sobre a superfície de saída da ferramenta se torna irregular. Nesses casos, fragmentos microscópicos são arrancados da superfície da ferramenta e arrastados junto ao fluxo de material adjacente à interface.

De acordo com Machado *et al.* (2009), existem na literatura variações quanto à classificação dos mecanismos de desgaste, entretanto, a maioria dos estudos existentes considera pelo menos seis mecanismos diferentes (TRENT e WRIGHT, 2000), conforme Figura 17. É possível observar que Trent e Wright (2000) consideram a deformação plástica como mecanismo de desgaste (mecanismos 1 e 2 da Figura 17). Por outro lado, a deformação plástica é considerada por Machado *et al.* (2009) como uma forma de desgaste da ferramenta de corte, assim como o desgaste e a avaria.

Figura 17 – Mecanismos de desgaste que ocorrem nas ferramentas de corte.



Fonte: MACHADO *et al.*, 2009.

3.8 Liga Ti-6Al-4V

De acordo com Ezugwu e Wang (1997), as ligas de titânio passam por uma transformação alotrópica na temperatura de 882°C, em que a estrutura hexagonal compacta da fase α se transforma na estrutura cúbica de corpo centrado da fase β . Alguns elementos químicos que podem ser adicionados a uma liga de titânio tendem a estabilizar a fase α ou a fase β , e dessa forma alteram sua temperatura de transformação. As ligas de titânio podem ser divididas

em quatro grupos, de acordo com as suas características metalúrgicas básicas: ligas α , ligas quase α , ligas α - β e ligas β . A liga Ti-6Al-4V é considerada uma liga α - β . Esse grupo de ligas contém estabilizadores α e β e possui microestrutura com as fases α e β . Essas ligas podem ter altos valores de resistência mecânica através da realização de tratamentos térmicos, sendo possível a utilização das mesmas em aplicações que exigem alta resistência mecânica em altas temperaturas (entre 350 e 400°C).

Ezugwu e Wang (1997) afirmam que o alumínio (Al), o oxigênio (O), o nitrogênio (N) e o carbono (C) aumentam a temperatura de transformação e portanto são estabilizadores α . Por outro lado, alguns elementos reduzem essa temperatura e são assim estabilizadores β . Alguns exemplos são: molibdênio (Mo), vanádio (V), nióbio (Nb), cobre (Cu) e silício (Si).

Segundo Zimmer (2011), a liga Ti-6Al-4V é encontrada com maior frequência na condição recozida, em que a liga contém um pequeno montante da fase β (cerca de 10% do volume na temperatura ambiente) e α a fase dominante (aproximadamente 90% do volume na temperatura ambiente). Sendo assim, nesse caso, as propriedades físicas e mecânicas da fase α serão dominantes.

Pires (2011) aponta que apesar da forma recozida ser a mais comum comercialmente, alguns tratamentos térmicos também podem ser empregados. Por exemplo, para melhorar a usinabilidade da liga Ti-6Al-4V, essa deve ser aquecida até aproximadamente 730°C, mantida nesta temperatura por 4 horas, procedendo com resfriamento no próprio forno até uma temperatura de 25°C. Esse tratamento é chamado de recozimento laminado (*mill annealing*).

Leva (2012) afirma que a liga Ti-6Al-4V possui excelentes propriedades, como boa conformabilidade mecânica, elevada resistência à fadiga e ótima resistência à corrosão. A presença do alumínio nessa liga aumenta a resistência mecânica em altas temperaturas, enquanto a adição de 4% de vanádio aumenta a resistência mecânica por dois mecanismos: por solução sólida e por estabilizar a fase β na temperatura ambiente. Essa liga, inicialmente desenvolvida para uso aeronáutico e espacial, é também amplamente utilizada como biomaterial.

Conforme Ezugwu, Bonney e Yamane (2003), as ligas de titânio possuem uma alta razão resistência mecânica/peso, tornando sua aplicação bastante viável em motores de aeronaves e na produção de fuselagens. A utilização de ligas de titânio como materiais componentes de motores se deve à capacidade de manter sua resistência mecânica em elevadas

temperaturas de operação. Essas ligas também possuem uma excelente resistência à corrosão, o que elimina gastos com revestimentos protetores, utilizados quando o material aplicado é o aço. Além disso, as ligas de titânio são aplicadas em compressores de alta pressão e também de baixa pressão.

Ezugwu, Bonney e Yamane (2003) afirmam que as ligas de titânio fazem parte de 30% da massa de motores em projetos comerciais e 40% em projetos militares. Essa porcentagem deve aumentar se melhores técnicas de processamento forem desenvolvidas, o que elimina defeitos que são prejudiciais a uma operação eficiente do motor como consequência da falha prematura de seus componentes. Segundo Oliveira (2010), a liga Ti-6Al-4V é a liga de titânio mais utilizada atualmente, já que aproximadamente 90% de todo o Ti fundido é destinado para a produção dessa liga.

Zimmer (2011) afirma que a liga Ti-6Al-4V possui um ótimo desempenho em tração e que é o material metálico que possui a maior razão resistência mecânica/densidade. Sua densidade chega a ser bem menor que a de alguns tipos de aço e ao mesmo tempo sua resistência mecânica é bem maior, como mostra a Tabela 3.

Tabela 3 - Comparação de resistência mecânica e densidade de diferentes materiais metálicos.

Material	Limite de Resistência à Tração (MPa)	Densidade (g/cm ³)
Liga de aço SAE 1020 recozida	395	7,85
Liga de aço inox SAE 316 recozida	620	8,00
Liga de alumínio SAE 1100 recozida	90	2,71
Liga de titânio Ti-6Al-4V recozida	900	4,43
Titânio puro recozido	240	4,51

Fonte: CALLISTER, 2008.

4 MATERIAIS E MÉTODOS

Os ensaios realizados nos corpos de prova estão descritos a seguir, juntamente com todo o material necessário para sua realização. Os ensaios foram executados em três laboratórios do DEMAT (Departamento de Engenharia de Materiais) do CEFET-MG: Caracterização e Microscopia, Usinagem por Comando Numérico e Metrologia.

4.1 Corpos de prova

Os corpos de prova utilizados nos ensaios foram a liga de titânio Ti-6Al-4V. Uma barra trefilada e recozida desse material foi adquirida da empresa Sandinox Comércio, Importação e Exportação Ltda com as seguintes dimensões: 25,4 mm de diâmetro e 3000 mm de comprimento. As Tabelas 4 e 5 mostram a composição química e as principais propriedades mecânicas da liga Ti-6Al-4V.

Tabela 4 - Composição química da liga Ti-6Al-4V.

Composição química em peso (%)							
C	V	Al	Ti	O	Fe	H	N
0,03	4,18	6,12	Saldo	0,12	0,16	0,0019	0,01

Fonte: SANDINOX COMÉRCIO, IMPORTAÇÃO E EXPORTAÇÃO LTDA.

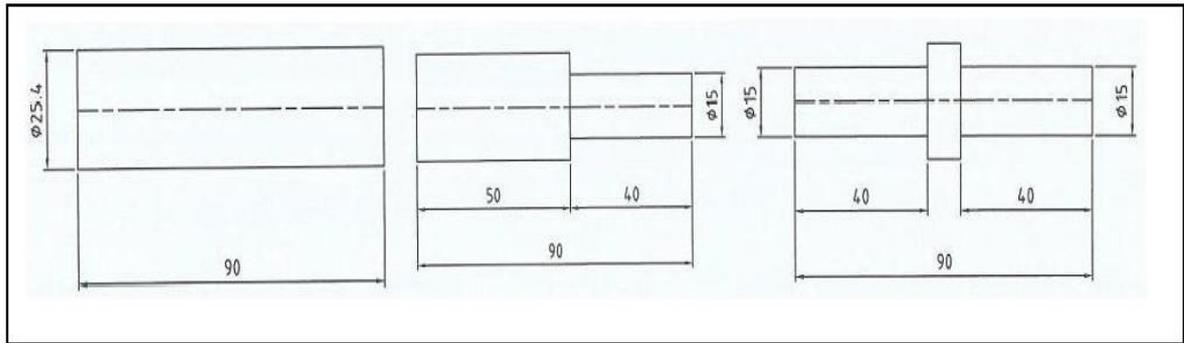
Tabela 5 - Propriedades da liga Ti-6Al-4V.

Propriedades	
Alongamento: 17%	Módulo de Elasticidade: 110 GPa
Escoamento: 876 MPa	Condutividade Térmica: 6,6 W/m.K
Limite de Resistência à Tração: 925 MPa	Temperatura de Fusão: 1670 °C
Redução de área: 49 %	Coef. de Exp. Térmica: $8,4 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C}$

Fonte: SANDINOX COMÉRCIO, IMPORTAÇÃO E EXPORTAÇÃO LTDA.

A partir da barra adquirida, os corpos de prova foram serrados e faceados com o objetivo de obter um comprimento de 90 mm. Em seguida, esses foram usinados de acordo com a sequência mostrada na Figura 18. O comprimento útil de usinagem foi de 40mm, assim cada corpo de prova foi utilizado para a realização de dois testes, sendo um deles a réplica para a validação dos resultados. Para que a rigidez do sistema máquina-ferramenta fosse mantida, o diâmetro dos corpos de prova foi reduzido até 15 mm apenas.

Figura 18 - Sequência de usinagem dos corpos de prova.



Fonte: Próprio autor.

Com o intuito de alcançar uma confiabilidade aceitável dos ensaios, foi realizada a réplica de cada teste. Então, foi calculada a média aritmética dos resultados obtidos em cada teste e sua respectiva réplica.

4.2 Torno CNC

A máquina utilizada foi o torno Romi CNC Centur 30D com placa e contraponto pneumático, torre elétrica de 8 posições, potência de 10 KW, comando Siemens 802 e com número de rotações por minuto máximo de 4000 rpm, conforme Figura 19. A máxima rotação utilizada foi de 3800 rpm, número um pouco menor que o limite máximo permitido. Uma velocidade de corte constante foi obtida a partir da programação da função G96, em que o diâmetro do corpo de prova foi reduzido contanto que o rpm máximo do equipamento não fosse atingido.

Figura 19 – Torno Romi CNC Centur 30D utilizado nos testes.



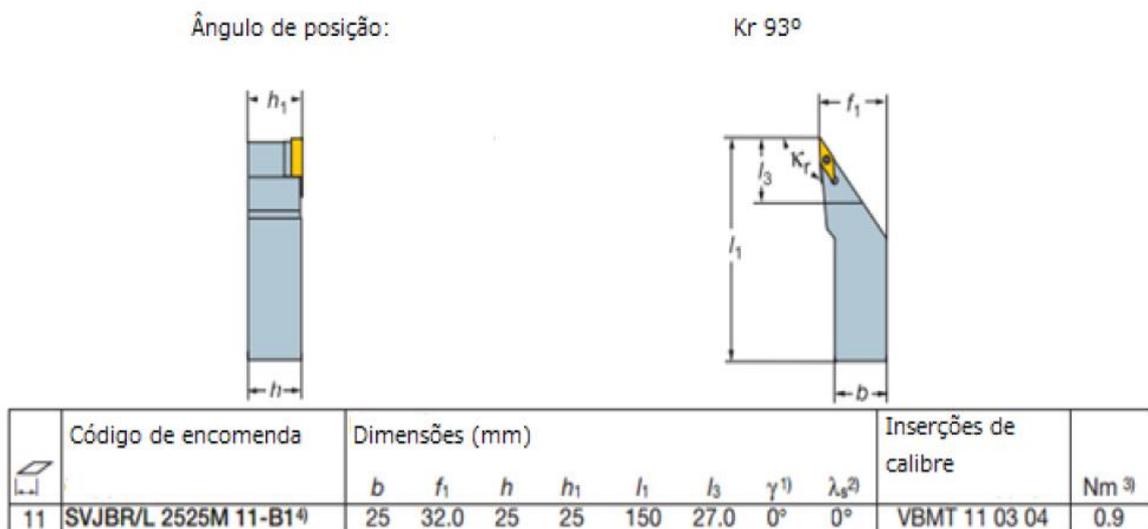
Fonte: Próprio autor.

4.3 Ferramentas de corte e suporte intercambiável

As ferramentas de corte e o suporte intercambiável foram adquiridas da empresa Sandvik Coromant, com as seguintes especificações:

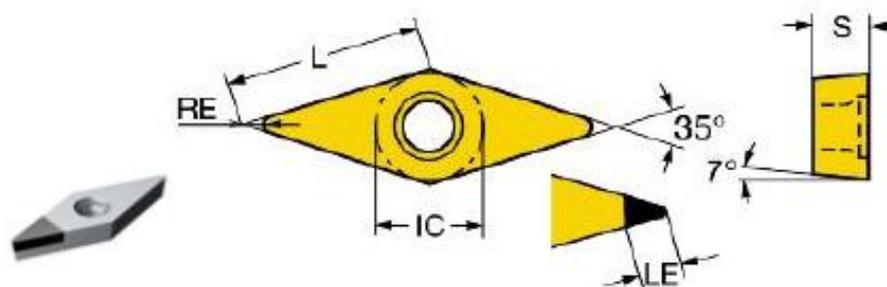
- Porta ferramenta externo SVJBR 2525M11-B1, conforme Figura 20.
- Inseto de diamante policristalino PCD com geometria ISO VCMW 110304-FP classe CD10 com 1 aresta de corte, conforme Figura 21.
- Inseto de metal duro sem revestimento com geometria ISO VBMT 110304-KF classe H13A com 2 arestas de corte, conforme Figura 22.

Figura 20 - Dimensões do Porta ferramenta externo.



Fonte: CATÁLOGO SANDVIK COROMANT, 2012.

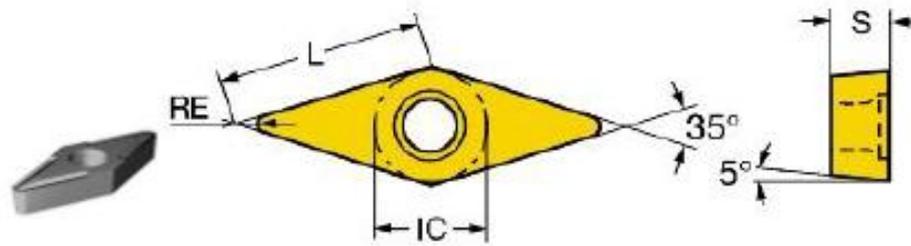
Figura 21 - Inseto intercambiável de PCD utilizado nos testes.



RE) Raio de ponta IC) Círculo Inscrito L) Comprimento total da aresta de corte LE) Comprimento da aresta de PCD S) Espessura

Fonte: CATÁLOGO SANDVIK COROMANT, 2012.

Figura 22 - Inserto intercambiável de metal duro utilizado nos testes.



RE) Raio de ponta IC) Círculo Inscrito L) Comprimento total da aresta de corte LE) Comprimento da aresta de PCD S) Espessura

Fonte: CATÁLOGO SANDVIK COROMANT, 2012.

4.4 Condições de lubri-refrigeração

As condições de lubri-refrigeração foram: a seco e com fluido de corte por jorro. O fluido sintético utilizado no método de jorro foi o Castrol Syntilo 9902 solúvel em água na concentração de 7% em volume com a vazão de aproximadamente 25 L/min recomendado para usinagem de materiais ferrosos, ligas de níquel e titânio.

Um refratômetro portátil ATAGO série MASTER- α , Brix 0.0 a 33,0%, conforme Figura 23, foi utilizado para medir a concentração do fluido de corte aplicado na forma de jorro.

Figura 23 - Refratômetro portátil ATAGO.



Fonte: CATÁLOGO ATAGO.

4.5 Medição do desgaste das ferramentas de corte

A medição do desgaste de flanco das ferramentas de corte foi realizada com o auxílio de um microscópio ferramenteiro com ampliação de 30X e resolução de 0,01 mm, conforme Figura 24.

O critério estabelecido para o fim de vida das ferramentas foi através do desgaste de flanco máximo $VB_{Bmáx} = 0,6$ mm, de acordo com a Norma ISO 3685 (1993), ou tempo de corte próximo de 30 minutos, aplicando-se o que ocorreu primeiro.

Figura 24 - Microscópio Ferramenteiro utilizado para a medição do desgaste de flanco.



Fonte: Próprio autor.

4.6 Caracterização dos mecanismos de desgaste

Os mecanismos de desgaste das ferramentas foram determinados por meio da análise de imagens obtidas através da técnica de Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV), realizada no Laboratório de Caracterização e Microscopia do Departamento de Engenharia de Materiais. A principal finalidade dessa caracterização foi identificar os aspectos dos mecanismos de desgaste envolvidos durante a operação de torneamento.

A Figura 25 apresenta o microscópio eletrônico de varredura utilizado, da marca Shimadzu, modelo SSX 550, Superscan. Foram analisados 19 insertos utilizados nos experimentos e as imagens foram obtidas a partir de elétrons secundários com ampliação de 60 e 120X.

Figura 25 - Microscópio Eletrônico de Varredura utilizado na análise dos mecanismos de desgaste.



Fonte: Próprio autor.

4.7 Procedimento experimental

Como a ferramenta de PCD possui um custo muito maior que a de metal duro, uma menor quantidade de testes foi realizada com o PCD e optou-se por utilizar, nesses casos, condições de corte mais severas. Para a realização dos testes utilizando ferramentas de PCD, os seguintes parâmetros de corte foram analisados:

- Velocidades de corte (v_c): 240 e 300 m/min;
- Avanço (f): 0,05 mm/rotação;
- Profundidade de usinagem (a_p): 0,25 mm;
- Condições de lubri-refrigeração: a seco e com jorro.

Para a realização dos testes com ferramentas de metal duro, os seguintes parâmetros foram utilizados:

- Velocidades de corte (v_c): 60; 80, 120 e 240 m/min;

- Avanço (f): 0,05 e 0,10 mm/rotação;
- Profundidade de usinagem (a_p): 0,25 mm;
- Condições de lubri-refrigeração: a seco e com jorro.

No caso das ferramentas de metal duro, cada ferramenta possui duas arestas, sendo que uma foi utilizada como réplica dos testes.. A Tabela 6 mostra os parâmetros de usinagem e condições de lubri-refrigeração utilizados nos testes.

Tabela 6 - Parâmetros de usinagem e condições de lubri-refrigeração.

Ferramenta	Lubri-Refrig.	v_c (m/min)	mm/rot.	a_p (mm)
MD – H13A	SECO	60	0,1	0,25
MD – H13A	SECO	120	0,1	0,25
MD – H13A	SECO	180	0,1	0,25
MD – H13A	SECO	240	0,1	0,25
MD – H13A	JORRO	60	0,1	0,25
MD – H13A	JORRO	120	0,1	0,25
MD – H13A	JORRO	180	0,1	0,25
MD – H13A	JORRO	240	0,1	0,25
MD – H13A	SECO	60	0,05	0,25
MD – H13A	SECO	120	0,05	0,25
MD – H13A	SECO	180	0,05	0,25
MD – H13A	SECO	240	0,05	0,25
MD – H13A	JORRO	60	0,05	0,25
MD – H13A	JORRO	120	0,05	0,25
MD – H13A	JORRO	180	0,05	0,25
MD – H13A	JORRO	240	0,05	0,25
PCD-CD10	JORRO	240	0,05	0,25
PCD-CD10	JORRO	300	0,05	0,25
PCD-CD10	SECO	240	0,05	0,25

Fonte: Próprio autor.

5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

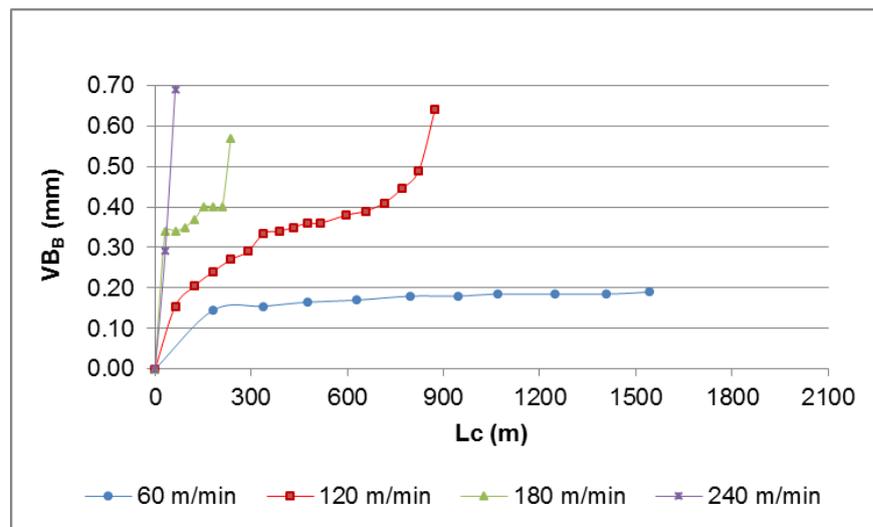
Este capítulo apresenta os resultados obtidos nos ensaios para todas as ferramentas de corte utilizadas.

5.1 Desgaste de flanco

Os valores médios dos desgastes de flanco das ferramentas, avaliados pelo parâmetro $VB_{Bmáx}$, são apresentados nas Figuras 26 a 29 para cada condição de usinagem analisada.

Observa-se na Figura 26 o desgaste de flanco da ferramenta de metal duro em função do comprimento de corte na condição a seco, com avanço de 0,1 mm/rot. e com velocidades de corte de 60 m/min., 120 m/min., 180 m/min. e 240 m/min.

Figura 26 – Desgaste de flanco (VB_B) em função do comprimento de corte na condição a seco utilizando avanço de 0,10 mm/rot.



Fonte: Próprio autor.

É possível observar que na velocidade de corte de 60 m/min., o tempo de corte em torno de 30 minutos foi o critério de fim de vida adotado. O comprimento usinado foi de 1543 m e o desgaste de flanco de 0,19 mm.

Com as velocidades de 120 m/min, 180 m/min e 240 m/min., o desgaste de flanco máximo de 0,6 mm foi atingido e os testes foram interrompidos por causa disso. Com a velocidade de corte de 120 m/min., o tempo de usinagem foi de 7,8 minutos e comprimento usinado de 873 m. Com a velocidade de corte de 180 m/min., o tempo de corte foi de 1,31 minutos e comprimento de corte de 236 m. Por outro lado, na condição de corte de 240 m/min.,

somente duas passadas foram realizadas, com tempo de usinagem de apenas 15,7 segundos e comprimento de corte de 63 m. A Tabela 7 mostra os dados obtidos a partir do gráfico da Figura 26.

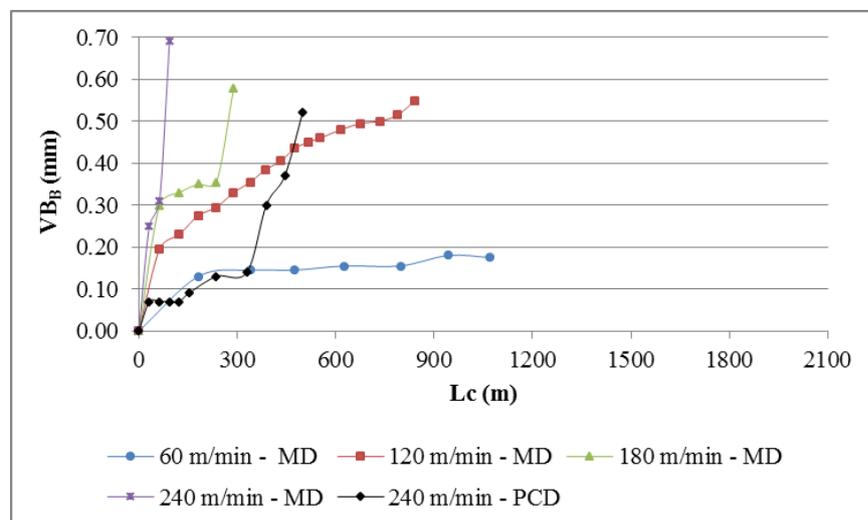
Tabela 7 – Dados obtidos na condição a seco utilizando avanço de 0,10 mm/rot.

Velocidade de corte (m/min.)	Critério de fim de vida adotado	Tempo de usinagem (minutos)	Comprimento usinado (m)	Desgaste de flanco (mm)
60	Tempo de usinagem de 30 minutos	30	1543	0,19
120	Desgaste de flanco máximo	7,8	873	0,64
180	Desgaste de flanco máximo	1,31	236	0,57
240	Desgaste de flanco máximo	0,261	63	0,69

Fonte: próprio autor.

A Figura 27 mostra o desgaste de flanco das ferramentas de PCD e metal duro em função do comprimento de corte na condição a seco e com avanço de 0,05 mm/rot.

Figura 27 – Desgaste de flanco (VB_B) em função do comprimento de corte na condição a seco utilizando avanço de 0,05 mm/rot.



Fonte: Próprio autor.

Novamente na velocidade de corte de 60m/min., o critério de fim de vida foi o tempo de usinagem por volta de 30 minutos. Nessa velocidade de corte, o comprimento usinado foi de 1068 mm e o desgaste de flanco de 0,18 mm. É possível observar também que nas velocidades de corte de 120 m/min., 180 m/min., e 240 m/min., foram interrompidos os testes quando atingiu-se desgaste de flanco máximo de 0,6 mm. Na velocidade de corte de 120 m/min., o tempo de corte foi de 14 minutos e comprimento de corte de 842 m, enquanto na velocidade de corte de 180 m/min., o tempo de corte foi de 3,2 minutos e comprimento de corte de 289 m. Na condição de corte de 240 m/min., com a ferramenta de metal duro, foram somente três passadas com tempo de corte de apenas 46 segundos e comprimento de corte de 93 m.

Entretanto, utilizando a ferramenta de PCD na velocidade de corte de 240m/min., o comprimento usinado foi de 499 m e tempo de usinagem de 4 minutos. Com a ferramenta de PCD, foi obtido um desempenho 436,6% maior em relação à ferramenta de metal duro. A Tabela 8 mostra os dados obtidos a partir do gráfico da Figura 27.

Tabela 8 – Dados obtidos na condição a seco utilizando avanço de 0,05 mm/rot.

Velocidade de corte (m/min.)	Critério de fim de vida adotado	Tempo de usinagem (minutos)	Comprimento usinado (m)	Desgaste de flanco (mm)
60 - MD	Tempo de usinagem de 30 minutos	30	1068	0,18
120 - MD	Desgaste de flanco máximo	14	842	0,55
180 - MD	Desgaste de flanco máximo	3,2	289	0,58
240 - MD	Desgaste de flanco máximo	0,767	93	0,69
240 - PCD	Desgaste de flanco máximo	4	499	0,52

Fonte: próprio autor.

Observa-se nas Figuras 28 e 29 o desgaste de flanco das ferramentas de metal duro e de PCD em função do comprimento de corte na condição com jorro, com avanços de 0,10 mm/rot. e 0,05 mm/rot.

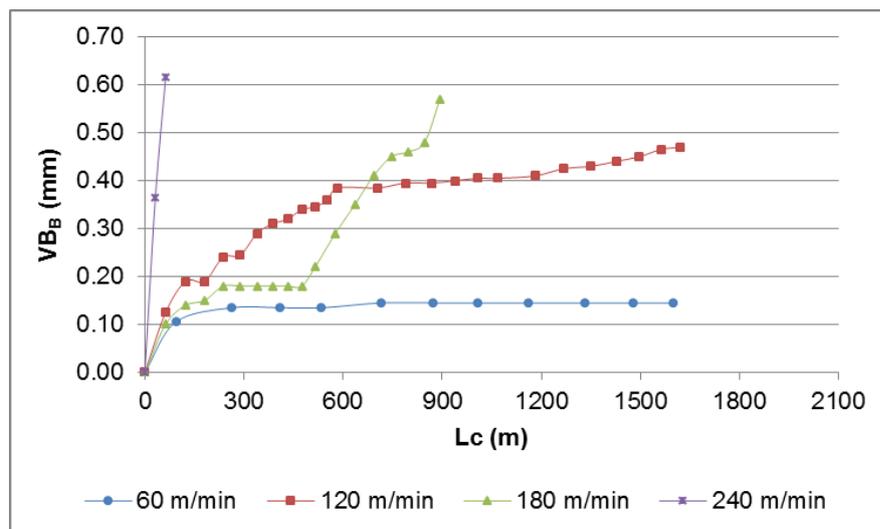
Nas duas condições de avanço com velocidades de corte de 60 m/min. e 120 m/min., é possível observar que o critério de fim de vida adotado foi o tempo de usinagem de aproximadamente de 30 minutos. Nessas duas velocidades, o desgaste medido apresentou uma variação similar em ambos os gráficos. Com a velocidade de corte de 180 m/min. e avanço de 0,10 mm/rot., o comprimento usinado foi maior quando comparado com a condição de mesma velocidade e avanço de 0,05 mm/rot.

Nota-se que utilizando a ferramenta de metal duro na velocidade de corte de 240 m/min. e avanço de 0,1 mm/rot., o comprimento de corte foi de 63 m. Já com avanço de 0,05 mm/rot., o comprimento de corte foi de 181 m.

Contudo, resultados satisfatórios foram obtidos com velocidades de corte de 240 m/min. e 300 m/min., utilizando a ferramenta de PCD com avanço de 0,05 mm/rot. Na condição de corte de 240 m/min., obteve-se um comprimento usinado de 2104 m, tempo de 17,49 minutos e desgaste de flanco de 0,10 mm. Na condição de corte de 300 m/min., o comprimento de corte foi de 800 m com tempo de corte de 5,28 minutos e o desgaste de flanco foi de 0,13 mm.

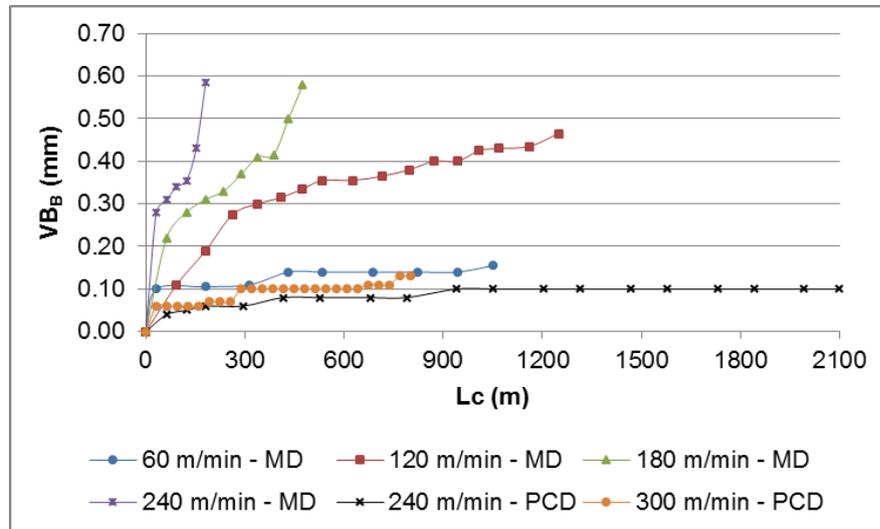
Com velocidade de corte de 300 m/min., 25 corpos de prova foram usinados, em que apenas uma passada foi realizada a partir do diâmetro de 25,4 mm. Essa condição foi necessária por causa da rotação máxima de 3800 rpm limitada pela máquina.

Figura 28 – Desgaste de flanco (VB_B) em função do comprimento de corte na condição com jorro utilizando avanço de 0,10 mm/rot.



Fonte: Próprio autor.

Figura 29 – Desgaste de flanco (VB_B) em função do comprimento de corte na condição com jorro utilizando avanço de 0,05mm/rot.

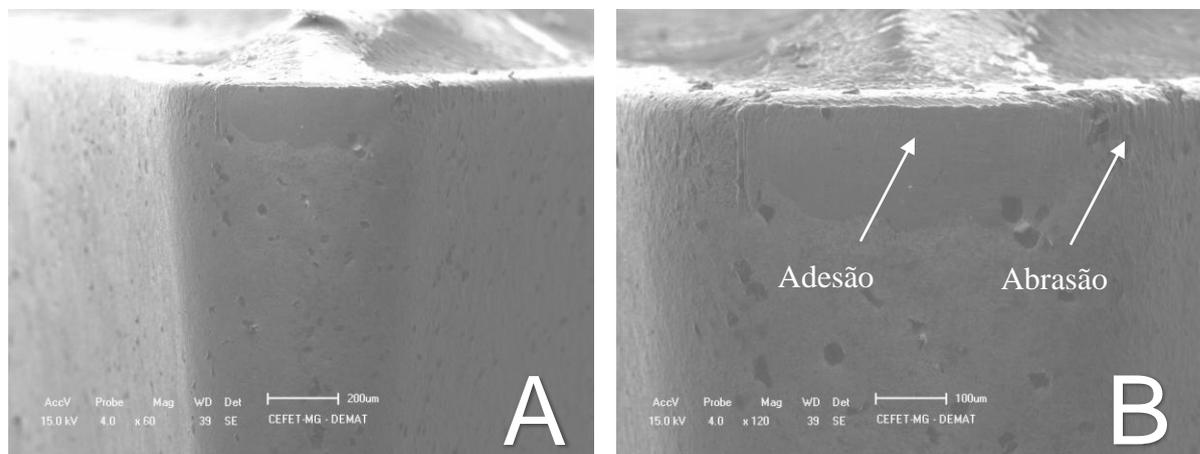


Fonte: Próprio autor.

5.2 Análise dos mecanismos de desgaste

As Figuras 30 a 38 ilustram os aspectos do desgaste das ferramentas na condição a seco. É possível observar na Figura 30 os mecanismos de desgaste de adesão e de abrasão, resultados semelhantes aos obtidos por Silva *et al.* (2013) e Ezugwu *et al.* (2007), respectivamente. Na Figura 31, nota-se que a intensidade do desgaste não foi significativa, porém, observa-se novamente os mecanismos de desgaste de adesão e de abrasão.

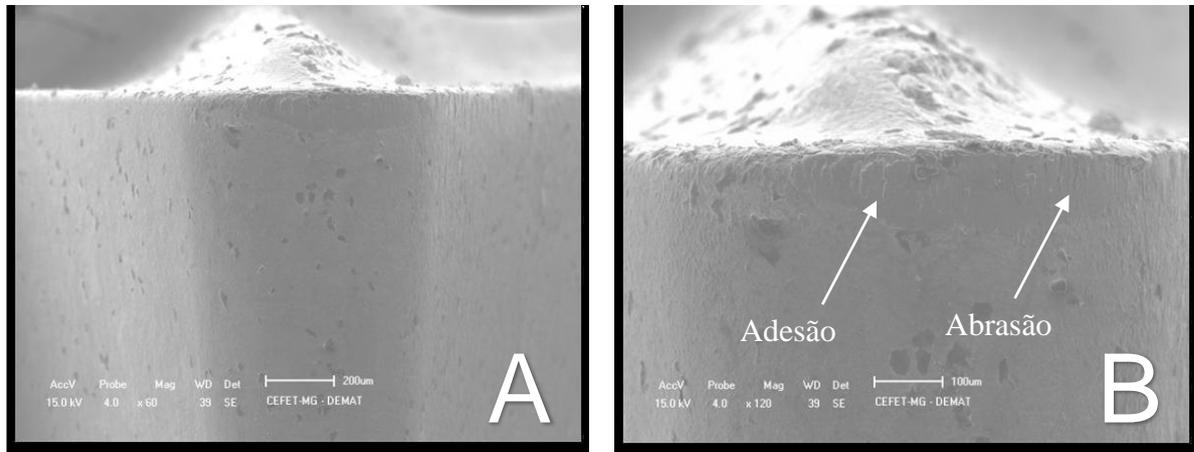
Figura 30 - Aspectos do desgaste da ferramenta de metal duro H13A, a seco, na condição 60 m/min. e 0,1 mm/rot.



A) ampliação de 60X B) ampliação de 120X

Fonte: Próprio autor.

Figura 31 - Aspectos do desgaste da ferramenta de metal duro H13A, a seco, na condição 60 m/min. e 0,05 mm/rot.



A) ampliação de 60X B) ampliação 120X

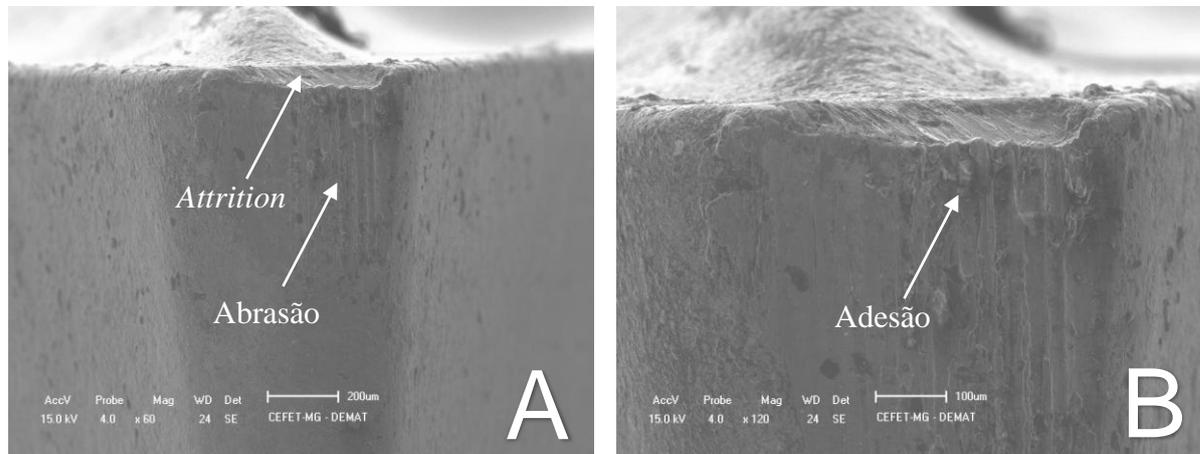
Fonte: Próprio autor.

Devido à baixa condutividade térmica da liga Ti-6Al-4V (aproximadamente 6,6 W/mK), grande parte do calor gerado fica retida na ferramenta de corte, o que prejudica a dissipação de calor, promovendo intenso desgaste e proporcionando um tempo de vida menor, principalmente nas velocidades de corte superiores a 120 m/min.

Observa-se que o desgaste de flanco não é muito intenso nessas duas condições de corte (velocidade de corte de 60 m/min. e avanços 0,10 e 0,05 mm/rot.), porque o critério de fim de vida adotado foi o tempo de usinagem por volta de 30 minutos e não pelo desgaste de flanco máximo de 0,6 mm. Além disso, conforme estabelecido pelo fabricante da ferramenta, nessa condição de corte, o processo ainda está no regime de trabalho de velocidade de corte convencional.

As Figuras 32 e 33 mostram os mecanismos de desgaste de abrasão, conforme Ezugwu *et al.* (2007), de adesão, conforme Silva *et al.* (2013), e *attrition*, resultado semelhante ao obtido por Wang, Wong e Rahman (2005). Nota-se que em ambos avanços, o desgaste na velocidade de corte de 60 m/min. é bem menos intenso do que na velocidade de corte de 120 m/min.

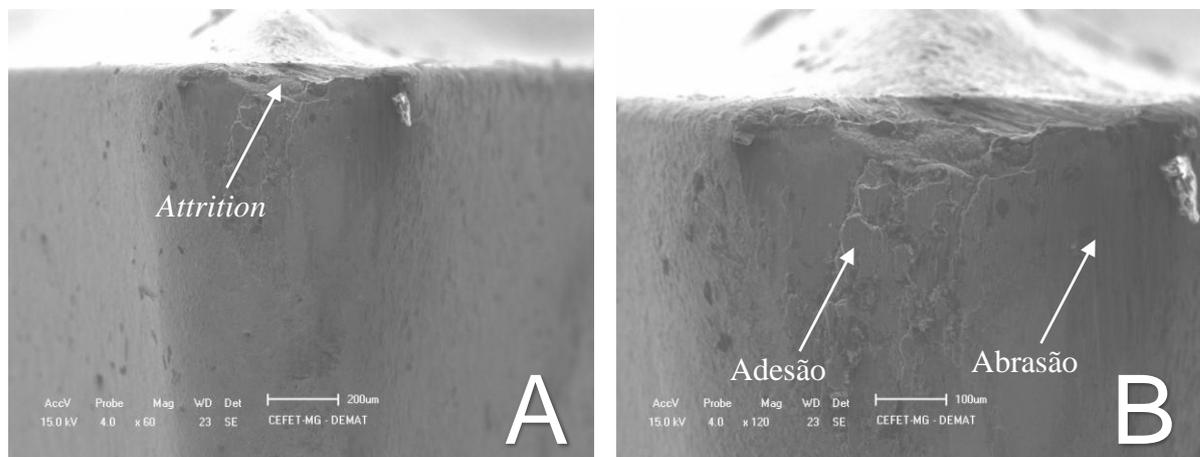
Figura 32 - Aspectos do desgaste da ferramenta de metal duro H13A, a seco, na condição 120 m/min. e 0,10 mm/rot.



A) ampliação de 60X B) ampliação 120X

Fonte: Próprio autor.

Figura 33 - Aspectos do desgaste da ferramenta de metal duro H13A, a seco, na condição 120 m/min. e 0,05 mm/rot.

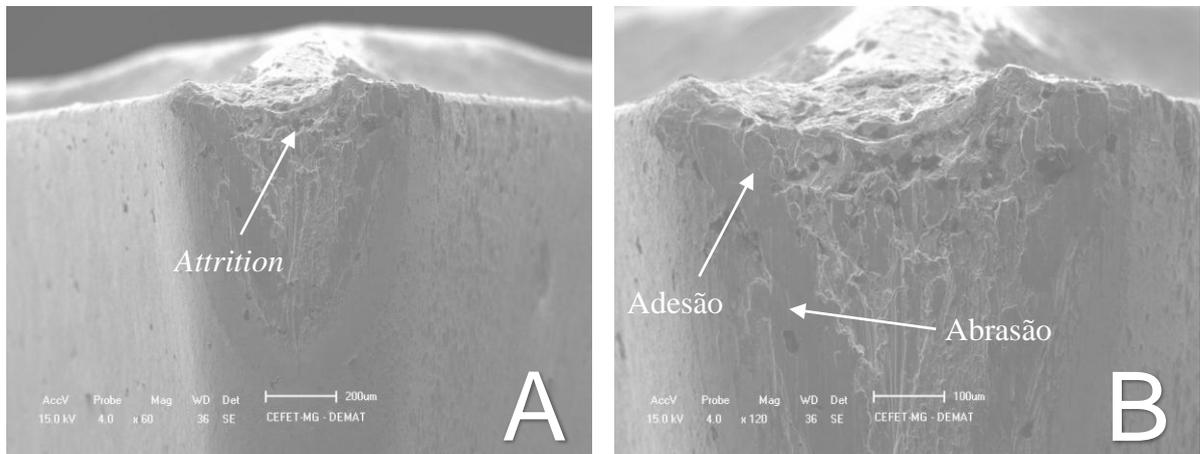


A) ampliação de 60X B) ampliação 120X

Fonte: Próprio autor.

Verifica-se na Figura 34 os mecanismos de desgastes de adesão, conforme Silva *et al.* (2013), de abrasão, conforme Ezugwu *et al.* (2007) e *attrition*, conforme Wang, Wong e Rahman (2005). Entretanto, na Figura 35, observa-se os mecanismos de desgaste de adesão e de abrasão. Na velocidade de corte de 180 m/min., o desgaste foi bem menos intenso com avanço de 0,05 mm/rot em relação ao avanço de 0,10 mm/rot.

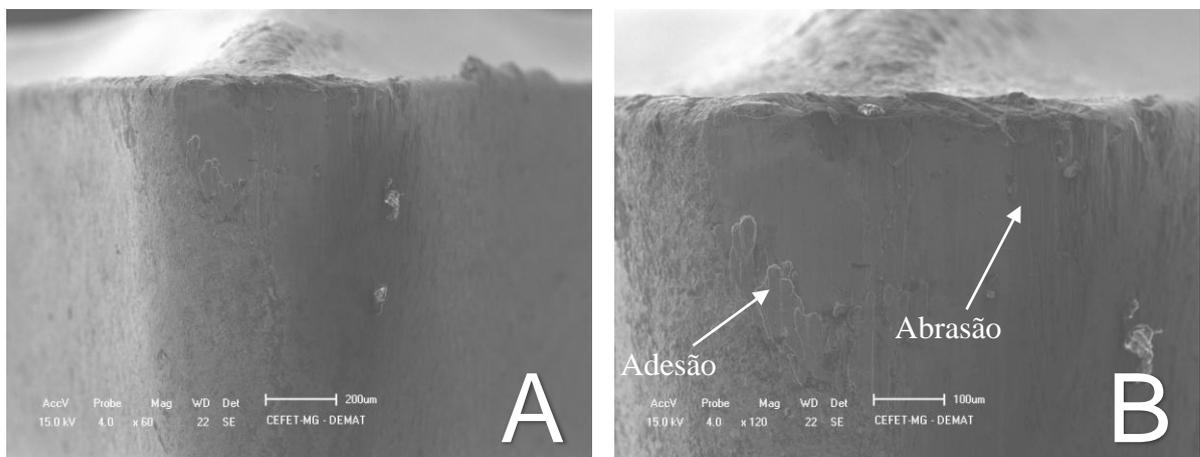
Figura 34 - Aspectos do desgaste da ferramenta de metal duro H13A, a seco, na condição 180 m/min. e 0,10 mm/rot.



A) ampliação de 60X B) ampliação 120X

Fonte: Próprio autor.

Figura 35 - Aspectos do desgaste da ferramenta de metal duro H13A, a seco, na condição 180 m/min. e 0,05 mm/rot.

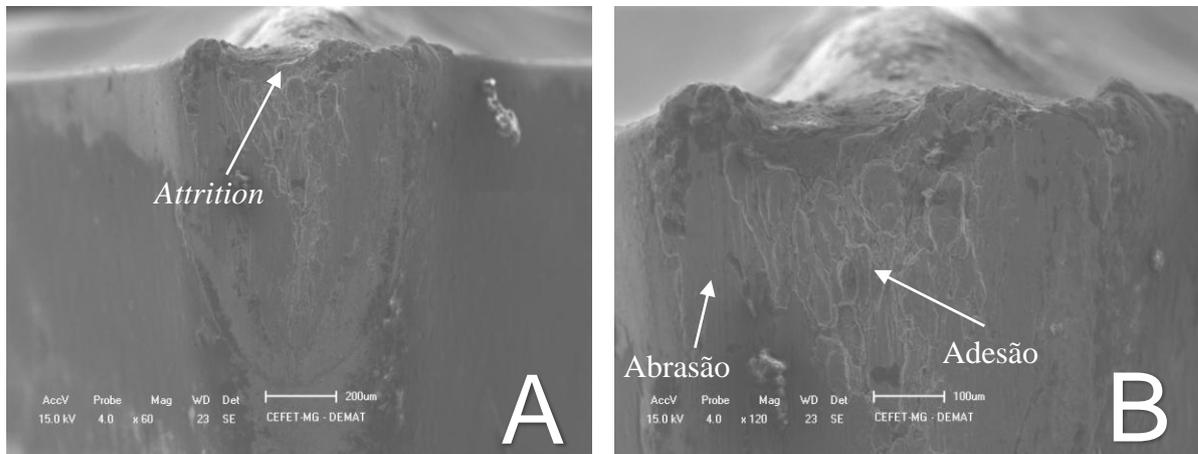


A) ampliação de 60X B) ampliação 120X

Fonte: Próprio autor.

É possível observar na Figura 36 os mecanismos de desgaste de adesão, conforme Silva *et al.* (2013), de abrasão, conforme Ezugwu *et al.* (2007), e *attrition*, conforme Wang, Wong e Rahman (2005). Porém, na Figura 37, observa-se os mecanismos de desgaste de adesão e de abrasão. Nota-se que nessa condição de corte, o desgaste de flanco é mais intenso quando comparado com as demais velocidades e o fim de vida da ferramenta é atingido rapidamente, o que dificulta o controle do desgaste ($VB_{Bm\acute{a}x}$) especificado de 0,6 mm.

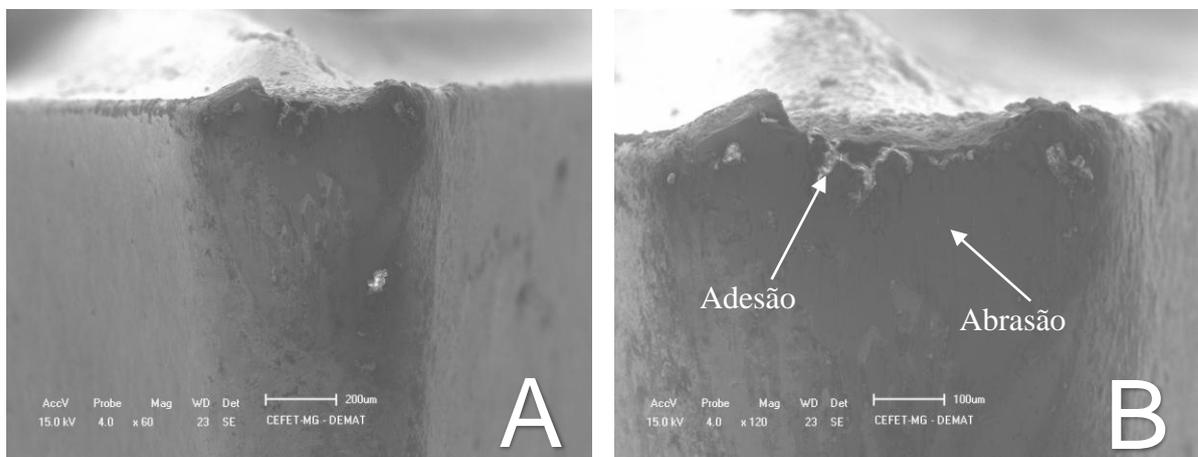
Figura 36 - Aspectos do desgaste da ferramenta de metal duro H13A, a seco, na condição 240 m/min. e 0,10 mm/rot.



A) ampliação de 60X B) ampliação 120X

Fonte: Próprio autor.

Figura 37 - Aspectos do desgaste da ferramenta de metal duro H13A, a seco, na condição 240 m/min. e 0,05 mm/rot.

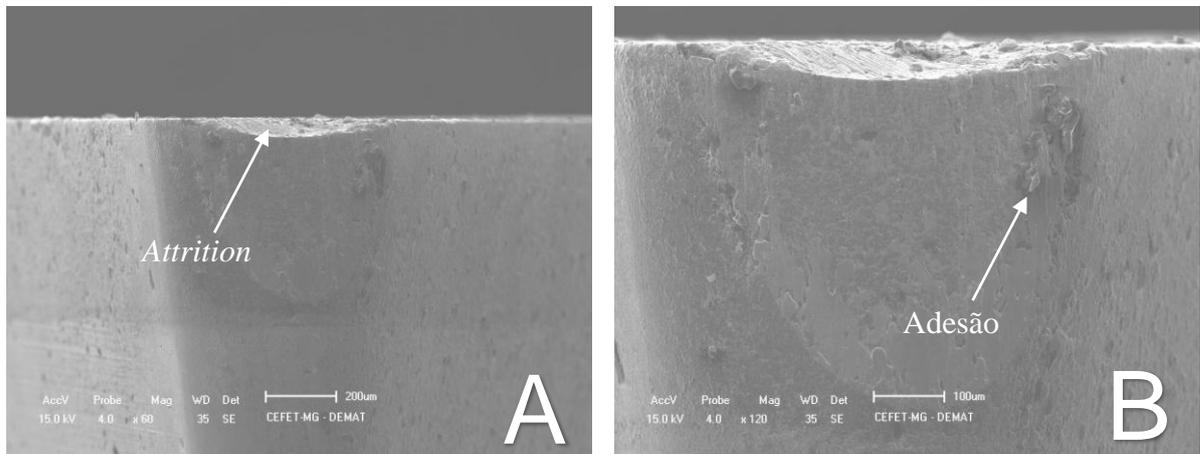


A) ampliação de 60X B) ampliação 120X

Fonte: Próprio autor.

A condição a seco com velocidade de corte de 240 m/min. e avanço de 0,05 mm/rot. utilizando a ferramenta de PCD é mostrada na Figura 38. Observa-se os mecanismos de desgaste de adesão, conforme Silva *et al.* (2013), e *attrition*, conforme Wang, Wong e Rahman (2005). A intensidade do desgaste foi menor em comparação com as mesmas condições utilizando a ferramenta de metal duro.

Figura 38 - Aspectos do desgaste da ferramenta de PCD CD10, a seco, na condição 240 m/min. e 0,05 mm/rot.

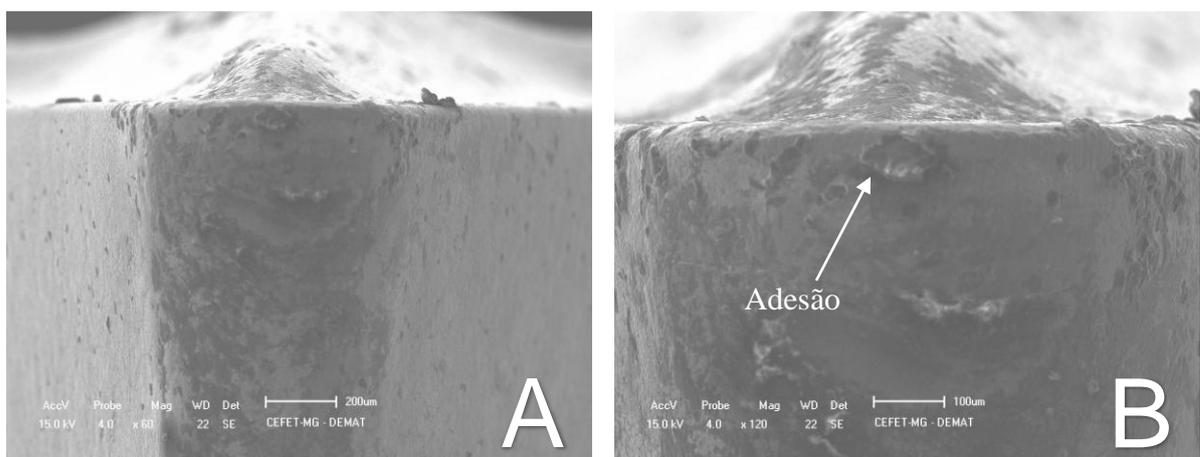


A) ampliação de 60X B) ampliação 120X

Fonte: Próprio autor.

As Figuras 39 a 48 ilustram o desgaste das ferramentas na condição com jorro. Observa-se nas Figuras 39 e 40 o mecanismo de desgaste de adesão, conforme Silva *et al.* (2013), na condição com velocidade de corte de 60 m/min. É possível observar que o desgaste de flanco das ferramentas de corte não é muito intenso em ambos os avanços, já que nesses casos, o critério de fim de vida adotado foi o tempo de usinagem de aproximadamente 30 minutos.

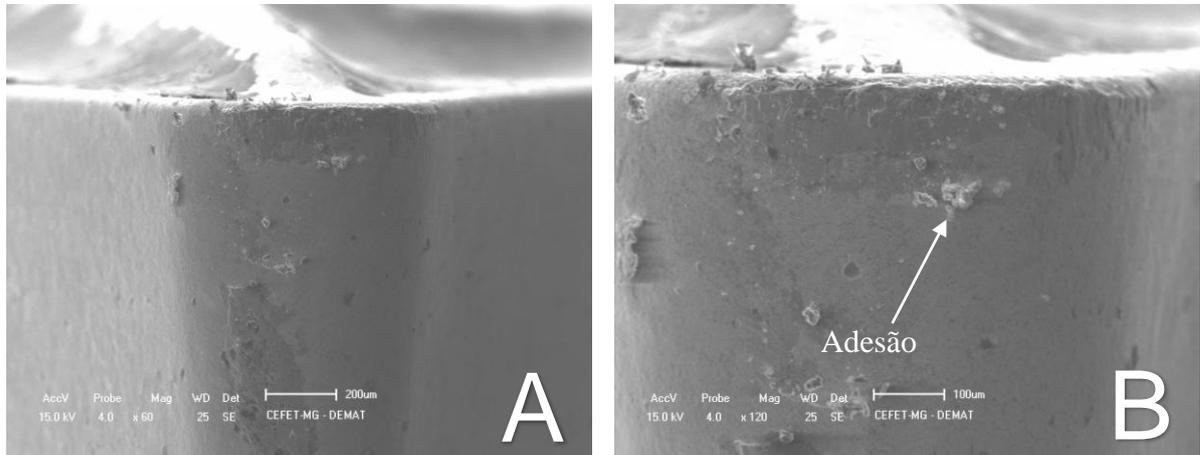
Figura 39 - Aspectos do desgaste da ferramenta de metal duro H13A, com jorro, na condição 60 m/min. e 0,10 mm/rot.



A) ampliação de 60X B) ampliação 120X

Fonte: Próprio autor.

Figura 40 - Aspectos do desgaste da ferramenta de metal duro H13A, com jorro, na condição 60 m/min. e 0,05 mm/rot.

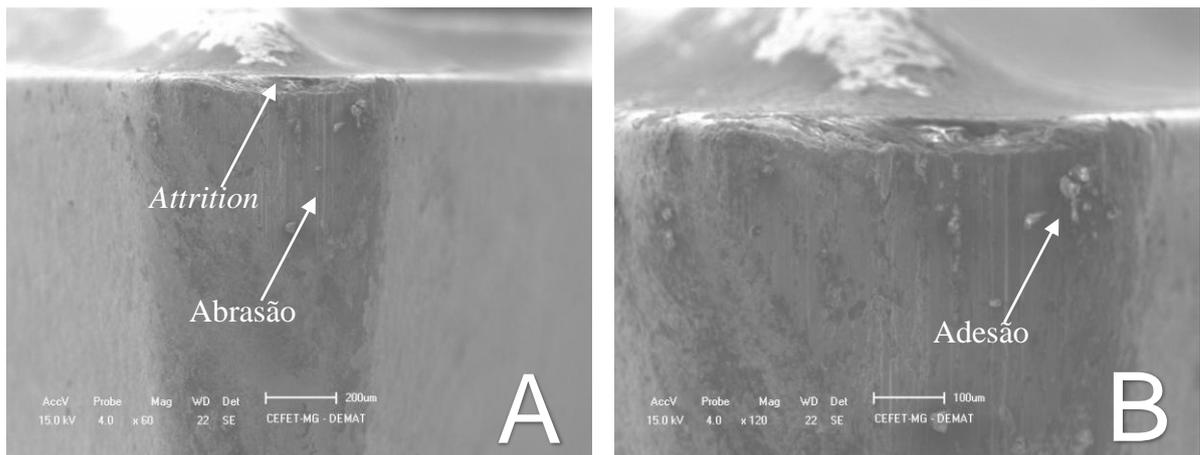


A) ampliação de 60X B) ampliação 120X

Fonte: Próprio autor.

Observa-se nas Figuras 41 e 42 o mecanismo de desgaste abrasivo, conforme Ezugwu *et al.* (2007). Além disso, ocorrem também os mecanismos de desgaste de adesão, conforme Silva *et al.* (2013), e *attrition*, conforme Wang, Wong e Rahman (2005), na condição com método de lubri-refrigeração por jorro e velocidade de corte de 120 m/min.

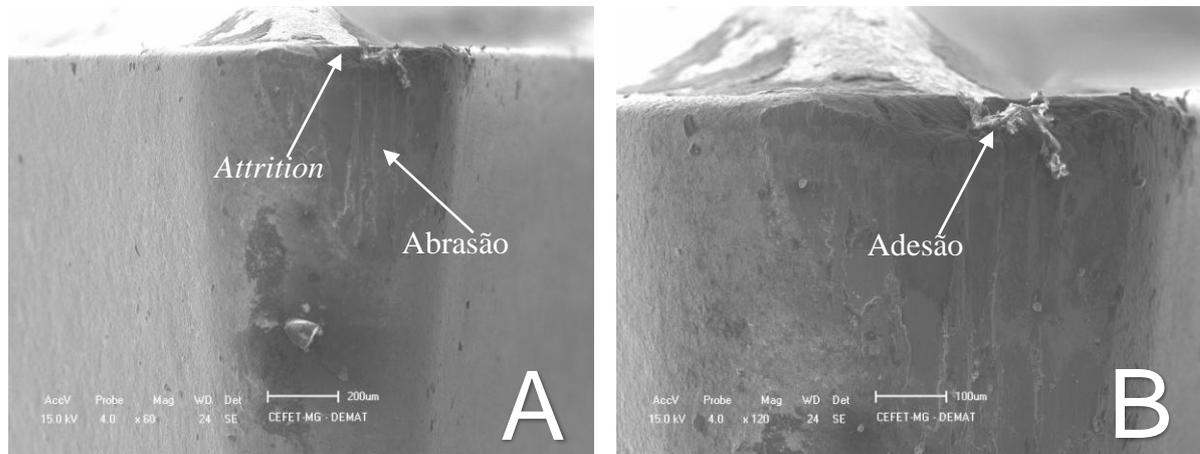
Figura 41 - Aspectos do desgaste da ferramenta de metal duro H13A, com jorro, na condição 120 m/min. e 0,10 mm/rot.



A) ampliação de 60X B) ampliação 120X

Fonte: Próprio autor.

Figura 42 - Aspectos do desgaste da ferramenta de metal duro H13A, com jorro, na condição 120 m/min. e 0,05 mm/rot.

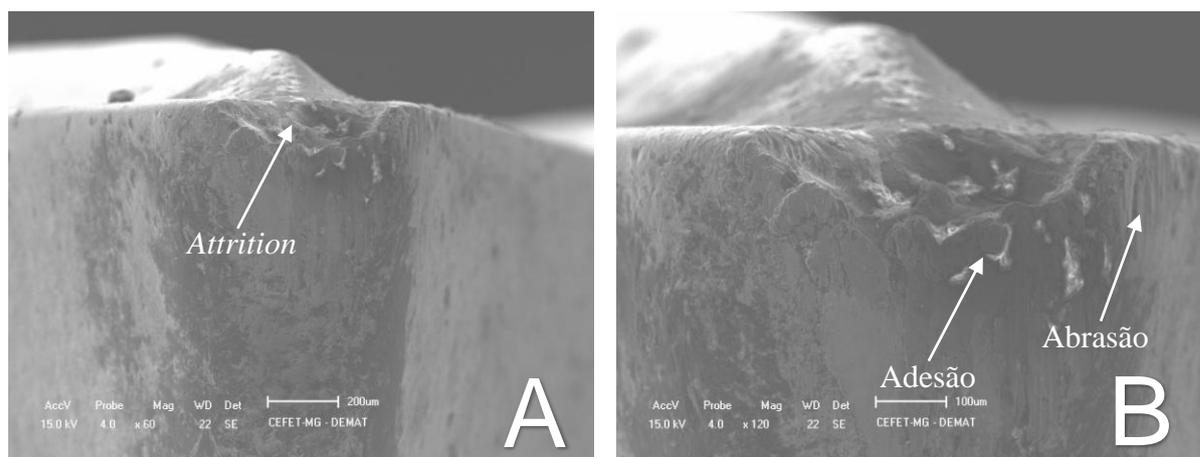


A) ampliação de 60X B) ampliação 120X

Fonte: Próprio autor.

Nota-se nas Figuras 43 e 44 os mecanismos de desgaste de adesão, conforme Silva *et al.* (2013), de abrasão, conforme Ezugwu *et al.* (2007), e *attrition*, conforme Wang, Wong e Rahman (2005), na velocidade de corte de 180 m/min. Novamente é possível observar que com avanço de 0,10 mm/rot., a intensidade do desgaste é maior em relação ao avanço de 0,05 mm/rot.

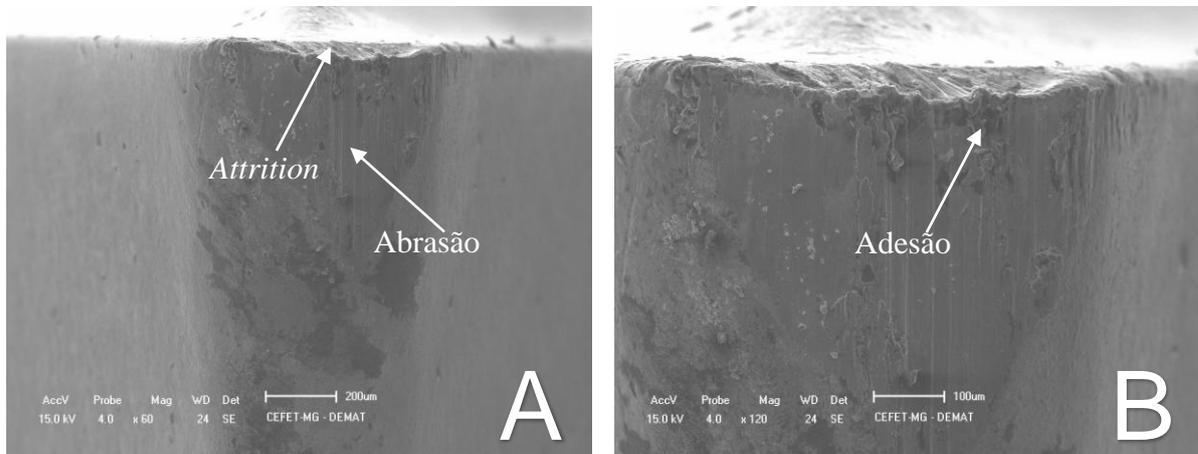
Figura 43 - Aspectos do desgaste da ferramenta de metal duro H13A, com jorro, na condição 180 m/min. e 0,10mm/rot.



A) ampliação de 60X B) ampliação 120X

Fonte: Próprio autor.

Figura 44 - Aspectos do desgaste da ferramenta de metal duro H13A, com jorro, na condição 180 m/min. e 0,05mm/rot.

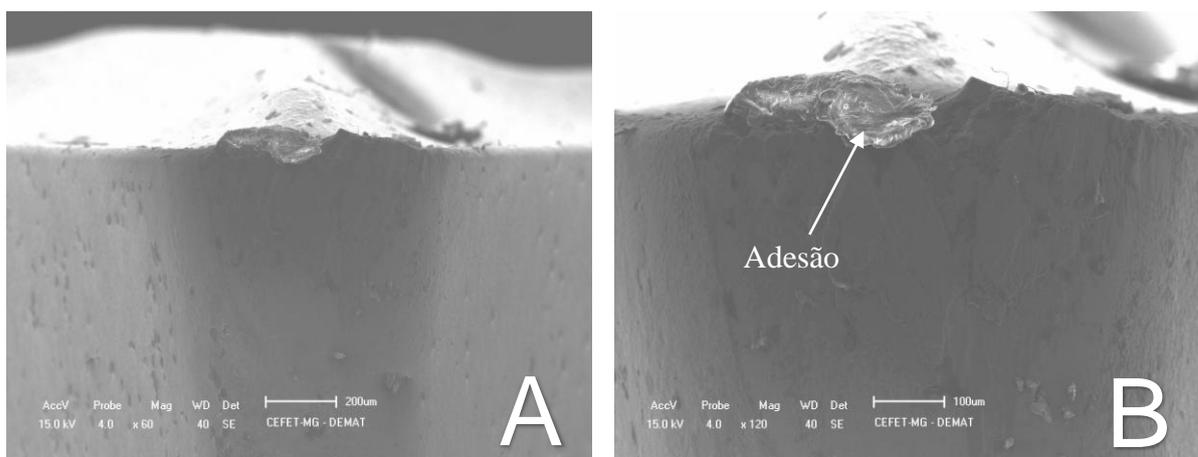


A) ampliação de 60X B) ampliação 120X

Fonte: Próprio autor.

A Figura 45 mostra o mecanismo de desgaste de adesão, conforme Silva *et al.* (2013), na velocidade de corte de 240 m/min. Por outro lado, a Figura 46 mostra os mecanismos de adesão, conforme Silva *et al.* (2013), de abrasão, conforme Ezugwu *et al.* (2007), e *attrition*, conforme Wang, Wong e Rahman (2005). Nesse caso, pode-se observar que com avanço de 0,10 mm/rot., a intensidade do desgaste é menor em relação ao avanço de 0,05 mm/rot.

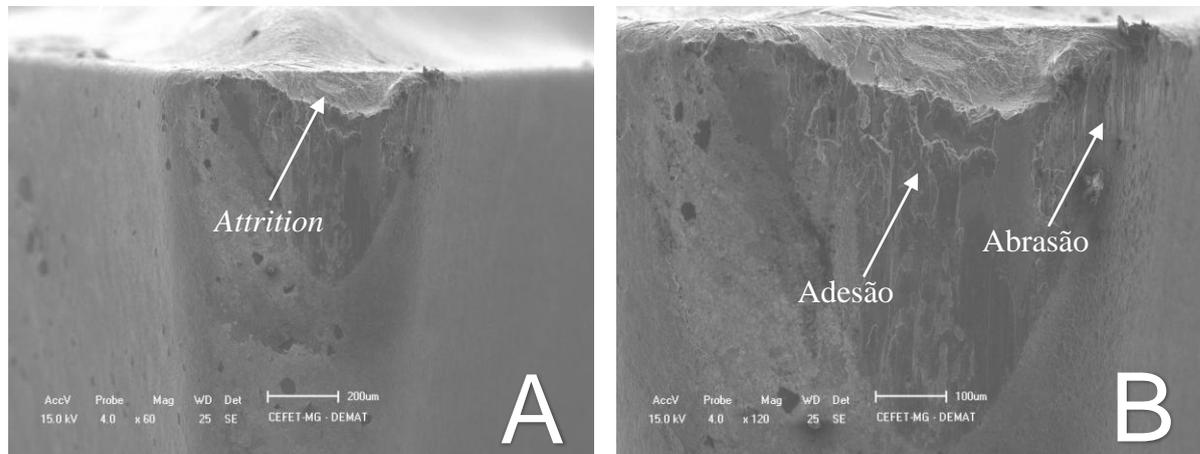
Figura 45 - Aspectos do desgaste da ferramenta de metal duro H13A, com jorro, na condição 240 m/min. e 0,10mm/rot.



A) ampliação de 60X B) ampliação 120X

Fonte: Próprio autor.

Figura 46 - Aspectos do desgaste da ferramenta de metal duro H13A, com jorro, na condição 240 m/min. e 0,05mm/rot.

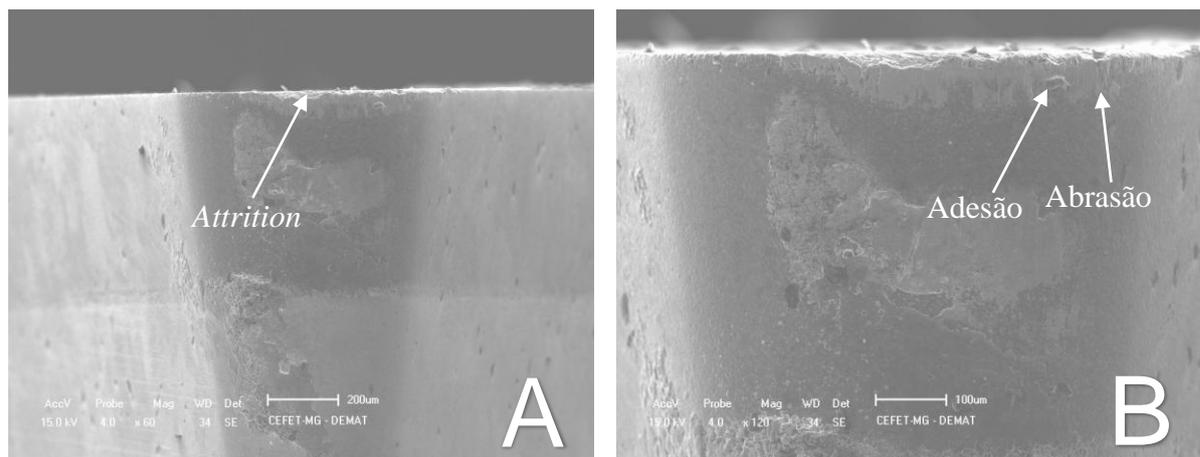


A) ampliação de 60X B) ampliação 120X

Fonte: Próprio autor.

Observa-se na Figura 47 os mecanismos de desgaste de adesão, conforme Silva *et al.* (2013), de abrasão, conforme Ezugwu *et al.* (2007), e *attrition*, conforme Wang, Wong e Rahman (2005), na velocidade de corte de 240 m/min., utilizando a ferramenta de PCD. Porém, a intensidade do *attrition* não é significativa.

Figura 47 - Aspectos do desgaste da ferramenta de PCD-CD10, com jorro, na condição 240 m/min. e 0,05mm/rot.



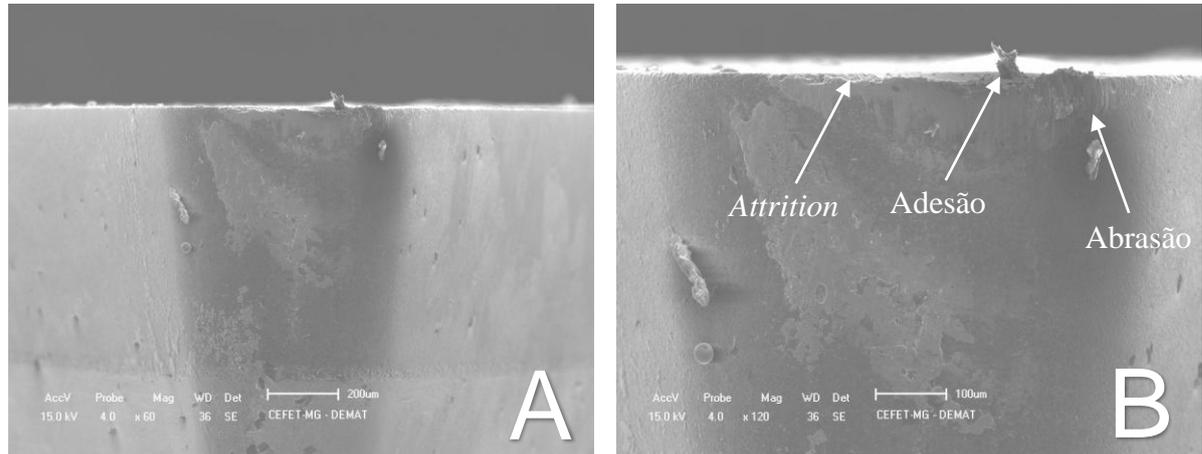
A) ampliação de 60X B) ampliação 120X

Fonte: Próprio autor.

Observa-se na Figura 48 os mecanismos de desgaste de adesão, conforme Silva *et al.* (2013), de abrasão, conforme Ezugwu *et al.* (2007), e *attrition*, conforme Wang, Wong e

Rahman (2005), na velocidade de corte de 300 m/min., utilizando ferramenta de PCD. Novamente, é possível observar que o mecanismo de desgaste *attrition* não é muito intenso.

Figura 48 - Aspectos do desgaste da ferramenta de PCD-CD10, com jorro, na condição 300 m/min. e 0,05mm/rot.



A) ampliação de 60X B) ampliação 120X

Fonte: Próprio autor.

É possível observar que na velocidade de corte de 240 m/min. utilizando ferramentas de metal duro, o desgaste é maior em comparação com as velocidades de corte de 240 m/min. e 300 m/min. utilizando ferramentas de PCD. Além disso, nota-se que quando ocorreu o mecanismo de desgaste *attrition* nas ferramentas de PCD, o mesmo apresentou uma intensidade menor quando comparado com o *attrition* ocorrido nas ferramentas de metal duro.

6 CONCLUSÕES

A partir dos resultados obtidos, conclui-se para análise dos mecanismos de desgaste de ferramentas no torneamento com alta velocidade de corte na liga Ti-6Al-4V que:

Quanto ao desgaste de flanco e os mecanismos de desgaste atuantes nas ferramentas de PCD e de metal duro:

- Com o aumento da velocidade de corte, a vida útil da ferramenta diminuiu significativamente, por causa do desgaste mais intenso e conseqüentemente, o comprimento de corte é menor.
- A velocidade de corte de 60 m/min propicia boa estabilidade no corte nos dois avanços testados, isto é, menor variação dos valores de desgaste nos parâmetros analisados.
- Em geral, a ferramenta de metal duro teve um desempenho satisfatório nas velocidades de corte de 60 m/min. e 120 m/min. nos dois avanços avaliados, nas condições de corte a seco e por jorro.
- Em geral, o avanço de 0,10 mm/rot. apresentou desempenho inferior quanto ao desgaste, quando comparado com o avanço de 0,05 mm/rot., nas condições de corte a seco e por jorro.
- A ferramenta de PCD apresentou um ótimo desempenho com relação ao desgaste nas velocidades de corte de 240 m/min. e 300 m/min, já que os comprimentos de corte obtidos nesses casos foram de 499 m, 2104 m e 800 m.
- A ferramenta de PCD possui um custo aproximadamente trinta vezes maior que a ferramenta de metal duro, contudo seu desempenho em altas velocidades de corte foi cerca de oito vezes superior, em média, em comparação com o metal duro. Além disso, os insertos de PCD podem ser reafiados e um acabamento superficial de melhor qualidade é obtido.
- Os mecanismos de desgaste predominantes nas ferramentas de corte foram os de abrasão, de adesão e *attrition* (aderência e arrastamento), sendo que o desgaste adesivo ocorreu em todas as ferramentas de corte.

Quanto ao comportamento do corte a seco e por jorro:

- As condições de lubri-refrigeração influenciam de maneira considerável nas variáveis analisadas.

- A condição menos favorável foi utilizando ferramenta de metal duro, a seco, com velocidade de corte de 240 m/min e avanço de 0,10 mm/rot. Nesse caso, o comprimento usinado foi de somente 63 m, e o desgaste de flanco máximo foi alcançado.
- Observa-se, em todos os ensaios, um melhor desempenho de vida da ferramenta de corte utilizando a condição com fluido de corte por jorro.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AMIN, A. K. M. N.; ISMAIL, A. F.; KHAIRUSSHIMA, M. K. N. Effectiveness of uncoated WC-Co and PCD inserts in end milling of titanium alloy Ti-6Al-4V. **Journal of Materials Processing Technology**, v. 192-193, p. 147-158, 2007.

AMORIM, H. J. **Estudo da relação entre velocidade corte, desgaste de ferramenta, rugosidade e forças de usinagem em torneamento com ferramenta de metal duro**. 2002. 114 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.

BIANCHI, E. C.; AGUIAR, P. R.; PIUBELI, B. A. **Aplicação e utilização dos fluidos de corte nos processos de retificação**. 1. ed. São Paulo: Artliber Editora, 2004. 110p.

CALLISTER, W. D. J. **Ciência e Engenharia de Materiais**. 7. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2008. 705p.

CÂMARA, M. A. **Influência do ângulo de posição sobre o fresamento frontal de níquel puro com insertos de metal duro**. 2008. 92 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte.

CAMERINI, R. V. **Efeitos dos processamentos em altas pressões e altas temperaturas na aderência de filmes de diamante CVD depositados sobre metal duro**. 2008. 103 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.

CATÁLOGO SANDVIK COROMANT, 2012. Disponível em < <http://www.sandvik.coromant.com/pt-pt/downloads> > Acesso em: out. 2015.

DEBNATH, S.; REDDY, M. M.; YI, Q. K. Environmental friendly cutting fluids and cooling techniques in a machining: a review. **Journal of Cleaner Production**, v. 83, p. 33-47, 2014.

DEWES, R. C.; NG, E.; CHUA, K. S.; NEWTON, P.G.; ASPINWALL, D. K. Temperature Measurement when High Speed Machining Hardened Mould/Die Steel. **Journal of Materials Processing Technology**, n. 92-93, p. 293-301, 1999.

DINIZ, A. E.; MARCONDES, F. C.; COPPINI, N. L. **Tecnologia da Usinagem dos Materiais**. São Paulo: MM, 1999. 242p.

EZUGWU, E. O.; WANG, Z. M. Titanium alloys and their machinability. **Journal of Materials Processing Technology**, v. 68, p. 262-274, 1997.

EZUGWU, E. O.; BONNEY, J.; YAMANE, Y. An overview of the machinability of aeroengine alloys. **Journal of Materials Processing Technology**, v. 134, p. 233-253, 2003.

EZUGWU, E. O.; BONNEY, J.; SILVA, R. B.; ÇAKIR, O. Surface integrity of finished turned Ti-6Al-4V alloy with PCD tools using conventional and high pressure coolant supplies. **International Journal of Machine Tools & Manufacture**, v. 47, p. 884-891, 2007.

FERRARESI, D. **Fundamentos da Usinagem dos Metais**. 1. ed. São Paulo: Edgard Blucher, 1970. 751p.

GUENZA, J. E. **Análise do desempenho do fresamento em altas velocidades de corte do ferro fundido GG25 em aplicação industrial.** 2008. 134 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Mecânica e de Materiais, Departamento de Pesquisa e Pós-graduação, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 2008.

HIOKI, D. **Influência dos parâmetros de corte do fresamento HSM sobre o desempenho tribológico do aço AISI H13 endurecido.** 2006. 233 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia Mecânica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2006.

ISO 3685. **Tool Life Testing with Single-Point Turning Tools,** 1993.

LEVA, E. S. **Estudo da microestrutura e propriedades mecânicas de estruturas porosas de Ti-6Al-4V produzidas por sinterização seletiva a laser.** 2012. 93 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, Campinas.

MACHADO, A. R.; ABRÃO, A. M.; COELHO, R. T.; SILVA, M. B. **Teoria da usinagem dos materiais.** 1. ed. São Paulo: Blucher, 2009. 371p.

OLIVEIRA, A. J. **Análise do desgaste de ferramentas no fresamento com alta velocidade de aços endurecidos.** 2007. 205 f. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) – Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, Campinas.

OLIVEIRA, V. M. C. A. **Estudo do fenômeno da fluência da liga Ti-6Al-4V submetida a tratamentos de nitretação e carbonetação por plasma.** 2010. 118 f. Dissertação (Mestrado em Ciências) – Escola de Engenharia de Lorena, Universidade de São Paulo, Lorena.

PIGARI, A. C. **Monitoramento do Desgaste da Ferramenta no Processo de Torneamento usando Emissão Acústica.** 1995. 130 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, Campinas.

PIRES, B. G. **Estudo das forças, vibrações e desgaste das ferramentas no fresamento da liga de titânio Ti-6Al-4V.** 2011. 82 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, Campinas.

RAHMAN, M.; WANG, Z. G.; WONG, Y. S. A review on High-Speed Machining of Titanium Alloys. **JSME International Journal**, v. 49, n. 1, p. 11-20, 2006.

ROSA, S. N. **Avaliação da superfície modificada de brocas de metal duro revestidas pelo processo de deposição física de vapor.** 2013. 153 f. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) – Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, Campinas.

SILVA, L. R.; COELHO, R. T.; CATAI, R. E. Desgaste de ferramentas no torneamento com alta velocidade de corte da superliga “waspaloy”. **Revista Escola de Minas**, Ouro Preto, v. 57, n. 2, p. 109-114, abr./jun. 2004.

SILVA, R. B.; MACHADO, A. R.; EZUGWU, E. O.; BONNEY, J.; SALES, W. F. Tool life and wear mechanisms in high speed machining of Ti-6Al-4V alloy with PCD tools under various coolant pressures. **Journal of Materials Processing Technology**, v. 213, p.1459-1464, 2013.

TRENT, E. M.; WRIGHT, P. K. **Metal Cutting.** 4. ed. Boston: Butterworth-Heinemann, 2000. 446p.

VIEIRA, J. M.; MACHADO, A. R.; EZUGWU, E. O. Performance of cutting fluids during face milling of steels. **Journal of Materials Processing Technology**, v. 116, p. 244-251, jul. 2011.

WANG, Z. G.; WONG, Y. S.; RAHMAN, M. High-speed milling of titanium alloys using binderless CBN tools. **International Journal of Machine Tools & Manufacture**, v. 45, p. 105-114, 2005.

ZIMMER, C. G. **Influência da oxidação térmica sobre as propriedades de fadiga da liga Ti-6Al-4V**. 2011. 76 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.