

UNIVERSIDADE FEDERAL DE JUIZ DE FORA
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

PEDRO HENRIQUE BARBOSA MACHADO

**ESTUDO DO DESGASTE DA FERRAMENTA DE CORTE NO TORNEAMENTO,
COM O USO DE GRAFITE COMO LUBRIFICANTE SÓLIDO**

JUIZ DE FORA

2018

PEDRO HENRIQUE BARBOSA MACHADO

**ESTUDO DO DESGASTE DA FERRAMENTA DE CORTE NO TORNEAMENTO,
COM O USO DE GRAFITE COMO LUBRIFICANTE SÓLIDO**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado a Faculdade de Engenharia da Universidade Federal de Juiz de Fora, como requisito parcial para a obtenção do título de Engenheiro Mecânico.

Orientador: Professor Raphael Fortes Marcomini

JUIZ DE FORA
2018

Ficha catalográfica elaborada através do programa de geração automática da Biblioteca Universitária da UFJF, com os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

MACHADO, PEDRO HENRIQUE BARBOSA.
ESTUDO DO DESGASTE DA FERRAMENTA DE CORTE NO TORNEAMENTO, COM O USO DE GRAFITE COMO LUBRIFICANTE SÓLIDO / PEDRO HENRIQUE BARBOSA MACHADO. -- 2018.
58 f.

Orientador: Raphael Fortes Marcomini
Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) - Universidade Federal de Juiz de Fora, Faculdade de Engenharia, 2018.

1. usinagem. 2. torneamento. 4. lubrificante sólido. I. Marcomini, Raphael Fortes , orient. II. Título.

PEDRO HENRIQUE BARBOSA MACHADO

**ESTUDO DO DESGASTE DA FERRAMENTA DE CORTE NO TORNEAMENTO,
COM O USO DE GRAFITE COMO LUBRIFICANTE SÓLIDO**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado a Faculdade de Engenharia da Universidade Federal de Juiz de Fora, como requisito parcial para obtenção do título de Engenheiro Mecânico.

Aprovado em 20 de junho de 2018.

BANCA EXAMINADORA

Professor Dr. Raphael Fortes Marcomini
Universidade Federal de Juiz de Fora

Professor Dr. Luiz Henrique Dias Alves
Universidade Federal de Juiz de Fora

Professor Dr. Marcos Martins Borges
Universidade Federal de Juiz de Fora

AGRADECIMENTOS

A Universidade Federal de Juiz de Fora, seu corpo docente, direção e administração pela oportunidade de fazer o curso.

Agradeço aos meus pais e minha namorada, pelo amor, incentivo e apoio incondicional.

Aos amigos da UFJF que acompanharam minha caminhada durante o curso, na convivência do cotidiano acadêmico, meu muito obrigado. Fico com a certeza de que levarei a amizade de vocês no decorrer da vida.

A todos que direta ou indiretamente fizeram parte da minha formação, o meu muito obrigado.

RESUMO

Na atualidade, a usinagem sem fluido de corte constitui um dos tópicos mais debatidos na indústria metal-mecânica. O elevado custo dos fluidos, problemas ecológicos ligados ao meio ambiente e à destinação de resíduos, assim como a saúde dos trabalhadores, têm estimulado a eliminação ou restrição do uso de fluidos lubri-refrigerantes.

Dessa forma, este trabalho irá relatar um estudo da influência do uso de fluidos de corte convencionais na usinagem, em comparação com o uso do grafite em pó para a diminuição do atrito na interface da ferramenta-peça, pois o grafite é aproveitado como um tipo de lubrificante, onde sua estrutura lamelar, sob a forma de pó seco, torna-o ideal para reduzir o atrito entre peças mecânicas.

Palavras-chave: usinagem, fluido de corte, grafite em pó.

ABSTRACT

At present, machining without cutting fluid is one of the most debated topics in the metal-mechanic industry. The high cost of fluids, ecological problems related to the environment and waste disposal, as well as the health of workers, have stimulated the elimination or restriction of the use of lubricating fluids.

Thus, this work will report a study of the influence of the use of conventional cutting fluids in the machining, compared to the use of powdered graphite for the decrease of the friction in the interface of the tool-piece, since the graphite is used as a type of lubricant, where its lamellar structure, in the form of dry powder, makes it ideal for reducing friction between mechanical parts.

Keywords: machining, cutting fluid, graphite powder.

LISTA DE FIGURAS

Figura1.Desenho esquemático das forças atuantes em um torneamento.	18
Figura2.Grandezas no processo de usinagem.	19
Figura3.Ferramentas de corte de metal duro.....	21
Figura4.Principais áreas de desgaste de uma ferramenta de corte.....	24
Figura5.Desgaste de flanco na superfície de saída de uma ferramenta.....	25
Figura6.Desgaste de cratera na superfície de saída de uma ferramenta.	25
Figura7.Desgaste de entalhe na superfície de saída de uma ferramenta.....	26
Figura8.Mecanismo de desgaste que ocorrem nas ferramentas de corte	27
Figura9.Mecanismos de desgaste das ferramentas de corte em função da temperatura.....	28
Figura10.Sistema convencional de lubrificação e refrigeração pela técnica de jorro..	30
Figura11.Tarugo de aço 1045 utilizado no experimento.	35
Figura12.Lubrificante aditivado utilizado no experimento.	36
Figura13.Torno TB350 utilizado no experimento.	37
Figura14.Fotos obtidas através do microscópio óptico da superfície de folga da ferramenta.....	38
Figura15.Fotos obtidas através do microscópio óptico da superfície de saída da ferramenta.....	39
Figura16.Detalhes do porta-ferramenta utilizado	39
Figura17.Microscópio utilizado para acompanhamento do desgaste nas ferramentas de corte.	40
Figura18.Evolução do desgaste de cratera da ferramenta a cada intervalo de 40 segundos de torneamento, a)após 40 seg b)após 80 seg c)após 120 seg, utilizando grafite puro.....	44
Figura19.Evolução do desgaste de flanco da ferramenta a cada intervalo de 40 segundos de torneamento, a)após 40 seg b)após 80 seg c)após 120 seg, utilizando grafite puro.....	45
Figura20.Evolução do desgaste de cratera da ferramenta a cada intervalo de 40 segundos de torneamento, a)após 40 seg b)após 80 seg c)após 120 seg, utilizando Fluido de corte Unix solúvel 100.....	46

Figura21.Evolução do desgaste de flanco da ferramenta a cada intervalo de 40 segundos de torneamento, a)após 40 seg b)após 80 seg c)após 120 seg, utilizando Fluido de corte Unix solúvel 100.	47
Figura22.Evolução do desgaste de cratera da ferramenta a cada intervalo de 40 segundos de torneamento, a)após 40 seg b)após 80 seg c)após 120 seg, utilizando Fluido de corte Unix solúvel 100 + 5% de grafite.	48
Figura23.Evolução do desgaste de flanco da ferramenta a cada intervalo de 40 segundos de torneamento, a)após 40 seg b)após 80 seg c)após 120 seg, utilizando Fluido de corte Unix solúvel 100 + 5% de grafite.	49
Figura24.Evolução do desgaste de cratera da ferramenta a cada intervalo de 40 segundos de torneamento, a)após 40 seg b)após 80 seg c)após 120 seg, utilizando Fluido de corte Unix solúvel 100 + 30% de grafite.	50
Figura25.Evolução do desgaste de flanco da ferramenta a cada intervalo de 40 segundos de torneamento, a)após 40 seg b)após 80 seg c)após 120 seg, utilizando Fluido de corte Unix solúvel 100 + 30% de grafite.	51
Figura26.Desgaste de cratera x Tempo de usinagem , velocidade de corte 120 m/min, avanço 0,15 mm/rot e profundidade de corte 0,5 mm.	52
Figura27.Largura de cratera final após 120 segundos de torneamento.	53

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Classificação do metal duro segundo a norma ISO 513/2004	22
Tabela 2. Parâmetros de corte na usinagem	34
Tabela 3. Composição química do aço 1045	35
Tabela 4. Tensão de escoamento aço 1045	36
Tabela 5. Características da ferramenta de corte	38
Tabela 6. Condições de lubrificação e refrigeração nos ensaios	41

LISTA DE ABREVIATURAS, SIGLAS E SÍMBOLOS

AISI	American Iron and Steel Institute
ap	Profundidade de corte
APC	Aresta postiça de corte
b	Largura de corte
b'	Largura do cavaco
CVD	Deposição por Vapor Químico
d	Diâmetro da peça
f	Avanço
h	Espessura de corte
h'	Espessura do cavaco
K _B	Largura de cratera
lf	Percurso de avanço
LS	Lubrificante sólido
MQF	Mínima quantidade de fluido
n	Rotação
r _t	Raio da ponta da ferramenta
SAE	Society of Automotive Engineers
t	Tempo
vc	Velocidade de corte
α	Ângulo de posição da ferramenta

SUMÁRIO

CAPÍTULO I-INTRODUÇÃO	15
1.1 OBJETIVO GERAL	16
1.2 OBJETIVO ESPECÍFICO	16
CAPÍTULO II-REVISÃO DA LITERATURA	17
2.1 USINAGEM.....	17
2.1.1 Torneamento	17
2.1.2 Grandezas e Parâmetros no processo de Usinagem	19
2.2 FERRAMENTA DE CORTE.....	21
2.2.1 Metal duro.....	21
2.2.2 Classificação das ferramentas de metal duro	21
2.3 DESGASTE DA FERRAMENTA DE CORTE	23
2.3.1 Tipos de desgaste	24
2.3.2 Mecanismos de desgaste	27
2.4 FLUIDO DE CORTE	29
2.4.1 Funções do Fluido de corte	29
2.4.2 Lubrificante Sólido	31
2.4.3 Tipos e Características dos Lubrificantes Sólidos	31
2.4.4 Aplicações dos Lubrificantes sólidos	32
2.5 LIGAS DE AÇO 1045.....	33
2.5.1 Características das Ligas de aço 1045.....	33
2.5.2 Usinabilidade das Ligas de aço 1045	33
2.5.3 Aplicações das Ligas de aço 1045	33
CAPÍTULO III-METODOLOGIA	34
3.1 PROCEDIMENTOS EXPERIMENTAIS	34
3.1.1 Corpo de Prova	35
3.1.2 Lubrificação e Refrigeração.....	36
3.1.3 Máquina-Ferramenta	37
3.1.4 Suporte externo para ferramenta.....	39
3.1.5 Análise dos tipos e mecanismos de desgaste da ferramenta.....	40
3.2.TESTES EXPERIMENTAIS.....	41
3.2.1 Experimentos.....	41
3.3 ENSAIO DE VIDA DA FERRAMENTA DE CORTE	42

CAPÍTULO IV-RESULTADOS	43
4.1 RESULTADOS DOS ENSAIOS COM FERRAMENTAS DE METAL DURO ..	43
4.1.1 Desgastes das ferramentas de metal duro	43
4.1.2 Influência dos lubrificantes sólidos aplicado na zona de corte pela técnica do jorro	52
CAPÍTULO V-CONCLUSÃO	54
SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	55
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	56
ANEXO 1 – TERMO DE AUTENTICIDADE	59

CAPÍTULO I

INTRODUÇÃO

A usinagem é reconhecidamente um dos mais importantes processos de fabricação mecânica, transformando em cavacos algo em torno de 10% de toda a produção de metais e empregando dezenas de milhões de pessoas em todo o mundo (TRENT, 1985). Apesar dessa popularidade, trata-se de um processo bastante imprevisível e que relata com exatidão toda sistemática que o envolve: processo complexo e simples ao mesmo tempo, no qual se produz peças removendo-se excesso de material na forma de cavacos (MACHADO, 2011).

Os lubrificantes líquidos são os mais utilizados nas indústrias, afim de controlar o calor gerado nas operações de usinagem, reduzindo o atrito na região de corte por meio de lubrificação, e reduzindo a temperatura por meio do resfriamento pelo aumento da convecção, reduzindo assim o desgaste através da combinação lubri-refrigeração. No entanto, devido aos problemas ambientais e danos causados a saúde dos trabalhadores, o uso desses tem sido contestado mundialmente. Novas tecnologias têm sido desenvolvidas para a substituição desses fluidos de corte. Segundo (RAO, KRISHNA, 2008), surgiram novas alternativas, como a usinagem a seco, usinagem criogênica, Mínima Quantidade de Fluido (MQF) e lubrificantes sólidos (LS).

Muitos pesquisadores como (REDDY, 2010; RAO, 2008; RAO e KRISHNA, 2008), estão estudando novas formas de evitar a utilização de lubrificantes líquidos, através da usinagem com lubrificantes sólidos, e tem demonstrado ser uma solução plausível em substituição aos fluidos convencionais (RAO, 2008; NAGESWARA e KRISHNA, 2008).

Os lubrificantes sólidos podem ser utilizados de duas formas: (I) na forma de pó, aplicado diretamente na superfície de saída da ferramenta, antes da operação de usinagem, (II) ou misturá-los ao fluido de corte e aplicá-los puramente por gravidade

(TRENT E WRIGHT, 2000). Neste caso, os lubrificantes sólidos típicos utilizados são: grafite e bissulfeto de molibdênio (MoS₂),

O papel efetivo do grafite como lubrificante foi evidente a partir da melhoria global do processo. Segundo (VENUGOPAL e RAO, 2004; SHAJI e RADHAKRISHNAN, 2003) diferentes parâmetros do processo, como forças de corte, temperatura, energia específica e rugosidade superficial foram observados e relatados como inferiores quando comparadas com as de usinagem com refrigeração convencional.

1.1 OBJETIVO GERAL

O presente trabalho possui como principal objetivo analisar se o lubrificante sólido (Grafite), puro ou misturado ao fluido de corte convencional, pode ser vantajoso no torneamento do aço 1045 com ferramenta de metal duro, onde a eficiência do grafite será avaliada em termos da vida e desgaste da ferramenta de corte.

1.2 OBJETIVO ESPECÍFICO

- Verificar a eficiência do grafite em termos da vida da ferramenta, no torneamento do aço SAE 1045, através do desgaste de cratera por tempo de usinagem.
- Analisar o desgaste de cratera, flanco e entalhe da ferramenta de metal duro revestida de TiN, para as diferentes condições de lubri-refrigeração.
- Identificar uma concentração ideal do grafite na mistura com o fluido de corte convencional.

CAPÍTULO II

REVISÃO DA LITERATURA

Este capítulo faz uma abordagem dos conceitos, dentro da literatura, de modo a fornecer a base teórica necessária para o estudo desenvolvido no decorrer do trabalho, facilitando a compreensão do objeto de estudo e a interpretação dos resultados obtidos. Serão abordados alguns conceitos em usinagem, torneamento e lubrificante sólido.

2.1 USINAGEM

A usinagem é um processo amplamente utilizado em todo o mundo, nas mais diversas aplicações, das mais simples até as mais complexas. Os estudos dos fatores que influenciam nos resultados da usinagem são de grande valia, principalmente para indústria que atua nesse campo.

Como operações de usinagem entendemos aquelas que, ao conferir à peça a forma, dimensões ou o acabamento, ou ainda uma combinação qualquer desses três itens, produzem cavaco. Segundo Ferraresi (1977), definimos cavaco, como a porção de material da peça retirada pela ferramenta, caracterizando-se por apresentar forma geométrica irregular.

2.1.1 Torneamento

O torneamento é uma operação de usinagem que permite trabalhar peças cilíndricas movidas por um movimento uniforme de rotação em torno de um eixo fixo, mediante a retirada progressiva do cavaco da peça a ser trabalhada. A determinação das condições ideais de torneamento para um determinado tipo de

aço é fundamental para se obter uma fabricação de qualidade e economicamente viável (FERRARESI, 1986).

O processo de torneamento é executado com a combinação de dois movimentos: avanço da ferramenta e a rotação da peça. O avanço da ferramenta pode ser ao longo do eixo da peça, o que significa que seu diâmetro será reduzido, ou no sentido do centro da peça, diminuindo seu comprimento. Em alguns casos, o avanço da ferramenta pode ser a combinação dessas duas direções, resultando em superfícies cônicas (MEIRELES, 2000). O desenho esquemático das forças atuantes em um torneamento é mostrado na figura 1.

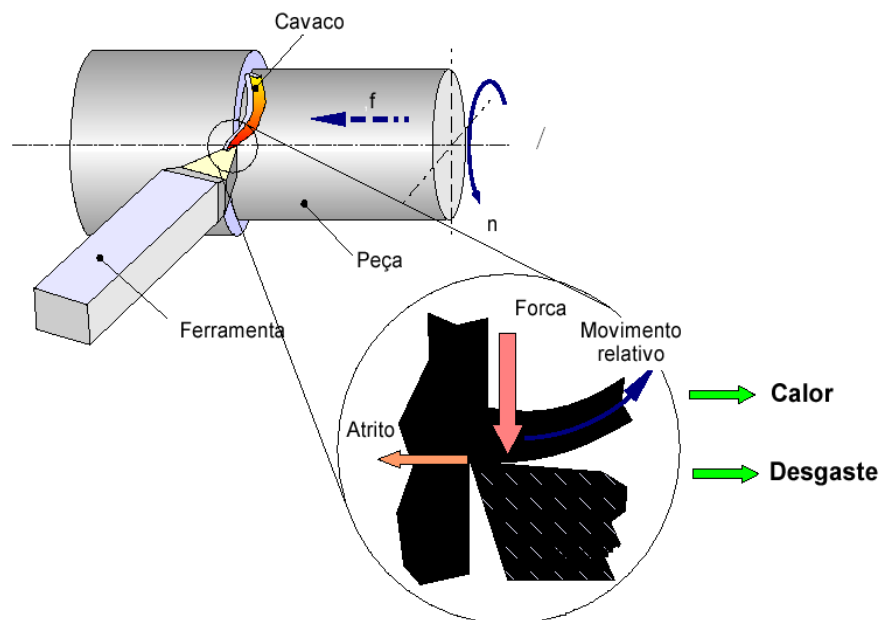


Figura 1. Desenho esquemático das forças atuantes em um torneamento. (Fundamentos dos processos de usinagem, 2010).

Segundo Ferraresi (1986), o torneamento pode ser classificado, quanto à finalidade, como:

- Torneamento de acabamento: operação de usinagem destinada a obter na peça as dimensões finais, ou um acabamento superficial especificado, ou ambos. As condições de acabamento são leves, com profundidades de usinagem bastante reduzidas e avanços tão pequenos quanto os necessários para a obtenção da especificação da peça-obra.
- Torneamento de desbaste: operação de usinagem anterior a de acabamento, visando obter na peça a forma e dimensões próximas das finais. A condição de

desbaste deve ser tão severa quanto permitirem a espessura do cavaco, a vida da ferramenta, a potência do motor e a própria peça.

Para se obter faixas de tolerâncias dimensionais estreitas e bons acabamentos superficiais, é necessário realizar um ou mais passos na condição de desbaste, seguidos por um ou mais passos na condição de acabamento. Em alguns casos, uma ferramenta especial de acabamento é usada, mas geralmente a mesma ferramenta é usada para ambas as condições (MEIRELES, 2000).

2.1.2 Grandezas e Parâmetros no processo de Usinagem

Os parâmetros velocidade de corte (vc), avanço (f) e profundidade de corte (a_p) influenciam a vida da ferramenta e a taxa de material removido no torneamento. Qualquer aumento nesses parâmetros aumenta a taxa de remoção de material, sendo que a velocidade de corte (vc) tem um efeito maior sobre a vida da ferramenta do que o avanço e a profundidade de corte, e por isso sua seleção é mais crítica (TEDESCO, 2007).

A vida da ferramenta é menos afetada por variações de profundidade de corte do que por qualquer um dos outros parâmetros. A profundidade de corte (a_p) é limitada pela quantidade de material a ser removida, potência disponível na máquina, rigidez do sistema, capacidade da ferramenta, qualidade superficial e precisão requerida.

Segundo Tedesco (2007), variações no avanço (f) têm efeito sobre a vida da ferramenta e sobre a qualidade da superfície da peça. As grandezas no processo de usinagem são mostradas na figura 2.

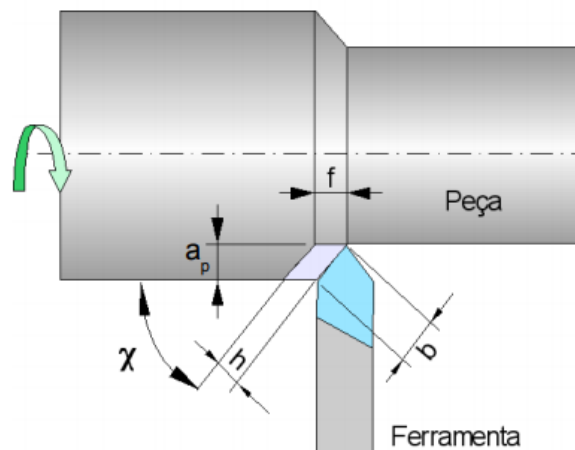


Figura 2. Grandezas no processo de usinagem. (Fundamentos dos processos de usinagem, 2010).

As grandezas envolvidas são padronizadas (ABNT), de modo que os princípios usados nas máquinas e ferramentas permitem obter as superfícies desejadas. A seguir serão apresentadas algumas das grandezas e parâmetros presentes no processo de usinagem.

v_c – é a velocidade tangencial instantânea resultante da rotação da ferramenta em torno da peça, para as operações do tipo torneamento, fresamento ou furação, onde os movimentos de corte e de avanço ocorrem concomitantemente, segundo Diniz (2008).

$$v_c = \frac{\pi \cdot d \cdot n}{1000} [m/min] \quad (I)$$

f – percurso de avanço em cada volta ou em cada curso da ferramenta.

a_p – profundidade de penetração da aresta principal de corte, medida numa direção perpendicular ao plano de trabalho.

b – largura da seção transversal que será retirada, sendo medida na superfície de corte, numa direção normal à direção do corte.

h -- espessura da seção transversal de corte a ser retirada e medida, normalmente, à superfície em usinagem principal e segundo a direção perpendicular à direção de corte.

α – ângulo entre o plano de corte da ferramenta e o plano admitido de trabalho, medido sobre o plano de referência da ferramenta.

2.2 FERRAMENTA DE CORTE

2.2.1 Metal duro

É o mais importante material para ferramentas utilizado na indústria moderna, devido á combinação de dureza á temperatura ambiente, dureza á quente, resistência ao desgaste e tenacidade , combinação essa possível de obter-se pela variação da sua composição. É um produto da metalurgia do pó, designado também usualmente como carboneto de tungstênio sintetizado.

Segundo Diniz (2007), os seus contituíntes fundamentais são misturados na forma de pó e submetidos a um processamento que compreende compressão,sinterização,retificação, que resulta um produto completamente consolidado,apresentando resistência mecânica, dureza e tenacidade adequados para para emprego em ferramentas de corte. Alguns tipos de ferramentas de metal duro, são mostradas abaixo, conforme figura 3.











Figura 3. Ferramentas de corte de metal duro.

2.2.2 Classificação das ferramentas de metal duro

O metal duro permite maiores velocidades de corte e de avanço no processo de usinagem, ganhando em produção. A tabela 1 classifica os metais duros em grupos, designados pelas letras P, M, K.

Tabela 1. Classificação do metal duro segundo a norma ISO 513/2004

Classificação do metal duro		
Designação ISO	Dureza e resistência ao desgaste	Tenacidade
P 01		
P 10		
P 20		
P 25		
P 30		
P 40		
P 50		
M 10		
M 20		
M 30		
M 40		
K 01		
K 05		
K 10		
K 20		
K 30		
K 40		

Fonte: Norma ISO 513/2004

O grupo K foi o primeiro tipo de material duro a ser desenvolvido, sendo composto de carbonetos de tungstênio aglomerados pelo cobalto, também conhecida por classe dos ferros fundidos, portanto são usadas na usinagem de materiais frágeis, que formam cavacos curtos tendo assim menor atrito entre cavaco e a região de superfície de saída, sendo assim não muito resistentes ao desgaste de cratera (DINIZ; MARCONDES; COPPINI, 2000).

O grupo P, obtém elevado teor de TiC e TaC, é atribuído a esta classe uma elevada dureza a quente e resistência ao desgaste. Tem como característica a usinagem de materiais que produzem cavacos contínuos, que por formarem uma

área de atrito maior com a superfície de saída tendem a desgastar bastante a ferramenta.

O grupo M é um grupo com propriedades intermediárias e aplicações múltiplas, utilizados em aços resistentes a altas temperaturas, resistentes a corrosão normalmente aços inoxidáveis.

A vida de uma ferramenta é uma das mais importantes considerações econômicas na usinagem dos metais. Condições de corte onde ocorrem quebras, desgaste excessivo e avarias faz com que a ferramenta de corte não produza mais, elevando assim o custo na produção, (BOOTHROYD, 2006).

2.3 DESGASTE DA FERRAMENTA DE CORTE

Segundo Diniz, Marcondes e Coppini (2000), o desgaste de uma ferramenta é considerado como uma perda contínua e microscópica de partículas da ferramenta devido à ação do corte, prejudicando a produção e diminuindo a qualidade final do produto.

O desgaste pode ser avaliado de duas formas:

1. Métodos diretos: medição direta do desgaste ou detecção da quebra da ferramenta, após a interrupção da usinagem através de inspeção visual ou de inspeção ótica.
2. Métodos indiretos: medição indireta do desgaste ou detecção da quebra da ferramenta, através de sinais que possuem correlações com o processo de corte, sendo realizada durante a usinagem.

Por maior que seja a dureza e a resistência ao desgaste das ferramentas de corte e por menor que seja a resistência mecânica da peça de trabalho, a ferramenta sofrerá um processo de destruição que, mais cedo ou mais tarde, exigirá sua substituição (MACHADO, 1999).

A ferramenta tem-se uma vida útil que é definida como sendo o tempo em que a mesma trabalha efetivamente, sem perder o corte ou até que se atinja o critério de fim de vida (ISO 8688 -1).

2.3.1 Tipos de desgaste

O tipo de desgaste depende da geometria e do material da ferramenta, da composição química e das propriedades mecânicas do material da peça e das condições de usinagem, associado às elevadas temperaturas geradas na interface cavaco ferramenta. Todas as ferramentas de corte estão sujeitas ao desgaste, que podem se localizar tanto na superfície de saída quanto na superfície de folga. A figura 4 apresenta esquematicamente os típicos desgastes encontrados nas ferramentas de corte, (MACHADO, 2015).

- Desgaste de flanco (B) ocorre na superfície de folga da ferramenta.
- Desgaste de cratera (A) ocorre na superfície de saída da ferramenta.
- Desgaste de entalhe (C e D), normalmente ocorre na superfície de folga da ferramenta, podendo se estender, às vezes, pela superfície de saída.

As principais áreas de desgaste de uma ferramenta de corte, são mostradas na figura 4.

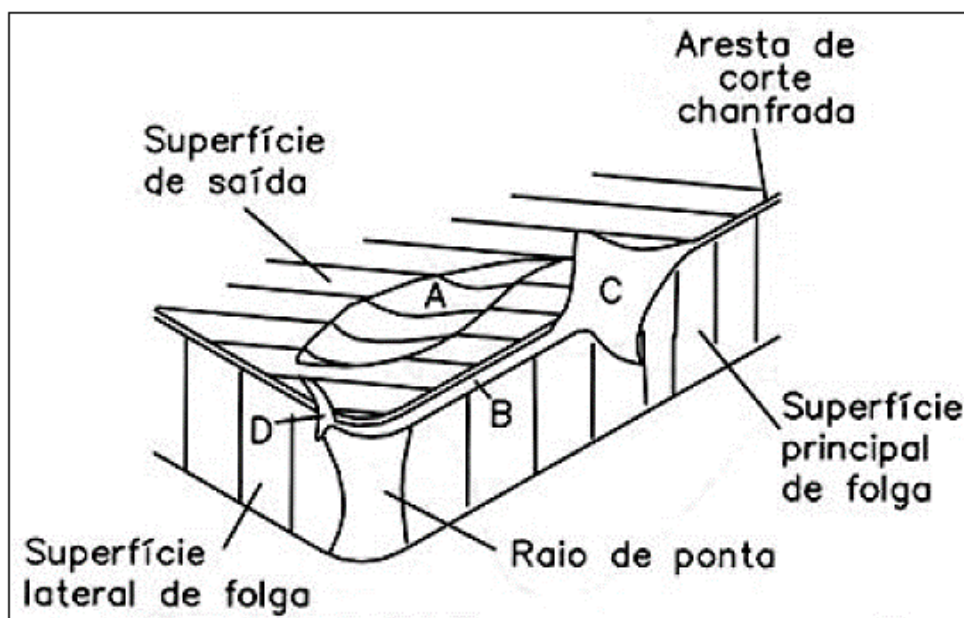


Figura 4. Principais áreas de desgaste de uma ferramenta de corte (DEARNLEY e TRENT, 1982)

O desgaste de flanco está localizado na superfície de folga da ferramenta, pois este apresenta perda neste ângulo de folga durante a usinagem, tendo um maior contato com a peça, aumentando assim seu atrito. Isto faz com que a peça perca suas características dimensionais e piore no seu acabamento superficial. A figura 5 mostra um desgaste de flanco na superfície de saída de uma ferramenta.

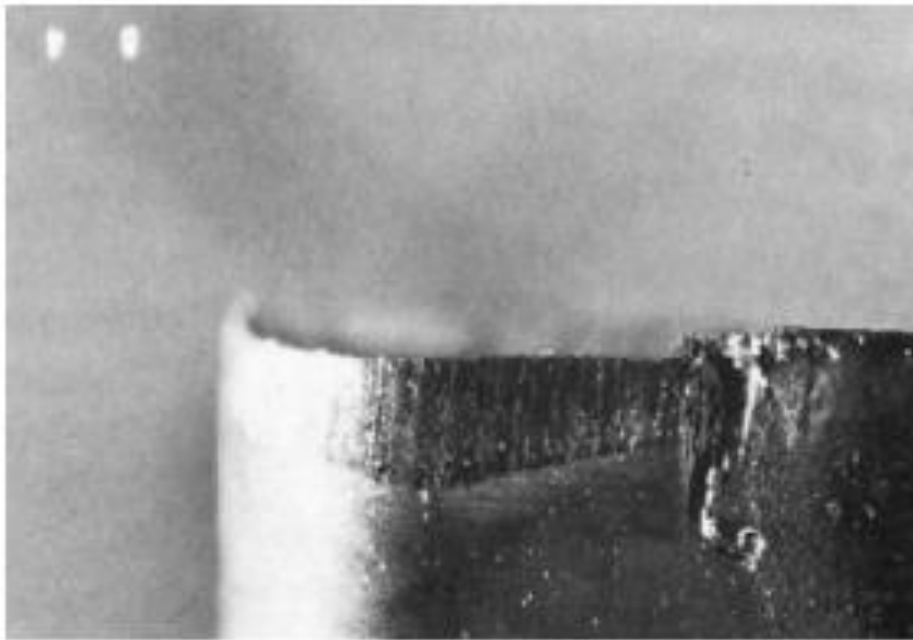


Figura 5. Desgaste de flanco na superfície de saída de uma ferramenta (Introdução aos processos de usinagem, 2010)

À velocidade e o avanço empregados durante o processo de corte, influenciam na profundidade e largura da cratera (FERRARESI, 1977). Segundo (DINIZ, 2000), ocorrendo o crescimento do desgaste de cratera, gera-se a quebra da ferramenta quando tal desgaste se encontra com o desgaste frontal. A figura 6 representa o desgaste de cratera de uma ferramenta localizada na superfície de saída de uma ferramenta.

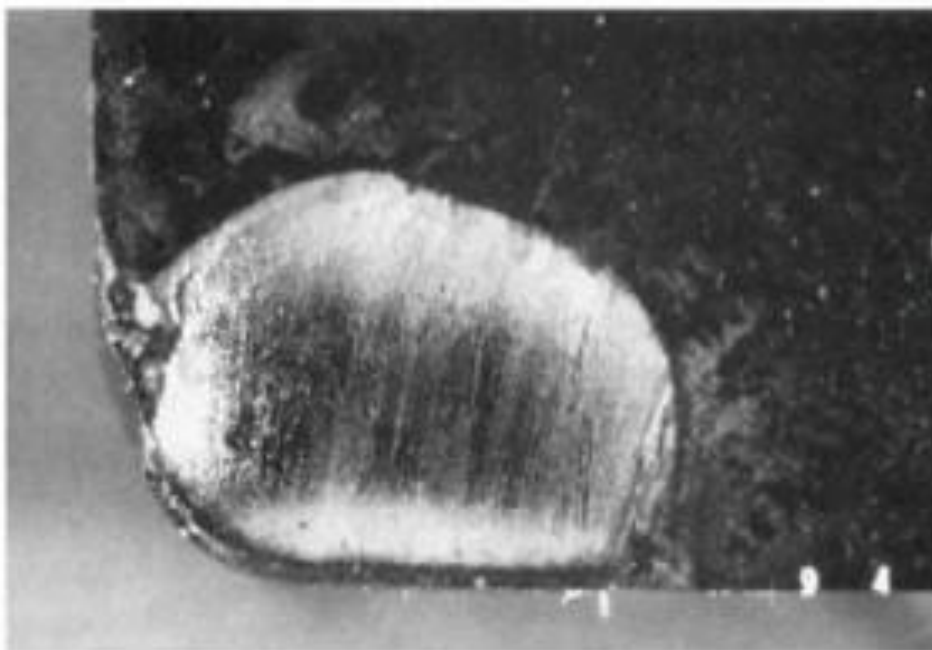


Figura 6. Desgaste de cratera na superfície de saída de uma ferramenta (Introdução aos processos de usinagem, 2010).

O desgaste de entalhe é a avaria formada na aresta principal de corte, ocorrendo na superfície de folga e, às vezes, na superfície de saída. A figura 7 mostra um desgaste de entalhe na superfície de saída de uma ferramenta.

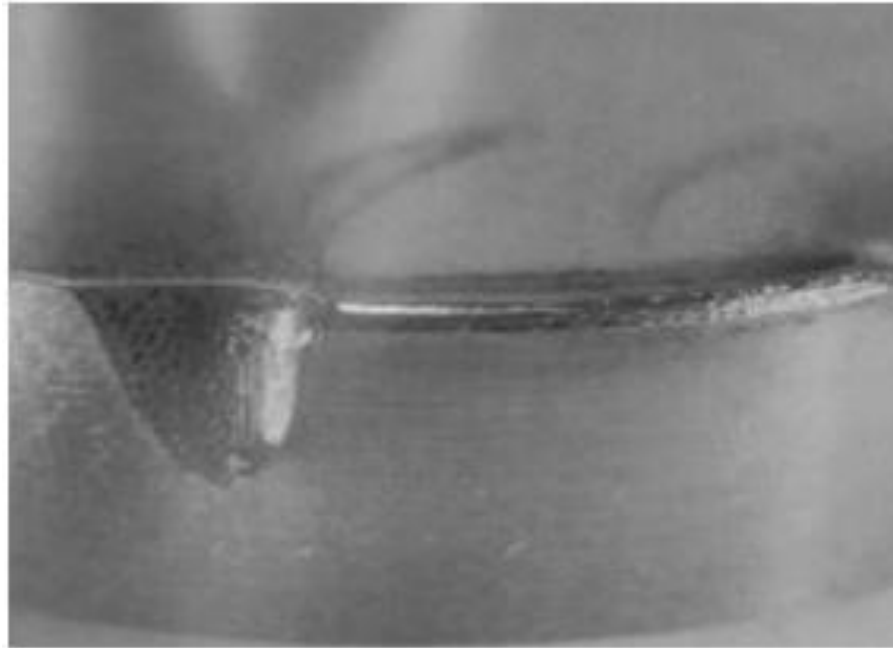


Figura 7. Desgaste de entalhe na superfície de saída de uma ferramenta (Introdução aos processos de usinagem, 2010)

Durante o processo de usinagem as ferramentas de corte sofrem algum tipo de alteração na sua geometria, independente da sua dureza ou resistência ao desgaste. Estas alterações estão relacionadas às avarias, que ocorrem de maneira repentina e inesperada e envolvem a quebra, lascamento e trinca da aresta de corte da ferramenta.

- As quebras podem ser consequência do crescimento excessivo dos desgastes ou evolução de avarias da ferramenta de corte (trinca ou lasca);
- Segundo Diniz, Marcondes e Coppini (2006), o lascamento consiste na retirada durante o processo de corte de grandes partículas da ferramenta, e ocorre principalmente em ferramentas de material frágil;
- As trincas são causadas pela variação da temperatura e/ou pela ação dos esforços mecânicos.

2.3.2 Mecanismos de desgaste

Todo fenômeno capaz de provocar desgaste de uma ferramenta de corte, é considerada como mecanismo de desgaste. A abrasão, adesão e difusão são mecanismos que promovem desgastes através de deformação plástica por cisalhamento. Ocorre também a deformação por altas tensões de compressão ou entalhe cujo processo ocorre na usinagem dos materiais de alta dureza (TRENT, 2000). São mostrados os mecanismos de desgaste atuantes nas ferramentas de corte, conforme figura 8.

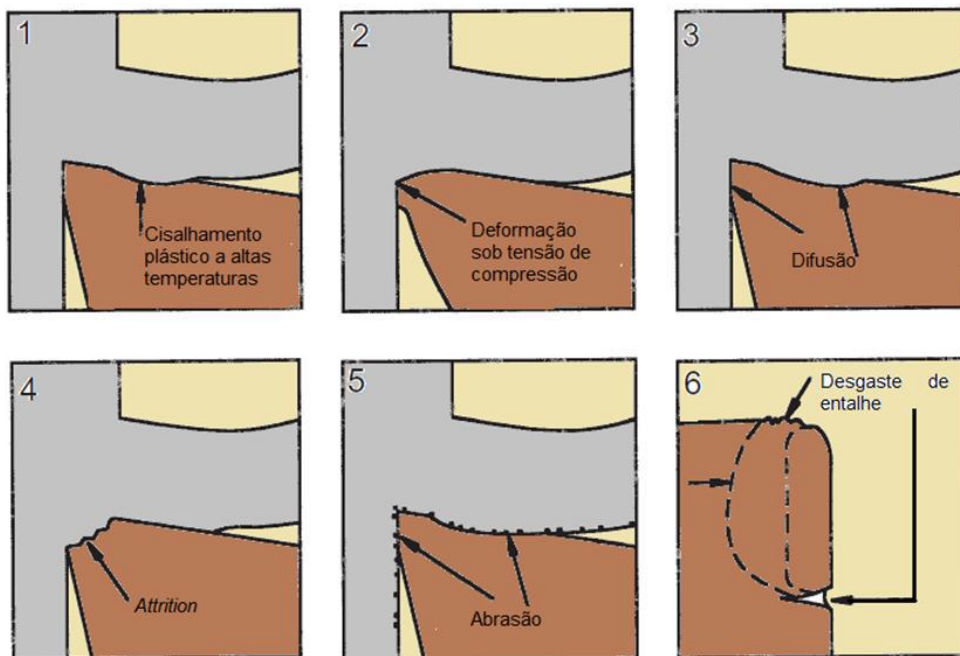


Figura 8. Mecanismo de desgaste que ocorrem nas ferramentas de corte (Adaptado de TRENT e WRIGHT, 2000).

As elevadas temperaturas desenvolvidas na interface cavaco/ferramenta reduzem a tensão de escoamento do material da ferramenta, e com isso as tensões de cisalhamento ali geradas são suficientes para causar a deformação plástica superficial na superfície de saída da ferramenta, promovendo a formação de crateras (MACHADO, 2015).

A combinação de altas tensões de compressão com elevadas temperaturas na superfície de saída podem provocar deformação plástica na aresta de corte. Em altas velocidades de corte e avanços elevados, a deformação plástica pode levar a uma falha catastrófica da ferramenta.

Em baixas temperaturas, apenas os mecanismos de adesão e abrasão estão presentes e a adesão é predominante, enquanto em temperaturas elevadas, a adesão perde lugar para os novos mecanismos de difusão e oxidação (MACHADO, 2015). A figura 9 mostra os mecanismos de desgaste das ferramentas de corte em função da temperatura.

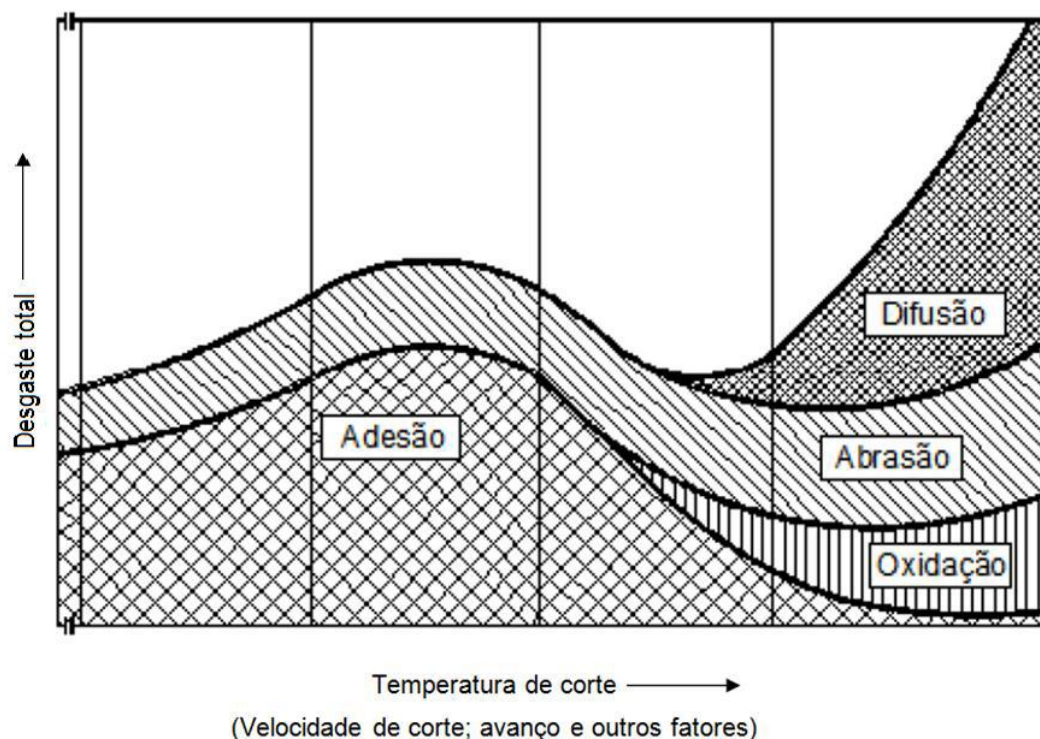


Figura 9. Mecanismos de desgaste das ferramentas de corte em função da temperatura. (VIEREGGE, 1970, apud KONIG e KLOCKE 1997).

O processo de difusão é um fenômeno microscópico ativado pela temperatura na zona de corte, sendo característico de ocorrer em altas velocidades, responsável pelo desgaste da cratera. A difusão do estado sólido consiste na transferência de átomos de um metal a outro, dependente da temperatura, da duração do contato e da afinidade física química dos dois metais envolvidos.

A abrasão é uma das principais causas de desgaste da ferramenta, tanto o frontal quanto o desgaste de cratera, sendo característico de ocorrer em baixas velocidades de corte, tendo a peça alta dureza. Segundo Machado (1999), em ferramentas de metal duro, que possui quantidades muito grandes de carboneto de tungstênio (WC) em sua composição, o desgaste abrasivo é pouco eficiente no que diz respeito à degradação da ferramenta.

Altas temperaturas e presença de ar e água contida nos fluidos de corte geram oxidação para a maioria dos metais. O desgaste gerado pela oxidação se

forma especialmente nas extremidades do contato cavaco-ferramenta devido ao acesso do ar nesta região, sendo esta uma possível explicação para o surgimento do desgaste de entalhe.

A adesão (*attrition*) ocorre geralmente a baixas velocidades de corte, nas quais o fluxo de material sobre a superfície de saída da ferramenta se torna irregular. Esse mecanismo envolve destacamento de fragmentos microscópicos da superfície da ferramenta (grãos), que são arrastados junto com o cavaco, deixando a superfície com um aspecto áspero. O fenômeno da aderência está presente na formação da aresta postiça de corte (APC) e o contato com a ferramenta torna-se menos contínuo. A utilização adequada do fluido de corte principalmente com efeito lubrificante e o recobrimento da ferramenta de corte com materiais de baixo coeficiente de atrito, como nitreto de titânio, faz com que haja uma grande influência na diminuição desse tipo de desgaste (DINIZ, 2000).

2.4 FLUIDO DE CORTE

Os fluidos de corte quando aplicados de maneira correta podem contribuir para o aumento da produtividade e reduzir os custos, tornando possível o uso de altas velocidades de corte, maiores avanços e o uso de maiores profundidades de corte. A aplicação eficaz de fluidos de corte pode também prolongar a vida da ferramenta, diminuir a rugosidade da superfície da peça, aumentar a precisão dimensional, e diminuir a quantidade de energia consumida, em comparação com o corte a seco.

2.4.1 Funções do Fluido de corte

Segundo Machado (2015), 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 oxidação.

O fluido de corte como lubrificante permite uma redução do coeficiente de atrito entre o cavaco/ferramenta /peça, o que facilita o fluxo de cavaco reduzindo a força e a potência de corte e, conseqüentemente, a temperatura (DINIZ, 2000). Em operações com altas velocidades de corte a refrigeração é a função mais importante do fluido de corte, pois as altas velocidades de corte propiciam o desenvolvimento de altas temperaturas. Além disso, em altas velocidades de corte as condições não são favoráveis para a penetração do fluido de corte na interface cavaco/ferramenta para que exerça suas funções. Em velocidades de corte moderadas tanto a refrigeração quanto a lubrificação são importantes. Contudo nas operações nas quais as velocidades de corte são baixas, a lubrificação torna-se a função principal de um fluido de corte, e a refrigeração é relativamente sem importância, pois as temperaturas nessas condições são baixas (TRENT e WRIGHT, 2000; MACHADO, 2015).

A finalidade de se usar o fluido do corte em processos é reduzir temperaturas de corte na zona do corte, a fim de aumentar a vida da ferramenta. As vantagens deste uso, entretanto, têm sido questionadas devido aos efeitos negativos no custo do produto, no ambiente e na saúde humana. O corte a seco tem sido aplicado como uma alternativa possível ao uso do fluido de corte (FERRARESI, 1986). O jorro de fluido em uma peça é mostrado, conforme figura 10.



Figura 10. Sistema convencional de lubrificação e refrigeração pela técnica de jorro.

2.4.2 Lubrificante Sólido

Os lubrificantes sólidos, também conhecidos como lubrificantes a seco, não usam um meio líquido, mas são capazes de proporcionar lubrificação, permanecendo em estado sólido. Os lubrificantes secos apresentam outras vantagens em relação aos demais tipos de lubrificantes, entre as características principais dessas substâncias, as seguintes são as mais importantes:

- Baixa resistência ao cisalhamento;
- Estabilidade a temperaturas elevadas;
- Elevado coeficiente de transmissão de calor.

Segundo Reddy e Rao (2006), o aumento da vida pode ser atribuído à formação de uma fina película de lubrificante na superfície da ferramenta, reduzindo o atrito entre a peça/ferramenta/cavaco, facilitando o escoamento do material, proporcionando menor desgaste da ferramenta. O aumento da vida da ferramenta com a adição de lubrificante sólido ao fluido de corte pode estar relacionado às boas características lubrificantes, bem como a sua elevada condutividade térmica.

2.4.3 Tipos e Características dos Lubrificantes Sólidos

Os lubrificantes sólidos típicos utilizados em usinagem são: o grafite e o bissulfeto de molibdênio (MoS_2), pois apresentam excelentes propriedades lubrificantes. Outros componentes que são úteis como lubrificantes sólidos incluem o nitreto de boro, o politetrafluoretileno (PTFE), talco, fluoreto de cálcio, fluoreto de cério e bissulfeto de tungstênio (REDDY, 2010).

Segundo Hutchings (1992), o baixo atrito tanto do grafite como do bissulfeto de molibdênio está associado à sua fraca ligação interplanar, mas de modo algum todos os compostos com estruturas similares mostram baixo atrito, e os baixos valores de atrito não podem, portanto, ser atribuídos apenas a estes fatores isolados.

O grafite é um elemento formado essencialmente de carbono, por isso a cor predominantemente preta ou cinza escuro. Em muitas indústrias, o grafite é aproveitado como um tipo de lubrificante, pois sua estrutura lamelar, sob a forma de pó seco, torna-o ideal para reduzir o atrito entre peças mecânicas. Assim uma

película de lubrificação oferece resistência ao desgaste de peças como engrenagens, motores, rolamentos e outros componentes.

O grafite lubrificante é caracterizado como um material natural ou sintético. O natural é derivado da mineração, e o sintético contém carbono, enxofre, SiO_2 e pó vulcânico, sendo sintetizado com alta temperatura, mantendo um teor muito elevado de carbono, de até 99,5-99,9%, e por isso funciona muito bem como um lubrificante.

A qualidade de cristalização de grafite é determinada pelo maior teor de carbono, melhorando a lubricidade e resistência à oxidação. Como um lubrificante seco, o grafite em pó reage com vapor de água, e a ligação molecular não ocorre, deixando o suprimento seco e escorregadio. No entanto, ele não adere bem à superfície e, portanto, existe uma necessidade de ser aplicado com frequência. Um lubrificante sólido à base de grafite é tolerante a temperaturas de aproximadamente 900 °C. Contudo, temperaturas mais elevadas do que isso provocam a oxidação.

2.4.4 Aplicações dos Lubrificantes sólidos

O lubrificante sólido pode ser aplicado na zona de corte em pó (neste caso atende ao apelo ecológico diretamente) ou misturado ao fluido de corte (neste caso pode atender ao apelo ecológico indiretamente ou parcialmente). As formas de aplicação dos lubrificantes sólidos podem ser por gravidade, com jato de ar (RAO E KRISHNA, 2008), por jorro (ZAILANI, 2011) e eletrostática (REDDY, 2010).

Segundo Ferraresi (2006), o pó é aplicado externamente diretamente na superfície de saída da ferramenta, antes da operação de usinagem. As minúsculas partículas lubrificantes se aderem aos sulcos da superfície de saída da ferramenta, reduzindo o atrito entre as superfícies metálicas e conseqüentemente facilitando o escorregamento do cavaco. Este método, porém, é pouco efetivo, uma vez que em poucos instantes os lubrificantes podem ser varridos das superfícies, pelo fluxo de cavaco ou da peça.

2.5 LIGAS DE AÇO 1045

2.5.1 Características das Ligas de aço 1045

Com 0,45% de carbono em sua composição, o aço SAE 1045 é classificado como aço de médio teor de carbono com boas propriedades mecânicas e tenacidade bem como boas usinabilidade e soldabilidade quando laminado a quente ou normalizado. Apresentando baixo custo e uma boa resistência, o percentual de carbono é relevante para a sua escolha pois quanto maior o percentual de carbono maior dureza o aço pode apresentar.

2.5.2 Usinabilidade das Ligas de aço 1045

Em diversas aplicações os materiais fornecidos por processos de produção convencionais possuem características inadequadas que podem influenciar negativamente o seu desempenho e até mesmo comprometê-lo. Empenamentos, tensões internas e estruturas indesejadas surgem com frequência e afetam as propriedades do material. Para solucionar esses problemas alguns tratamentos térmicos podem ser empregados, envolvendo aquecimento e resfriamento subsequente, dentro de condições controladas de temperatura, tempo, ambiente de aquecimento e velocidade de resfriamento. Na maioria dos casos os tratamentos térmicos são aplicados a ligas Fe- C, em especial aos aços.

2.5.3 Aplicações das Ligas de aço 1045

É utilizado na fabricação de componentes de uso geral onde seja necessária uma resistência mecânica superior à dos aços de baixo carbono convencionais. Aplicado principalmente em eixos em geral, pinos, cilindros, ferrolho, parafusos, grampos, braçadeiras, pinças, cilindros, pregos, colunas, entre outros.

CAPÍTULO III

METODOLOGIA

3.1 PROCEDIMENTOS EXPERIMENTAIS

Este capítulo tem como objetivo apresentar os materiais, ferramentas, equipamentos e planejamentos utilizados nos testes para investigar a influência do lubrificante sólido no torneamento da liga de aço 1045, utilizando ferramentas de metal duro (classe P30). Com isso foi possível obter comparações do desempenho das diversas formas de lubri-refrigeração. Os ensaios de usinagem foram realizados no Laboratório de Processos de Fabricação da Faculdade de Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Juiz de Fora (UFJF). Os parâmetros de corte utilizados são apresentados, conforme tabela 2.

Tabela 2. Parâmetros de corte na usinagem

Vazão-Jorro (l/min)	Condição de lubrificação e refrigeração	Velocidade de corte (m/min)	Avanço (mm/rot)	Profundidade de corte (mm)
2,0	Jorro (apenas fluido de corte)	120	0,15	0,5
0,0	Grafite puro	120	0,15	0,5
2,0	Jorro (com solução de fluido de corte + 5% de grafite)	120	0,15	0,5
1,0	Jorro (com solução de fluido de corte + 30% de grafite)	120	0,15	0,5

Fonte: Autor

3.1.1 Corpo de Prova

Os materiais utilizados para realização do experimento foram de aço SAE 1045 normalizado a 900°, com testes feitos em três barras cilíndricas com dimensão de 38 mm de diâmetro e 300 mm de comprimento, que pode ser mostrada conforme figura 11.



Figura 11. Tarugo de aço 1045 utilizado no experimento.

O material SAE 1045 tem em sua composição química praticamente só o teor de carbono controlado, o que não lhe garante alta repetibilidade em termos de processamento, porém lhe confere um custo mais acessível do que muitos aços ferramentas para a utilização em seus moldes. A composição química do aço 1045 é apresentada na tabela 3.

Tabela 3. Composição química do aço 1045

ABNT/SAE/AISI	C	Mn	Cr	Al	P máx	S máx
1045	0,43- 0,50	0,60- 0,90	-	-	0,04	0,05

Fonte: Favorit, 2006.

Tensão limite de escoamento como grande parte das estruturas e componentes mecânicos é projetada para resistir a tensões elásticas, torna-se necessário conhecer o nível de tensão onde se inicia a deformação plástica. No início do escoamento geralmente ocorre maior deformação em relação à tensão aplicada, o que torna este ponto perceptível em alguns materiais dúcteis como o aço

de baixo carbono. Nestes materiais a transição do regime elástico para o plástico ocorre de modo abrupto (O aço 1045 pertence bem à transição do baixo para o médio carbono que de 1040 a 1060, onde começa o aço de alto carbono, com teores acima de 0,65%). A tensão de escoamento do aço 1045 é apresentada na tabela 4.

Tabela 4. Tensão de escoamento Aço 1045

Tipo de aço	Teor de carbono (%)	Limite de elasticidade (GPa)	Limite de escoamento (MPa)	Limite de resistência a tração (MPa)	Alongamento (%)
1045	0,45	250	310	560	17

Fonte: Favorit, 2006.

3.1.2 Lubrificação e Refrigeração

Foi utilizado o lubrificante aditivado para usinagem Unix solúvel 100, fabricado pela Ingrax, apresentado na figura 12, aplicado puramente pelo sistema de jorro da própria máquina, com solução de fluido de corte e lubrificante sólido. Para aplicação da técnica convencional, foi utilizado o próprio sistema de lubrificação do torno, e o fluido foi entregue na região de corte (posição sobre-cabeça) através de um bocal flexível com uma vazão de 2,0 l/min. Como lubrificante sólido, foi utilizado o grafite da marca Vonder, com granulometria máxima de 20 µm.



Figura 12. Lubrificante aditivado utilizado no experimento.

3.1.3 Máquina-Ferramenta

Para realização do experimento foi utilizado o torno TB350, com rotação máxima de 2000 RPM, fabricado pela empresa Timemaster, pertencente ao Laboratório de Processos de Fabricação da Universidade Federal de Juiz de Fora (UFJF), que pode ser mostrado conforme figura 13.




Figura 13. Torno TB350 utilizado no experimento.

Ultimamente pastilhas de metal duro com cobertura de TiC, e/ou Al₂O₃, TiN e TiCN têm sido utilizadas com frequência. A finalidade principal dessas camadas é aumentar a resistência ao desgaste da camada superior que entra em contato com o cavaco e a peça, sendo que o núcleo da pastilha permanece com a tenacidade característica do metal duro mais simples, possibilitando aumentar consideravelmente a vida da ferramenta (DINIZ, 2008).

Dentre a grande diversidade de escolha das geometrias de corte que poderiam ser utilizadas nos ensaios, adotamos insertos com dimensões mais comuns encontradas nos catálogos de fabricantes de ferramentas. Para realização do ensaio, foram utilizadas as ferramentas de metal duro revestida através do processo CVD (Deposição de Vapor Químico), com cobertura de TiN, produzidas pela empresa Rocast Perfection. As características da ferramenta são mostradas a seguir, pela tabela 5.

Tabela 5. Características da ferramenta de corte

Ferramenta	Geometria	Ângulo de folga	Ângulo de saída	Aresta da pastilha (mm)	Espessura da pastilha (mm)
	Triangular	0°	14°	16	4,76
Especificação ISO	Número de arestas	Classe	Substrato	Revestimento	Raio da ponta (mm)
TNMG 160404L	6	P30	Metal duro	TiN	0,4

Fonte: Autor

Nas figuras 14 e 15 estão representadas as fotografias obtidas através do microscópio óptico da superfície de folga e saída das ferramentas de corte utilizadas nos ensaios. Nessas fotografias é possível observar as arestas de corte principal das ferramentas novas.

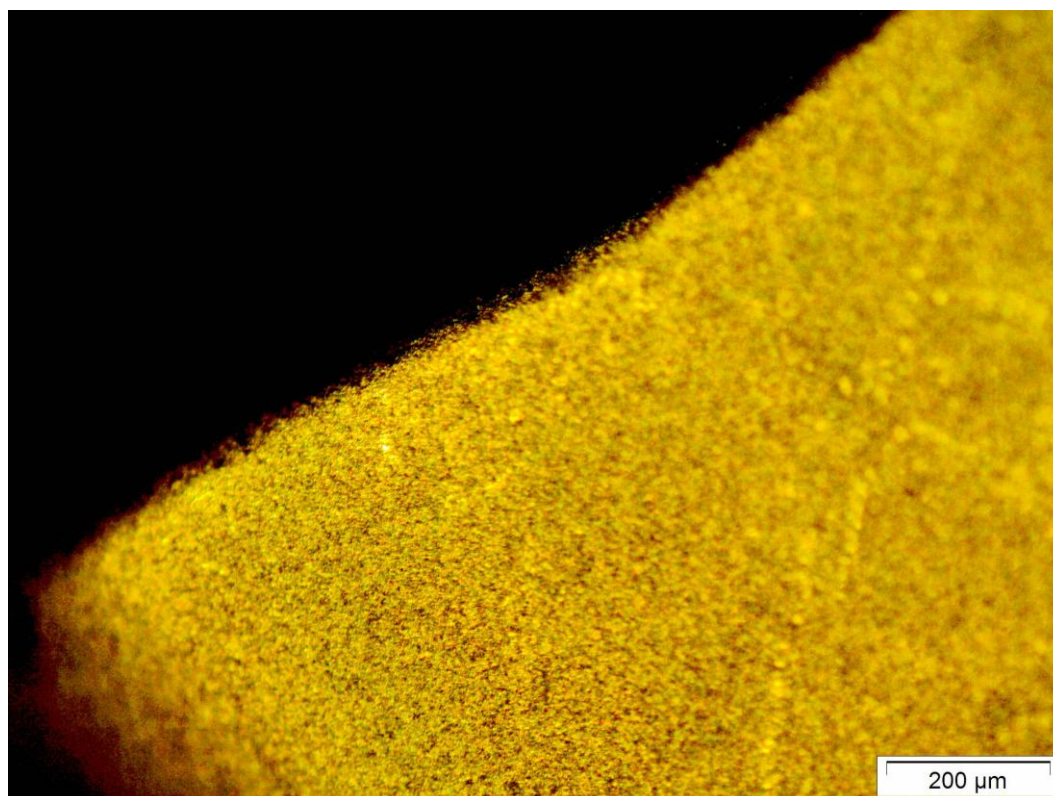


Figura 14. Fotos obtidas através do microscópio óptico da superfície de folga da ferramenta

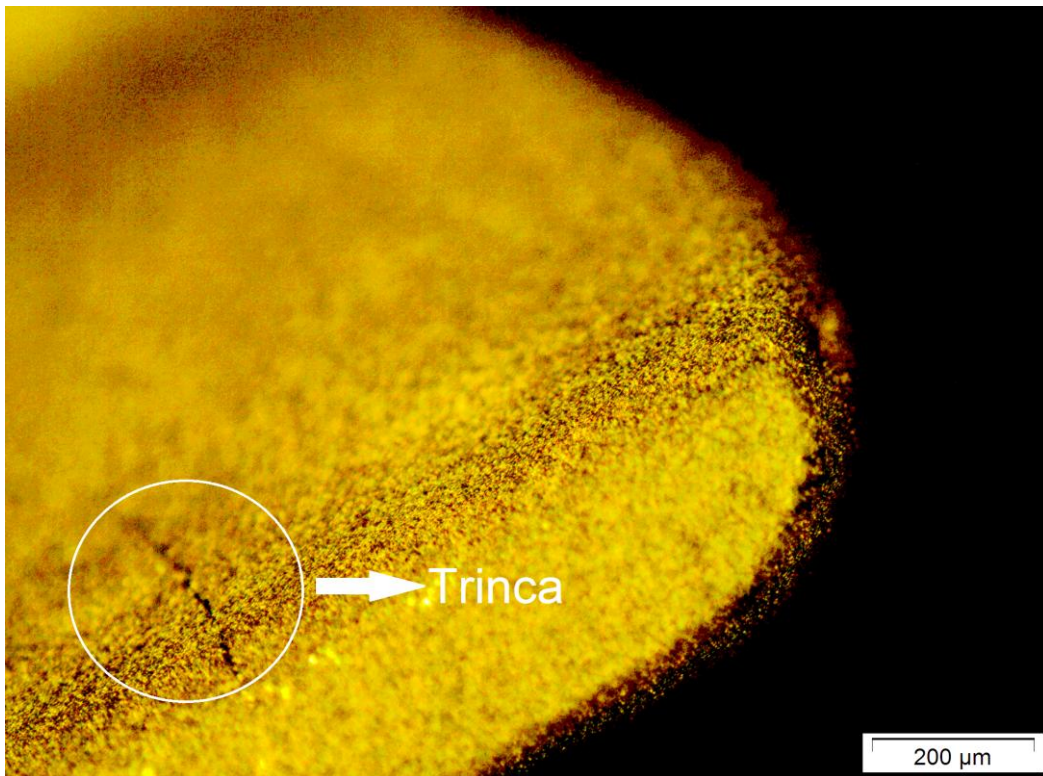


Figura 15. Fotos obtidas através do microscópio óptico da superfície de saída da ferramenta

3.1.4 Suporte externo para ferramenta

A ampla gama de porta-ferramentas e formatos existentes é capaz de cobrir a grande maioria das operações de torneamento, seja externo ou interno. O porta-ferramenta utilizado segue a padronização internacional das dimensões de ferramentas para torner, sendo compatível com a pastilha intercambiável.

O modelo do suporte é o MTJNR 2525 M16, resultando nas seguintes características, conforme representado na figura 16:

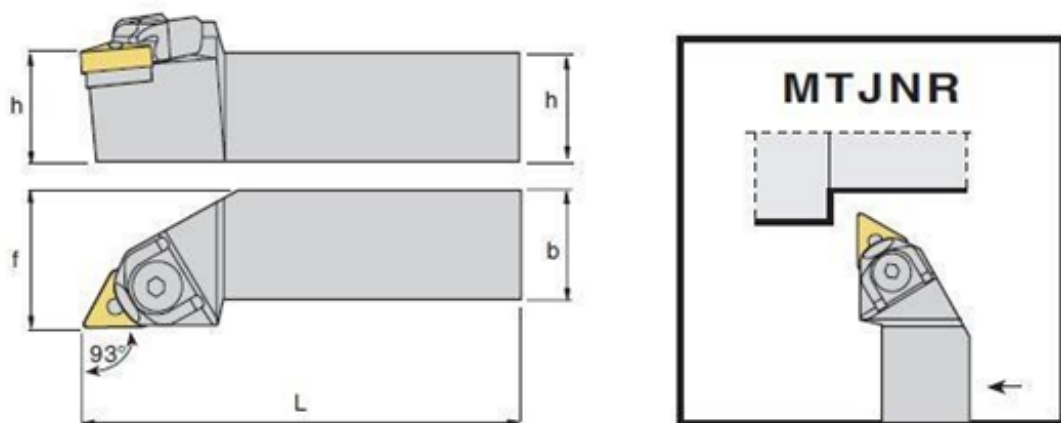


Figura 16. Detalhes do porta-ferramenta utilizado

3.1.5 Análise dos tipos e mecanismos de desgaste da ferramenta

As medidas dos desgastes foram realizadas por microscopia ótica, usando um estéreo microscópio marca Olympus, modelo BX51M, mostrado pela figura 17.

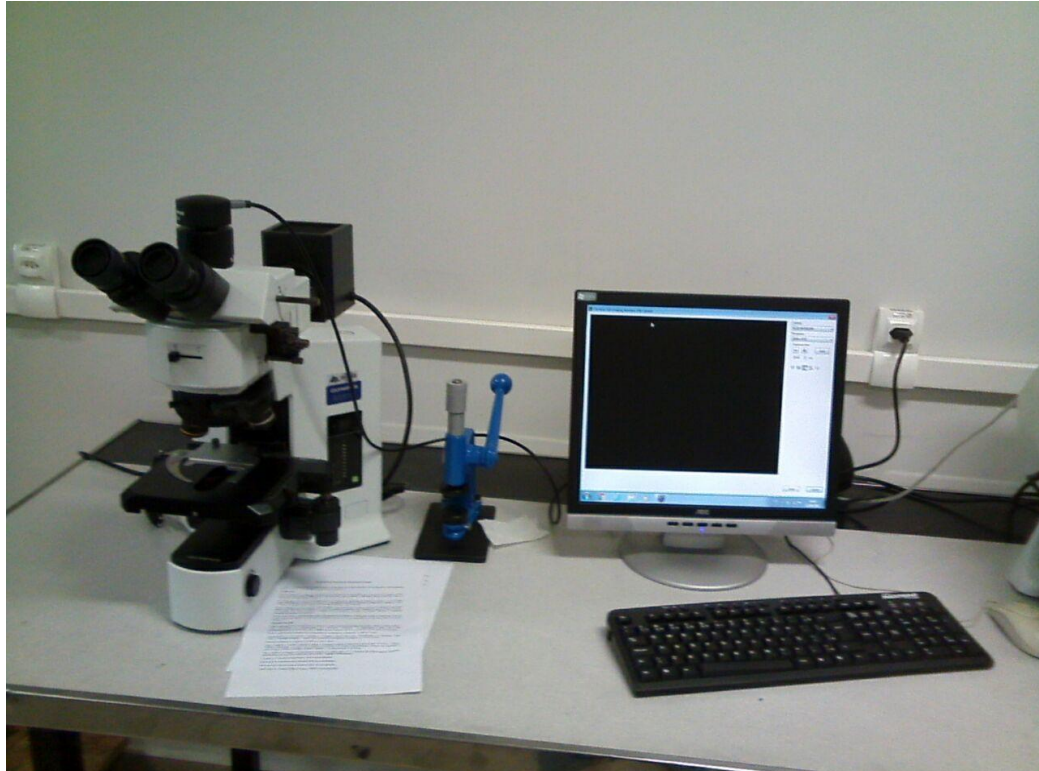


Figura 17. Microscópio utilizado para acompanhamento do desgaste nas ferramentas de corte.

3.2 TESTES EXPERIMENTAIS

Tabela 6. Condições de lubrificação e refrigeração nos ensaios

Condições de lubrificação e refrigeração		Parâmetros de usinagem
Experimento 1	Grafite puro	Constante
Experimento 2	Fluido de corte Unix solúvel 100	Constante
Experimento 3	Fluido de corte Unix solúvel 100 + 5% de grafite em peso	Constante
Experimento 4	Fluido de corte Unix solúvel 100 + 30% de grafite em peso	Constante

Fonte: Autor

3.2.1 Experimentos

- No primeiro experimento, utilizamos como condição de lubri-refrigeração o grafite puro, feito de forma manual sobre a ferramenta de metal duro.
- No segundo experimento, utilizamos como condição de lubri-refrigeração o Fluido de corte Unix solúvel 100, feito pelo sistema de jorro sobre a ferramenta de metal duro, com vazão de 2,0 l/min.
- No terceiro experimento, utilizamos como condição de lubri-refrigeração o Fluido de corte Unix solúvel 100 + 5% de grafite, feito pelo sistema de jorro sobre a ferramenta de metal duro, com vazão de 2,0 l/min
- No quarto experimento, utilizamos como condição de lubri-refrigeração o Fluido de corte Unix solúvel 100 + 30% de grafite, formando uma pasta grossa, feito pelo sistema de jorro sobre a ferramenta de metal duro, com vazão de 1,0 l/min.

3.3 ENSAIO DE VIDA DA FERRAMENTA DE CORTE

Os seguintes critérios foram adotados para determinar o fim de vida da ferramenta de corte, de acordo com a Norma ISO 3685 (1993):

- Desgaste de cratera máximo (K_B) $\geq 200 \mu\text{m}$;
- Falha catastrófica.

Para acompanhamento do desgaste das ferramentas de corte foi utilizado uma metodologia que consiste em medições periódicas do desgaste em intervalos predeterminados. A cada intervalo de 40 segundos de torneamento, a ferramenta era retirada do suporte e submetida à análise no microscópio, onde a sua superfície de saída era fotografada e as medições de desgaste eram realizadas através do software ImageJ.

CAPÍTULO IV

RESULTADOS

Este capítulo apresentará os resultados dos testes experimentais realizados, bem como as discussões pertinentes.

4.1 RESULTADOS DOS ENSAIOS COM FERRAMENTAS DE METAL DURO

4.1.1 Desgaste das ferramentas de metal duro

Neste tópico serão analisados os tipos de desgaste e os mecanismos envolvidos nas ferramentas de metal duro após usinar a liga de aço 1045 com diferentes condições de lubri-refrigeração. Para todas as condições de lubri-refrigeração foram observados desgaste de cratera, entalhe e de flanco, e também as avarias como quebras, trincas e lascamento. São mostradas a partir da figura 18, através das fotografias obtidas pelo microscópio óptico, as evoluções dos desgastes para cada ensaio realizado.

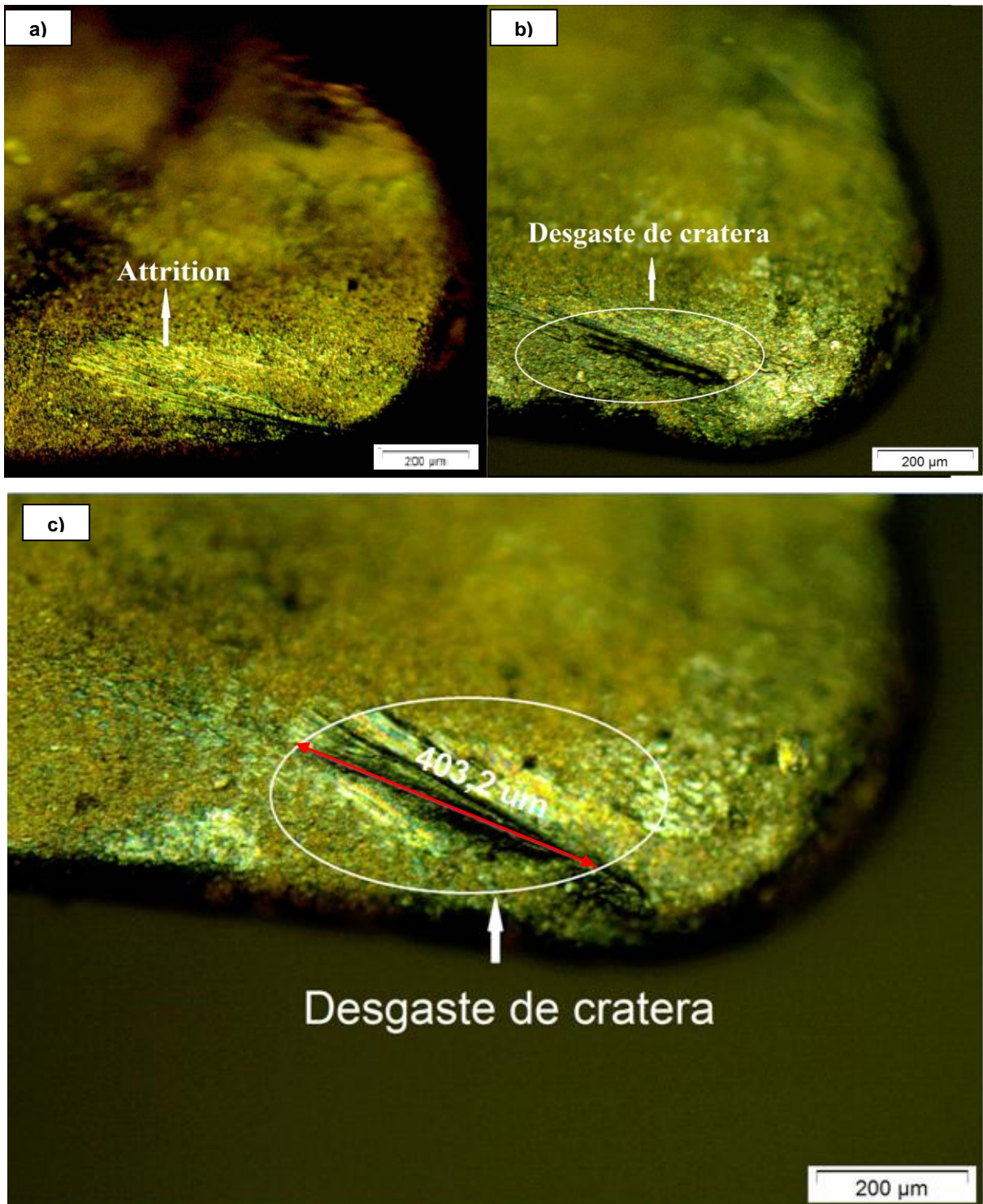


Figura 18. Evolução do desgaste de cratera da ferramenta a cada intervalo de 40 segundos de torneamento, a) após 40 seg b) após 80 seg c) após 120 seg, utilizando grafite puro.

Observa-se nas figuras da superfície de saída da ferramenta do primeiro experimento com uso de grafite puro, que o desgaste de cratera foi expressivo, apresentando uma largura de cratera final de 403,2 μm , medido através do software ImageJ. Regiões ásperas foram observadas, características de superfícies com perda de grãos, indicativo forte para predominância do mecanismo adesivo (*attrition*)

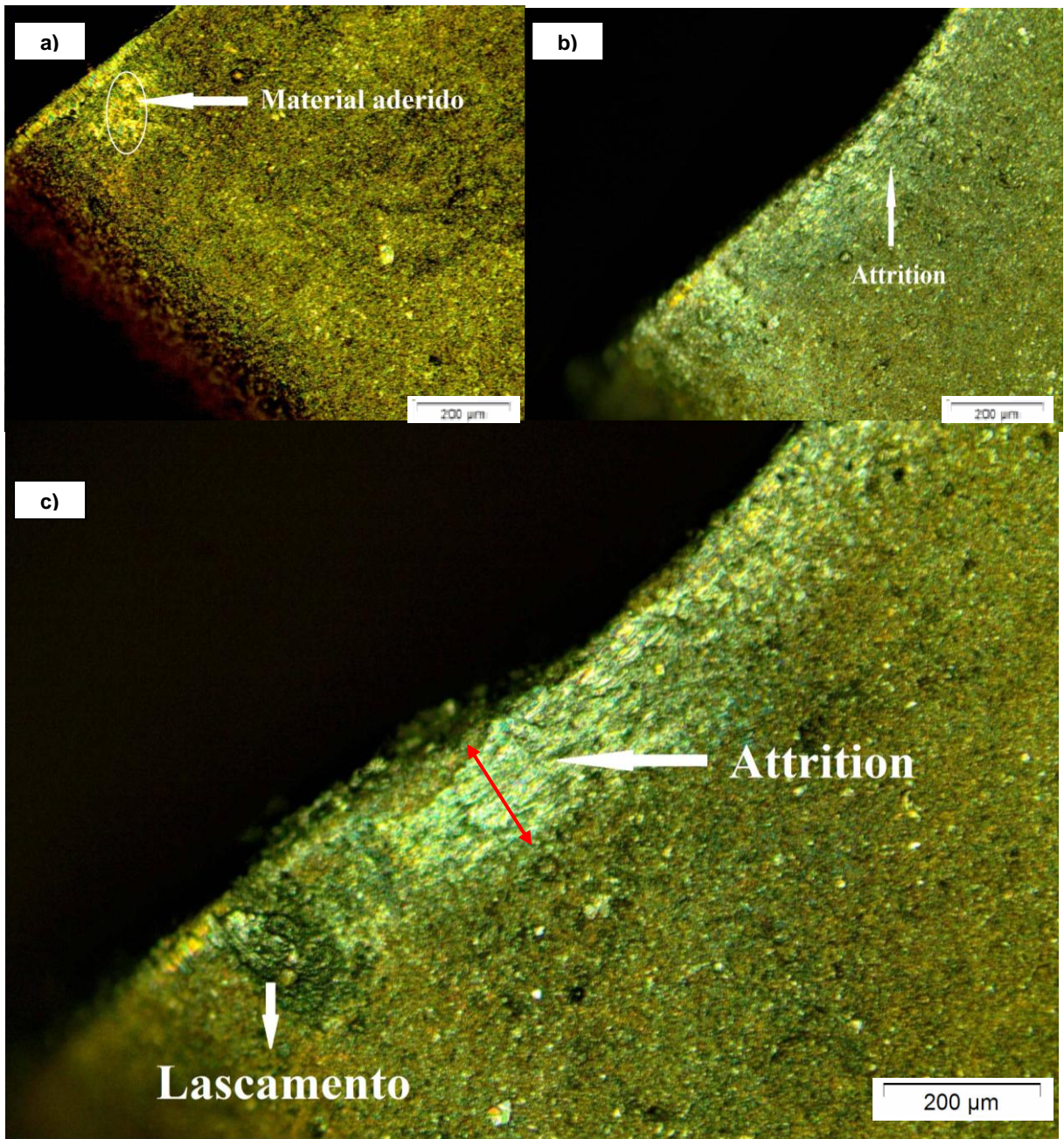


Figura 19. Evolução do desgaste de flanco da ferramenta a cada intervalo de 40 segundos de torneamento, a) após 40 seg b) após 80 seg c) após 120 seg, utilizando grafite puro.

Nas figuras de superfície de folga da ferramenta do primeiro experimento com uso de grafite puro, conseguimos notar o fenômeno da aderência (*attrition*), que segundo Trent e Wright (2000) está relacionado ao arrancamento de fragmentos microscópicos da superfície da ferramenta (grãos) quando o material escorrega sobre a superfície. Observou-se também a presença de lascamento.



Figura 20. Evolução do desgaste de cratera da ferramenta a cada intervalo de 40 segundos de torneamento, a) após 40 seg b) após 80 seg c) após 120 seg, utilizando Fluido de corte Unix solúvel 100.

Nas figuras da superfície de saída da ferramenta do segundo experimento utilizando fluido de corte Unix solúvel 100, notou-se a presença de material aderido, podendo dizer, então, que nesse tribossistema houve o mecanismo adesivo (*attrition*) e desgaste abrasivo. O desgaste de cratera foi menos aparente, porém apresentou um comprimento de 243,7 µm após 120 segundos de torneamento.

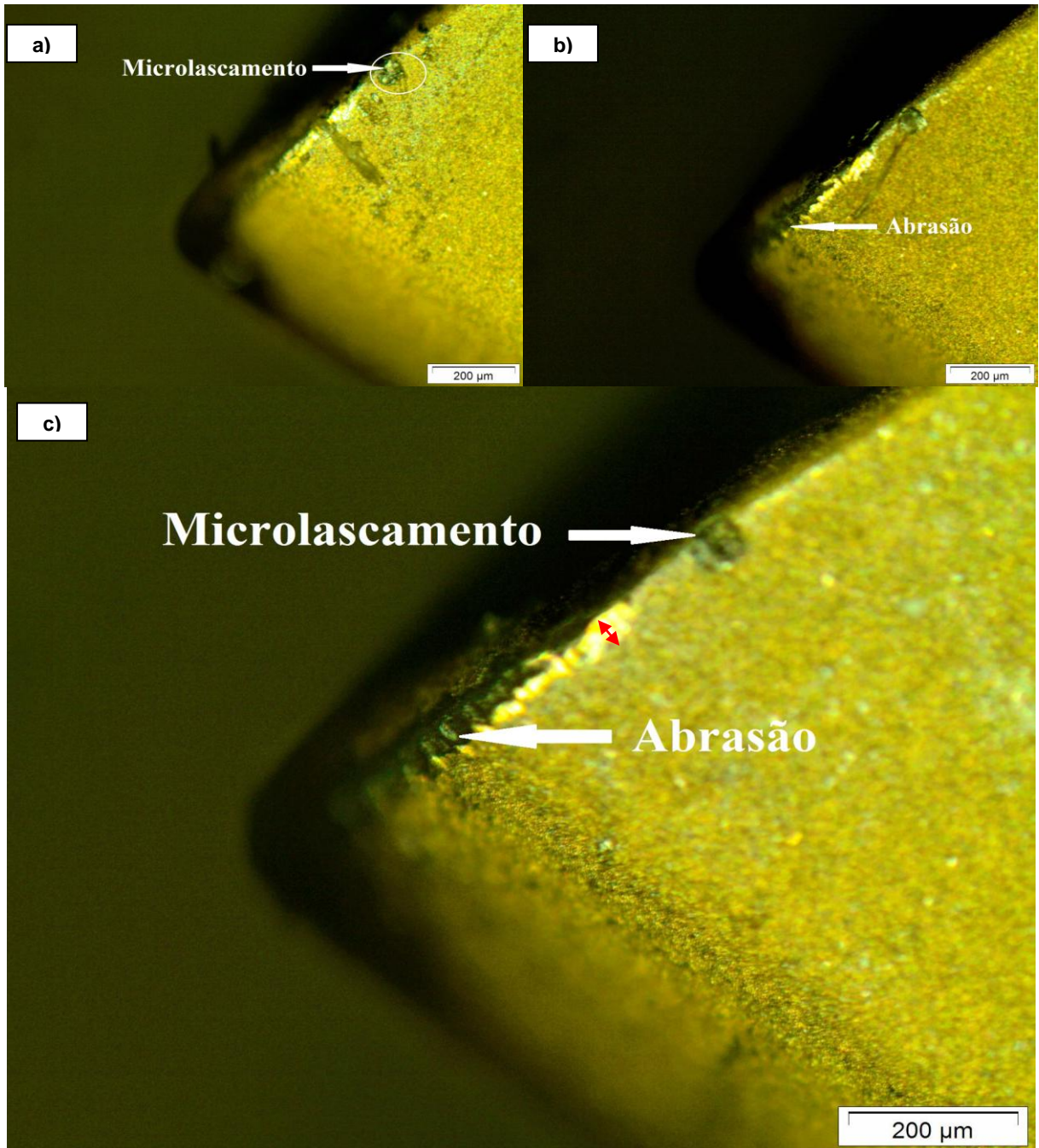


Figura 21. Evolução do desgaste de flanco da ferramenta a cada intervalo de 40 segundos de torneamento, a) após 40 seg b) após 80 seg c) após 120 seg, utilizando Fluido de corte Unix solúvel 100.

Na superfície de folga da ferramenta do segundo experimento utilizando fluido de corte Unix solúvel 100, é possível observar sulcos paralelos na direção do fluxo de material, indicativo da presença de desgaste por abrasão. A abrasão está relacionada à perda ou deslocamento de material da ferramenta (microcorte, microlascamento ou microssulcamento), podendo envolver deformação plástica e fratura frágil.

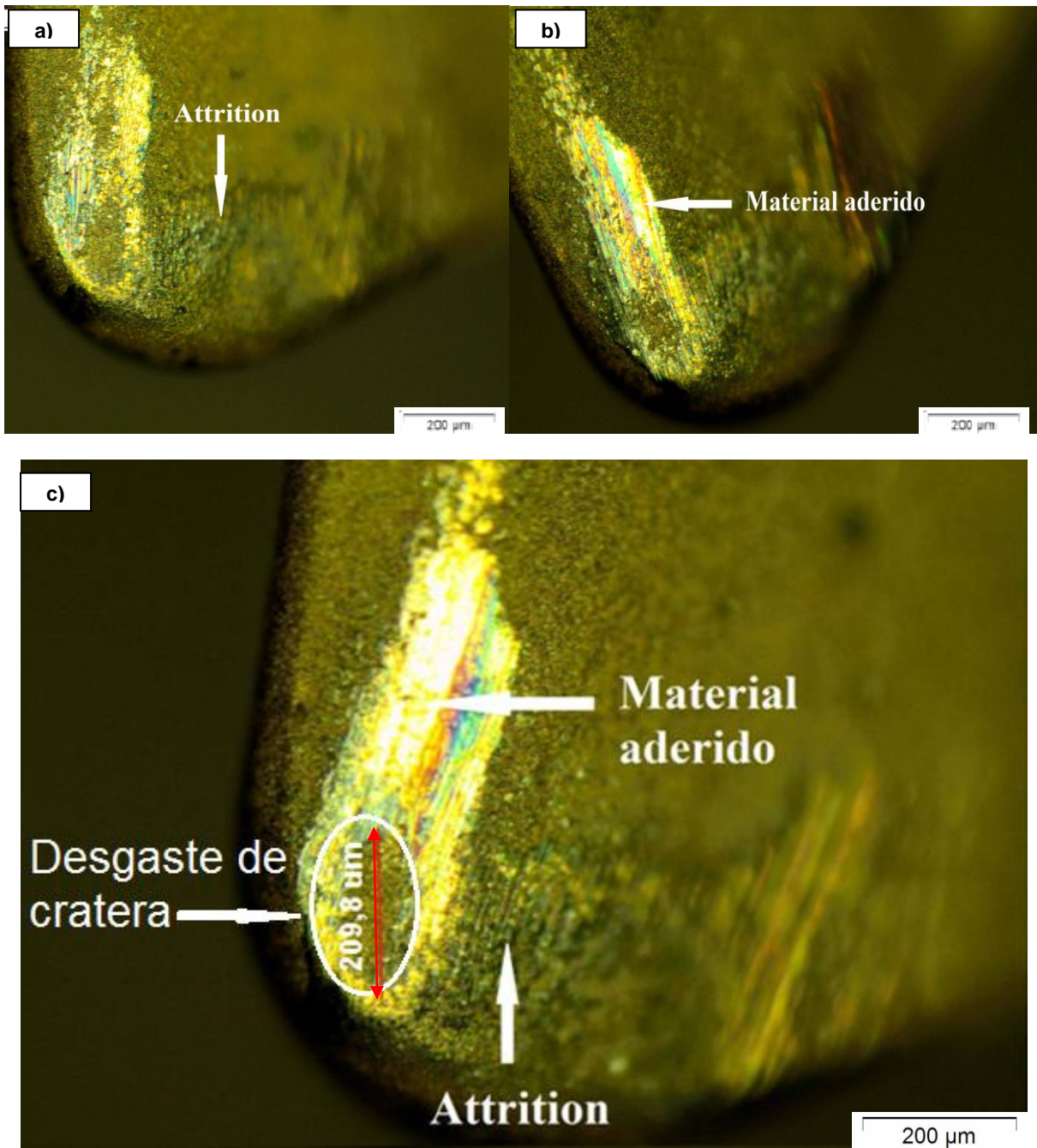


Figura 22. Evolução do desgaste de cratera da ferramenta a cada intervalo de 40 segundos de torneamento, a) após 40 seg b) após 80 seg c) após 120 seg, utilizando Fluido de corte Unix solúvel 100 + 5% de grafite.

Notou-se na superfície de saída da ferramenta do terceiro experimento utilizando fluido de corte Unix solúvel 100 + 5% de grafite, uma grande parcela de material aderido com um aspecto áspero, fato semelhante ao observado na figura 20(c), se tornando irregular, ocasionado pelo mecanismo da adesão (*attrition*) e abrasão. O desgaste de cratera foi observado entre a região de aderência de material, apresentando um comprimento final de 209,8 µm medido pelo software ImageJ.

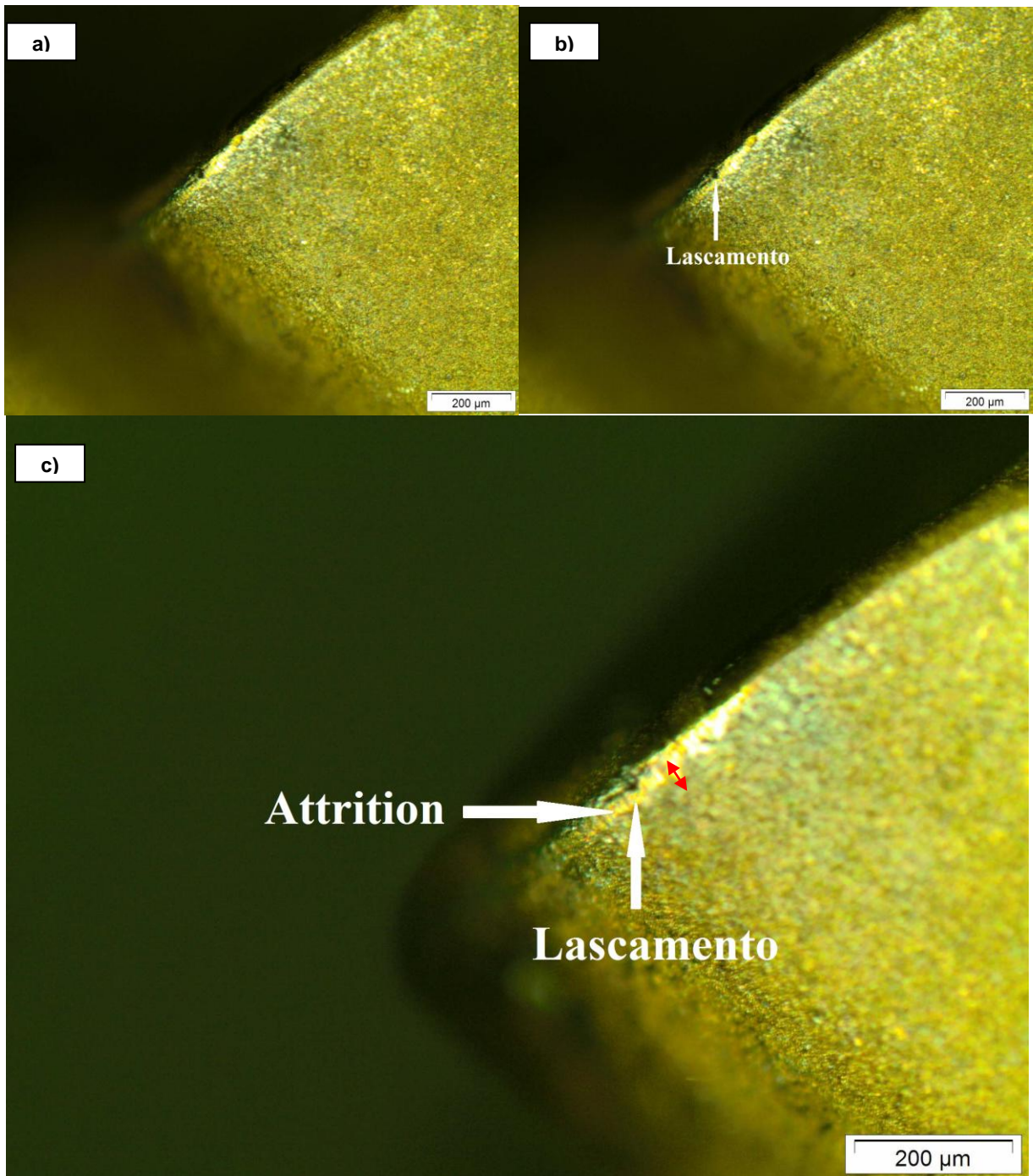


Figura 23. Evolução do desgaste de flanco da ferramenta a cada intervalo de 40 segundos de torneamento, a) após 40 seg b) após 80 seg c) após 120 seg, utilizando Fluido de corte Unix solúvel 100 + 5% de grafite.

Na superfície de folga da ferramenta do terceiro experimento utilizando fluido de corte Unix solúvel 100 + 5% de grafite, conseguimos observar o *attrition*, e a remoção de material da ferramenta (microlascamento), através da ação de partículas abrasivas, que podem ser tanto do material da peça quanto da ferramenta.

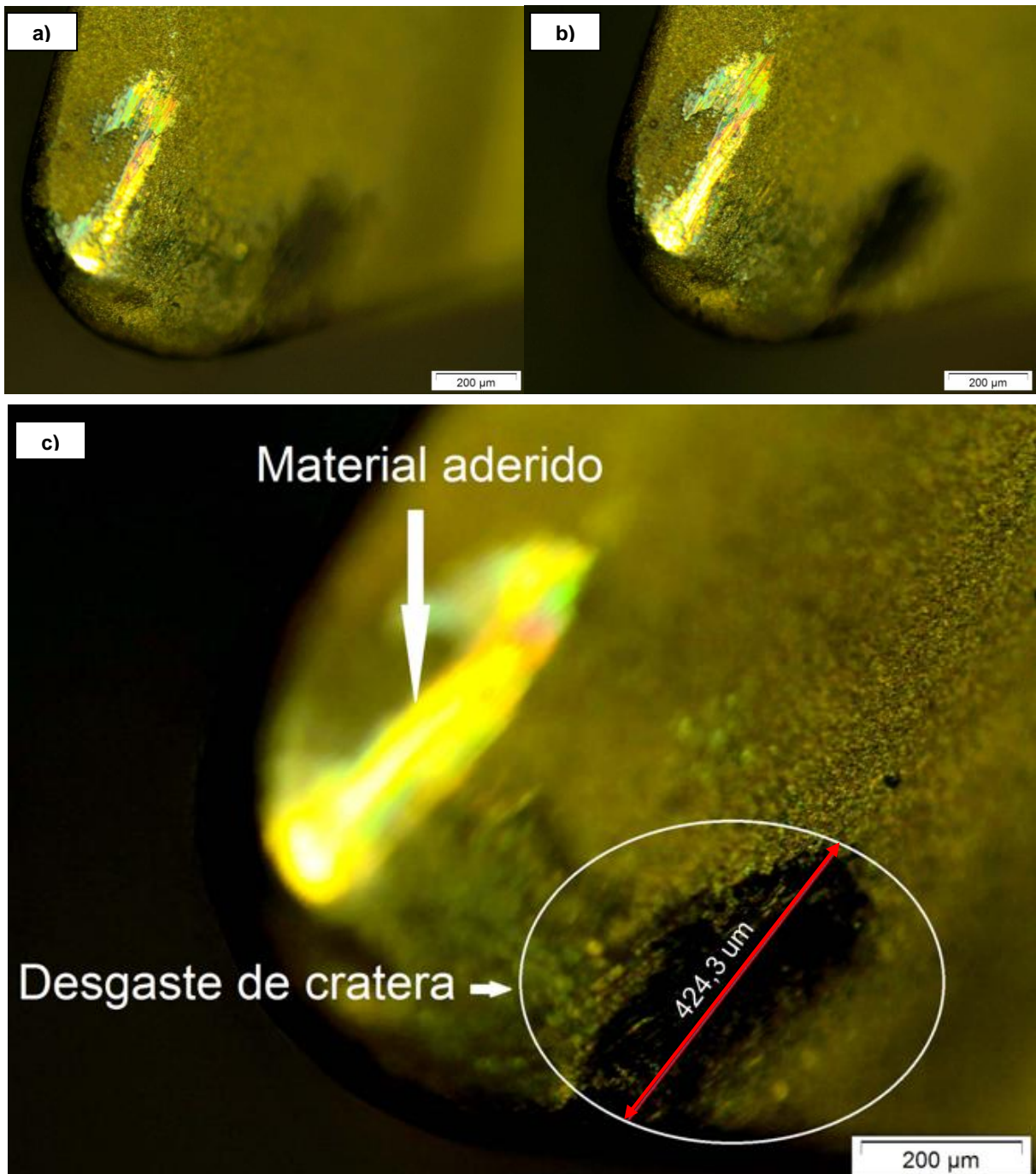


Figura 24. Evolução do desgaste de cratera da ferramenta a cada intervalo de 40 segundos de torneamento, a) após 40 seg b) após 80 seg c) após 120 seg, utilizando Fluido de corte Unix solúvel 100 + 30% de grafite.

Nas fotografias da superfície de saída da ferramenta do quarto experimento utilizando fluido de corte Unix solúvel 100 + 30% de grafite, o desgaste de cratera foi o mais expressivo dentre as diferentes condições de lubri-refrigeração, apresentando uma largura de cratera final de 424,3 μm após 120 segundos de torneamento. Apresentou também, uma camada de material aderido nesta aresta, semelhante as figuras 20(c) e 22(c).

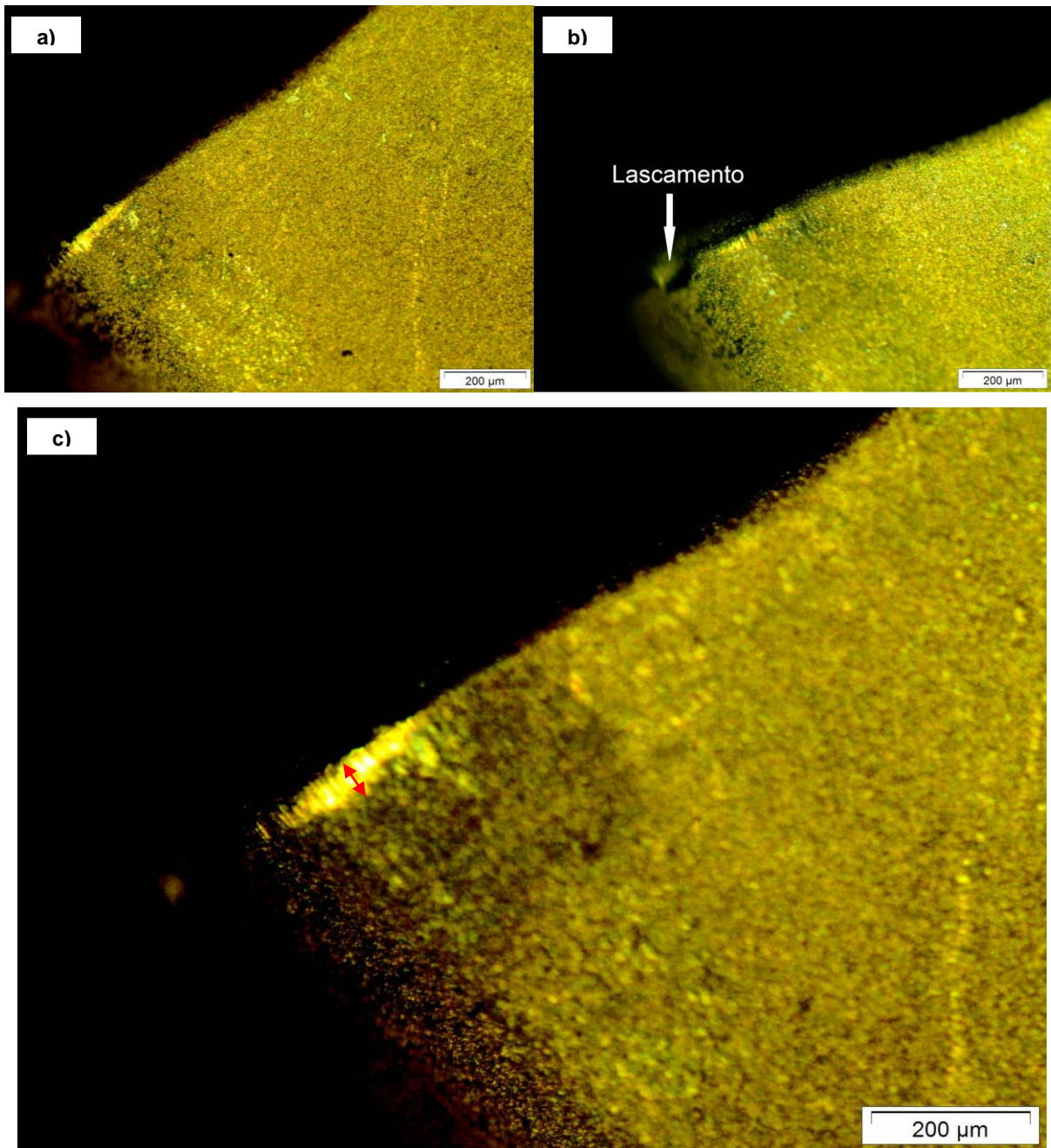


Figura 25. Evolução do desgaste de flanco da ferramenta a cada intervalo de 40 segundos de torneamento, a) após 40 seg b) após 80 seg c) após 120 seg, utilizando Fluido de corte Unix solúvel 100 + 30% de grafite.

Para a superfície de folga do quarto experimento utilizando fluido de corte Unix solúvel 100 + 30% de grafite, não houve um desgaste de flanco significativo, mas foi observado um pequeno material removido da ferramenta, o chamado lascamento.

4.1.2 Influência dos lubrificantes sólidos aplicado na zona de corte pela técnica do jorro

Para avaliar a influência dos lubrificantes sólidos na mistura com o fluido de corte aplicado por jorro, mantivemos todos os parâmetros constantes, repetindo os mesmos experimentos realizados para a retirada das fotografias da evolução do desgaste na interface das ferramentas.

A vida da ferramenta de corte foi avaliada em termos de tempo de usinagem, de acordo com os critérios definidos. A partir do gráfico representado pela figura 26, observam-se os resultados do desgaste da ferramenta em função do tempo de usinagem para todas as condições lubri-refrigerantes aplicadas. De um modo geral pode-se observar que para todas as condições de lubri-refrigeração os resultados apresentam uma curva característica.

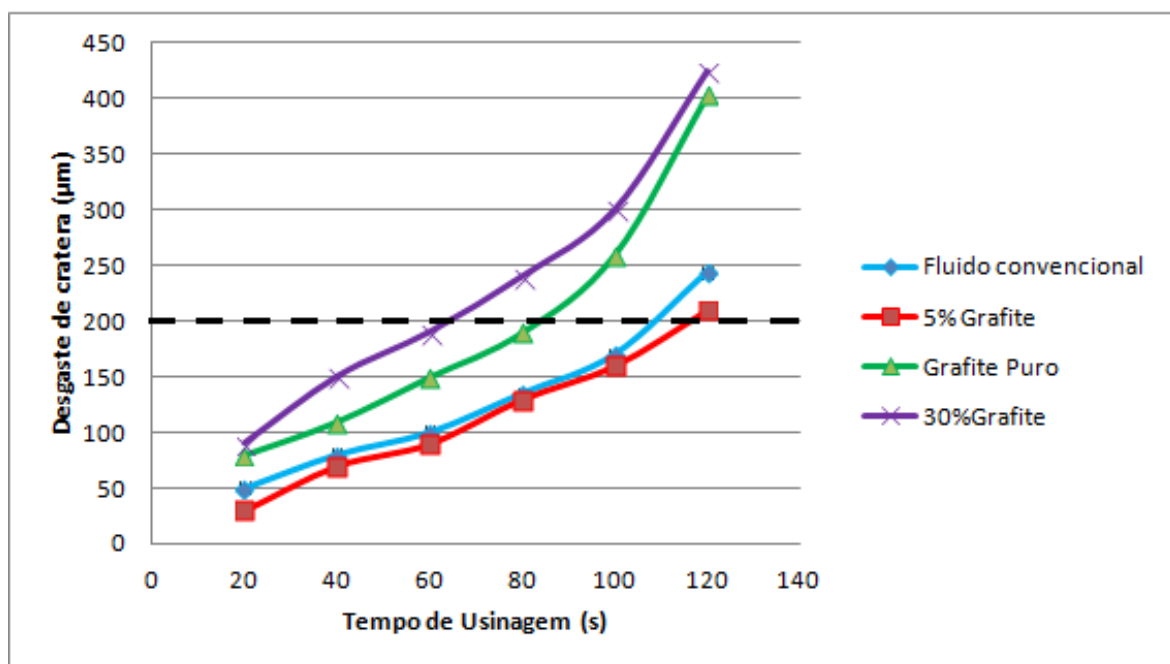


Figura 26. Desgaste de cratera x Tempo de usinagem, velocidade de corte 120 m/min, avanço 0,15 mm/rot e profundidade de corte 0,5 mm.

Estes resultados demonstram que o grafite na proporção ideal pode promover não só a refrigeração da ferramenta de corte, mas, também está contribuindo na redução do atrito na interface cavaco/ferramenta/peça. Isto pode ser observado na figura 27, na qual demonstra que a vida da ferramenta aumentou com a adição de 5% de lubrificante sólido na mistura, pois atingiu o critério de 200 µm de desgaste de cratera em maior tempo de usinagem que as outras condições.

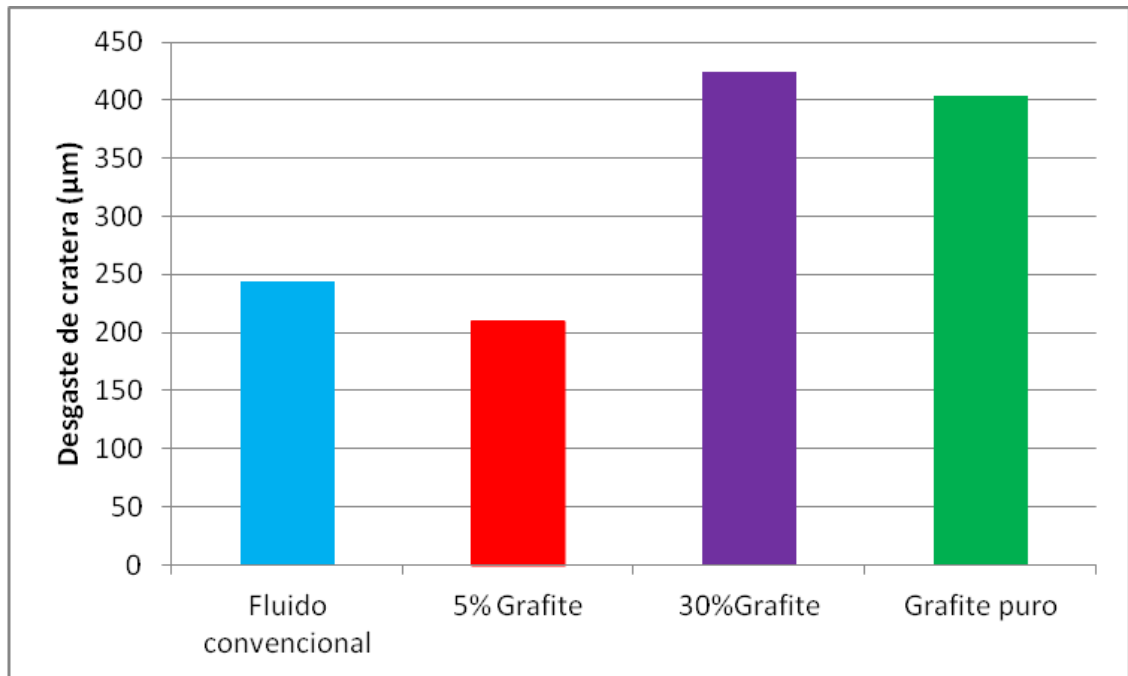


Figura 27. Largura de cratera final, após 120 segundos de torneamento.

A adição de 5% de grafite ao fluido de corte sugere uma redução no atrito na interface cavaco/ferramenta/peça, pois estatisticamente houve diferença significativa para as diferentes condições de lubri-refrigeração, assim demonstra que parece ser uma concentração ideal, uma vez que a maior concentração de 30% não mostrou os mesmos resultados. Segundo (MARQUES, 2015), a maior viscosidade nesta concentração pode ter prejudicado a penetração na interface cavaco-ferramenta, diminuindo assim a função lubrificante do fluido.

CAPÍTULO V

CONCLUSÃO

Pelos resultados experimentais apresentados na pesquisa, é possível tirar as seguintes conclusões:

- A aplicação do fluido de corte de forma convencional (jorro) com concentração de 5% de grafite, promoveu um aumento na vida da ferramenta de 9%,39% e 81%, respectivamente, quando comparado com o Fluido de corte Unix solúvel 100, grafite puro e com adição de 30% de grafite.
- A largura de cratera para as condições de lubri-refrigeração com Fluido de corte Unix solúvel 100, grafite puro e com adição de 30% de grafite, foi maior 16%,92% e 102%, respectivamente, quando comparado a concentração de 5% de grafite.
- O experimento utilizando grafite puro foi ruim devido à má aderência do grafite na interface da ferramenta, que foi arrastado da superfície quando iniciou a usinagem, portanto, não formando uma película sobre a superfície da ferramenta e assim não cumprindo sua função lubrificante.
- Na usinagem com ferramentas de metal duro com revestimento TiN, o desgaste de cratera foi predominante.
- Em todos os experimentos houve a retirada de grandes partículas da ferramenta, o chamado lascamento.
- Foram observadas a presença de lascamento, microlascamentos e microtrincas.
- Para todas as condições avaliadas, o mecanismo de desgaste predominante foi o *attrition* (aderência ou arrastamento).
- O uso de 30% de grafite na solução apresentou o pior resultado dentre as diferentes condições de lubrificação.

- O grafite é um lubrificante relativamente livres de perigos inerentes ao uso para o operador, contribuindo para uma usinagem sustentável de materiais avançados de engenharia.
- A adição de lubrificantes sólidos ao fluido de corte em concentração de 5% promoveu a redução do desgaste de flanco e cratera, podendo ser uma alternativa viável ao fluido de corte convencional.
- A adição de 5% de grafite demonstra que parece ser uma boa concentração, apresentando os melhores resultados.
- A maior viscosidade na concentração de 30% prejudicou a penetração na interface cavaco-ferramenta, diminuindo assim a função lubrificante do fluido.
- O uso do grafite promove uma usinagem não tão limpa.

SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

- Investigar a utilização de lubrificantes sólidos no torneamento do aço 1045, aplicando a técnica MQF.
- Avaliar qual a melhor concentração do lubrificante sólido (Grafite ou Bissulfeto de Molibdênio) a ser misturado ao fluido de corte convencional.
- Avaliar a influência do lubrificante sólido em termos de componentes da força de usinagem, temperatura e rugosidade superficial.
- Analisar a viabilidade econômica do lubrificante sólido no torneamento para diferentes tipos de ligas e ferramentas.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

BOOTHROOYD, G. **Fundamentals of metal machining and machine tools**. 5ed. Internacional student edition. Nova York: McGraw-Hill, 1981.

DEARNLEY, P. A., TRENT, E.M., **Wear mechanisms of coated carbides tools**. Metals technology. V. 09, p. 60 – 75, fevereiro 1982.

DINIZ, A.E.; MARCONDES, F.C.; COPPINI, N.L. **Tecnologia Da Usinagem Dos Materiais** 2.ed. São Paulo: Artiliber Editora, 2000.

DINIZ, A. E., MICARONI, R. **Influence of the direction and flow rate of the cutting fluid on tool life in turning process of AISI 1045 steel**. International Journal of Machine Tools & Manufacture v.47, p.247–254, 2007.

FERRARESI, D. **Fundamentos da usinagem dos metais**. São Paulo: Blucher, 1977.

FERRARESI, Dino. **Fundamentos da Usinagem dos Metais**. 6. ed. São Paulo, Editora Edgard Blücher Ltda. 1986

FERRARESI, D. **Fundamentos da Usinagem dos Metais**, 12ª ed. São Paulo; Edgard Blucher, 2006. 751p.

HUTCHINGS, I.M., **Tribology, Friction and Wear of Engineering Materials**, Arnold, 4th edition,1992.

KRISHNA, P. V., RAO, D. N. **Performance evaluation of solid lubricants in terms of machining parameters in turning**, International Journal of Machine Tools & Manufacture, 48 (2008) 1131–1137.

MACHADO, A. R. et al. **Teoria da usinagem dos materiais**. 2 ed. São Paulo: Blucher, 2011.

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

MACHADO, A. R.; SILVA, M. B.; COELHO, R. T.; ABRÃO, A. M.; **Teoria da Usinagem dos Metais**, 3ª ed. São Paulo; Editora Edgard Blucher, 2015.

MACHADO, ABRÃO, COELHO, SILVA. **Teoria da Usinagem dos Materiais**. São Paulo: Editora Blucher, 2009.

MARQUES, A. **Torneamento de inonel 718 com aplicação de lubrificantes sólidos**. 2015. 202 f. Doutorado em engenharia mecânica - Universidade Federal de Uberlândia, Minas Gerais.

MEIRELLES, G.S.C. (2000). **Desenvolvimento de sistema de aquisição de dados em operações de usinagem visando o monitoramento de linhas ou células de produção**. São Carlos, 2000. 97p. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.

NAGESWARA, D. R; KRISHNA, P. V., **The influence of solid lubricant particle size on machining parameters in turning**, International Journal of Machine Tools & Manufacture, 48 (2008) 107–111.

RAO, D. N., KRISHNA, P. V. **The influence of solid lubricant particle size on machining parameters in turning**, International Journal of Machine Tools & Manufacture, 48 (2008) 107–111.

REDDY, N.S.K., NOUARI, M., **The influence of solid lubricant for improving tribological properties in turning process**, Lubrication Science, 23 (2011) 49–59.

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

REDDY, N. S. K., RAO, P. V., **Experimental investigation to study the effect of solid lubricants on cutting forces and surface quality in end milling**, International Journal of Machine Tools & Manufacture, 46 (2006) 189–198

SHAJI, S., RADHAKRISHNAN, V. **An investigation of a solid lubricant moulded grinding wheels**. International Journal of Machine Tools and Manufacture 43 (2003) 965–972.

TEDESCO, M.E. **Variação Dimensional e Microestrutural do Aço AISI 4140 em Peças Usinadas por Torneamento**. Dissertação de Mestrado. Universidade de Caxias do Sul, p.69, 2007.

TRENT, M. C., WRIGHT, P. K., **Metal Cutting Principles** – 4th edition, Butterworth – Heinemann, USA, 2000.

TRENT, E. M. **Metal cutting**. 2 ed. Londres: Butterworths & Co., 1985.

VENUGOPAL, A., RAO, P. V. **Performance improvement of grinding of SiC using graphite as a solid lubricant**. Materials and Manufacturing Processes 19 (2) (2004) 177–186.

ZAILANI, Z.A., HAMIDON, R., HUSSIN, M.S., HAMZAS, M.F.M.A., HADI, H. **The Influence of Solid Lubricant In Machining Parameter of Milling Operation**, International Journal of Engineering Science and Technology (IJEST), Vol. 3 (2011)

ANEXO 1 – TERMO DE AUTENTICIDADE



UNIVERSIDADE FEDERAL DE JUIZ DE FORA
FACULDADE DE ENGENHARIA

Termo de Declaração de Autenticidade de Autoria

Declaro, sob as penas da lei e para os devidos fins, junto à Universidade Federal de Juiz de Fora, que meu Trabalho de Conclusão de Curso do Curso de Graduação em Engenharia de Mecânica é original, de minha única e exclusiva autoria. E não se trata de cópia integral ou parcial de textos e trabalhos de autoria de outrem, seja em formato de papel, eletrônico, digital, áudio-visual ou qualquer outro meio.

Declaro ainda ter total conhecimento e compreensão do que é considerado plágio, não apenas a cópia integral do trabalho, mas também de parte dele, inclusive de artigos e/ou parágrafos, sem citação do autor ou de sua fonte.

Declaro, por fim, ter total conhecimento e compreensão das punições decorrentes da prática de plágio, através das sanções civis previstas na lei do direito autoral¹ e criminais previstas no Código Penal², além das cominações administrativas e acadêmicas que poderão resultar em reprovação no Trabalho de Conclusão de Curso.

Juiz de Fora, _____ de _____ de 20____.

NOME LEGÍVEL DO ALUNO (A)

Matrícula

ASSINATURA

CPF

¹ LEI Nº 9.610, DE 19 DE FEVEREIRO DE 1998. Altera, atualiza e consolida a legislação sobre direitos autorais e dá outras providências.

² Art. 184. Violar direitos de autor e os que lhe são conexos: Pena – detenção, de 3 (três) meses a 1 (um) ano, ou multa.