

**CENTRO FEDERAL DE EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA  
CELSO SUCKOW DA FONSECA – CEFET/RJ**

**Análise do Desgaste da Ferramenta de Corte no  
Fresamento do Aço SAE 4340**

Rafael da Cunha Hamano

Prof.<sup>a</sup> Orientadora: Tatiane de Campos Chuvas

**Rio de Janeiro  
junho de 2017**

**CENTRO FEDERAL DE EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA  
CELSO SUCKOW DA FONSECA – CEFET/RJ**

# **Análise do Desgaste da Ferramenta de Corte no Fresamento do Aço SAE 4340**

Rafael da Cunha Hamano

Projeto final apresentado em cumprimento às  
normas do Departamento de Educação Superior do  
CEFET/RJ, como parte dos requisitos para obtenção  
do título de Bacharel em Engenharia Mecânica.

Prof.<sup>a</sup> Orientadora: Tatiane de Campos Chuvas

**Rio de Janeiro  
junho de 2017**

# FICHA CATALOGRÁFICA

## **DEDICATÓRIA**

Dedico este trabalho à minha futura esposa, Mariana Neder; ao meu primeiro professor de mecânica, meu amado avô Manuel Pinto da Cunha; aos meus pais Victor e Fátima Hamano, à minha irmã Raquel Hamano, aos meus avós Amélia, Takako e Takashi Hamano. Dedico também à professora Tatiane Chugas e aos professores do CEFET/RJ que contribuíram na minha formação.

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço a todos que me incentivaram e auxiliaram na jornada acadêmica, ao Pai Celestial e aos anjos, a minha futura esposa Mariana Neder e família; aos meus pais Victor e Fátima, a minha irmã Raquel; aos meus amados avós; ao padrinho Manuel Cunha; ao José Júnior e família; a tia Ângela e família; aos amigos Filipe Nogueira, Thuany Nascimento, Gabriel Macedo, Matheus Patrick, Beatriz Klotz.

Agradeço à orientadora e amiga Professora Tatiane Chuvas, que conduziu o estudo com muita paciência, sempre incentivando a excelência na pesquisa.

## RESUMO

A usinagem é um dos processos de fabricação mais populares do mundo, mas apesar dessa popularidade, trata-se de um processo complexo em razão das dificuldades em determinar as condições ideais de corte, capazes de produzir peças dentro de especificações de forma, tamanho e acabamento ao menor custo possível. Deste modo o estudo sobre o desgaste das ferramentas de corte aplicadas na usinagem é um fator fundamental para a indústria, pois o mesmo impacta diretamente nos custos de operação. O desgaste de ferramentas está diretamente relacionado principalmente aos parâmetros de usinagem usados, tais como, velocidade de corte, avanço e profundidade de corte, além do material da peça. Por esta razão, a otimização desses parâmetros de corte possibilita uma redução de custo na usinagem por proporcionar maior vida da ferramenta, ou seja, maior tempo de usinagem.

Este trabalho tem por objetivo analisar como os parâmetros de usinagem (velocidade corte e profundidade e corte) afetam no tipo e no tempo de desgastes de ferramentas de corte no fresamento de topo do aço SAE 4340. Para isso foram realizadas análises de imagem através de estereoscópio para a observação, e medição, da degradação da ferramenta de corte. Os resultados mostraram que o desgaste de flanco foi o predominante em todas as condições estudadas. Contudo, nas condições de menor velocidade de corte foi possível observar também adesão de material, que aumentou o desgaste da ferramenta. Complementarmente foram realizados ensaios de rugosidade a fim de correlacionar o nível de desgaste com a qualidade superficial da peça usinada.

Palavras chaves: Fresamento, Desgaste de Ferramenta, Aço 4340, Rugosidade.

## ABSTRACT

In spite of the fact that machining is one of the most popular manufacturing processes in the world, it is a complex procedure due to the difficulties in determining the cutting conditions, capable of producing parts within shape specifications, such as size and finish at the lowest possible cost. The study on cutting tool wear applied in the machining is a major factor for the industry since it has a direct impact on the operational costs. Tool wear is mainly related to the machining parameters assessed, such as cutting speed, feed rate and depth of cut, and the machined sample material. For this reason, the optimization of these cutting parameters empowers a cost reduction in machining by providing longer tool life plus longer machining time. This work aims to evaluate how the machining parameters (cutting speed and depth and cut) affect the type and time of the cutting tool wear in the top milling of 4340 steel. Stereoscopic image analysis was performed to promote observation and measurement of the degradation of the cutting tool. The results showed that the flank wear was the predominant in all conditions studied. Nevertheless, it was also possible to observe adhesion under the conditions of lower cutting speed, which has led to a tool wear increasing. In addition, roughness tests were performed in order to correlate the level of wear with the surface quality of the machined part.

Keywords: Milling, Tool Wear, Steel 4340, Roughness.

## LISTA DE FIGURAS

<b>Figura 1:</b> Principais modos de fresamento: a) Fresamento frontal; b) Fresamento tangencial discordante ( [2] modificado). .....	4
<b>Figura 2:</b> Direções dos movimentos de corte no fresamento tangencial discordante [2]......	5
<b>Figura 3:</b> Desgaste frontal ou de flanco [6]......	7
<b>Figura 4:</b> Representação do desgaste de Flanco ( [7] modificado). .....	8
<b>Figura 5:</b> Desgaste de entalhe [8]. .....	8
<b>Figura 6:</b> Desgaste de cratera [8]......	9
<b>Figura 7:</b> Deformação plástica [8]......	9
<b>Figura 8:</b> Lascamento [8]. .....	10
<b>Figura 9:</b> Trinca de origem térmica [8]. .....	10
<b>Figura 10:</b> (a) Posicionamento do bico do sistema de lubri-refrigeração durante os testes de fresamento; (b) Vista superior mostrando o posicionamento do bico do sistema de lubri-refrigeração em relação ao conjunto fresa/bico difusor/peça [10]. .....	11
<b>Figura 11:</b> Desgaste de flanco médio avaliado nos insertos ensaiado após o percurso de avanço $L_f = 11200$ mm( [10], modificado). .....	12
<b>Figura 12:</b> Aresta de corte dos insertos ao final da usinagem para as seis condições de refrigeração ([6] modificado). .....	13
<b>Figura 13:</b> Trinca de origem mecânica [11]......	14
<b>Figura 14:</b> Quebra da ferramenta [12]......	15
<b>Figura 15:</b> Aresta postiça [8]......	15
<b>Figura 16:</b> a) desgaste abrasivo por riscamento; b) desgaste abrasivo por rolamento( [14] modificado)......	16
<b>Figura 17:</b> (a) Superfície de folga da ferramenta de metal duro com cobertura (b) Detalhamento da região A [16]. .....	19
<b>Figura 18:</b> (a) Superfície de folga da ferramenta de metal duro sem cobertura (b) Detalhamento da região A [16]. .....	19
<b>Figura 19:</b> Desgaste de cratera e de flanco na aresta principal para $x_r = 45^\circ$ , $ap = 0,5$ mm e $vc = 70$ m/min( [17] modificado).....	20
<b>Figura 20:</b> Desgaste de flanco com difusão e aderência de níquel [17]......	21
<b>Figura 21:</b> Progressão do desgastede flanco e entalhe [18]. .....	22
<b>Figura 22:</b> Evolução do desgaste na ferramenta no ensaio sem refrigeração $vc = 120$ m/min, $fz = 0,10$ mm/dente, (a) $2^\circ$ passe, (b) $4^\circ$ passe e (c) $12^\circ$ passe [11]. .....	23

<b>Figura 23:</b> Evolução do desgaste na ferramenta no ensaio $v_c = 120\text{m/min}$ . $f = 0,05$ com refrigeração, (a) 2° passe, (b) 4° passe, (c) 10° passe, (d) 14° passe, (e) 18° passe, (f) 20° passe. (15X) [11].	24
<b>Figura 24:</b> Curvas de evolução do desgaste no ensaio com $V_c = 120\text{m/min}$ , $f_z = 0,10\text{mm/dente}$ (a) ferramenta 1, (b) ferramenta 2 e (c) ferramenta 3 [11].	25
<b>Figura 25:</b> Vida da ferramenta em função de diferentes condições de usinagem [20].	27
<b>Figura 26:</b> Rugosidade $R_a$ ao longo da vida da ferramenta em função da velocidade corte utilizada [24].	29
<b>Figura 27:</b> Desgaste de flanco VB na usinagem com fluido lubrificante, usinagem a seco, na condição Jorro e na condição MQL. ([16] modificado)	30
<b>Figura 28:</b> Final da vida das arestas de corte na condição (a) seco, (b) jorro e (c) MQL ([25] modificado).	31
<b>Figura 29:</b> Representação da amostra em aço 4340 utilizada no fresamento.	33
<b>Figura 30:</b> Fresadora Diplomat 3001 modelo FVF 2000.	34
<b>Figura 31:</b> Inseto utilizado no fresamento	35
<b>Figura 32:</b> Estereoscópio Studar Lab, produzido por Metrimpex e Labimex, modelo PZ0.	35
<b>Figura 33:</b> Desgaste de flanco para a condição ( $v_c = 40\text{ m/min}$ , $ap = 0,6\text{mm}$ ) para (a) $t_c = 30\text{ min}$ , (b) $t_c = 40\text{ min}$ e (c) ferramenta nova.	38
<b>Figura 34:</b> Comparação das quatro condições de usinagem após 40 minutos	39
<b>Figura 35:</b> Desgaste na superfície de saída das ferramentas.	40
<b>Figura 36:</b> Análise dos desgastes da ferramenta após 30 minutos de usinagem.	41
<b>Figura 37:</b> Gráfico do desgaste de flanco durante o fresamento frontal.	42
<b>Figura 38:</b> Desgaste de entalhe na condição $v_c = 40\text{ m/min}$ , $ap = 0,6\text{mm}$ .	43
<b>Figura 39:</b> Rugosidade para diferentes tempos de usinagem.	44
<b>Figura 40:</b> Evolução do Desgaste de Flanco correlacionado com a Rugosidade média $R_a$ .	45

## LISTA DE TABELAS

<b>Tabela 1:</b> Parâmetros de corte em diferentes experimentos ( [4] modificado).....	6
<b>Tabela 2:</b> Condições de usinagem aplicadas nos ensaios de fresamento [10].....	11
<b>Tabela 3:</b> Causas e soluções para abrandar a avaria e desgaste da ferramenta ( [1], modificado).....	17
<b>Tabela 4:</b> Parâmetros de corte utilizados no fresamento do aço ABNT 4140( [11] modificado) .....	23
<b>Tabela 5:</b> Parâmetros de corte empregados nos ensaios( [19] modificado). .....	26
<b>Tabela 6:</b> Composição do aço 4340( [21] modificado). .....	28
<b>Tabela 7:</b> Composição química do aço SAE 4340 – dados do fabricante (em % de peso).....	33
<b>Tabela 8:</b> Condições de corte das amostras usinadas. ....	34
<b>Tabela 9:</b> Rugosidade teórica e rugosidades Ra medida experimentalmente após fresamento. ....	43

## LISTA DE ABREVIATURAS

AISI - Sistema americano para a classificação dos aços (American Iron and Steel Institute)

SAE – Society of Automotive Engineers

$v_c$  – velocidade de corte

$v_f$  – velocidade de avanço

$v_e$  – velocidade efetiva de corte

VB – desgaste de flanco

$VB_{MÁX}$  – desgaste de flanco máximo

$f_z$  – avanço por dente

$f$  – avanço

$a_p$  – profundidade de corte

$a_e$  – profundidade de penetração

$x_r$  – ângulo de posição

TTAT – Tratamento de Alívio de Tensões

$t_c$  – tempo de Corte

$L_f$  – Percurso de avanço

MQL (*Minimum Quantity Lubrication* ou Mínima Quantidade de Lubrificante)

Ra – Rugosidade superficial média

$\varepsilon$  – raio da ponta da ferramenta

# SUMÁRIO

Introdução .....	1
1.1. Motivação .....	1
1.2. Justificativa .....	1
1.3. Objetivos.....	2
1.4. Metodologia e Trabalho Realizado .....	2
1.5. Organização do Trabalho.....	2
Revisão Bibliográfica .....	3
2.1.Fresamento .....	3
2.1. Parâmetros de corte .....	5
2.2. Desgaste e avaria da ferramenta .....	7
2.2.1. Desgaste da ferramenta de corte no fresamento .....	18
2.3.Aço SAE 4340 .....	27
2.4.Rugosidade .....	31
Materiais e Métodos .....	33
3.1.Material.....	33
3.2. Fresamento das amostras .....	33
3.3. Análise do desgaste da ferramenta .....	35
3.4. Medidas de rugosidade .....	36
Resultados e discussão .....	37
4.1.Análise de imagem do desgaste das ferramentas de corte.....	37
4.2. Análise da evolução da rugosidade durante a usinagem .....	43
Conclusão .....	46
Sugestões para trabalhos futuros .....	47
Bibliografia.....	48

# Capítulo 1

## Introdução

Os processos de fabricação por usinagem são amplamente aplicados nas etapas finais de fabricação de diferentes componentes. Por esta razão, espera-se ao final, desses processos obterem o dimensionamento e qualidade superficial desejado no projeto. Entretanto, o desgaste das ferramentas de corte utilizadas durante as operações podem vir a prejudicar a precisão da usinagem, além de resultar em baixa qualidade superficial. Assim, esta pesquisa busca a melhor compreensão dos mecanismos de desgaste da ferramenta de metal duro no fresamento de topo do aço SAE 4340, em diferentes condições de usinagem.

### 1.1. Motivação

Independente da dureza e resistência mecânica dos materiais envolvidos nos processos de usinagem, é impossível evitar o desgaste progressivo da ferramenta de corte utilizada na operação. Dessa forma, o estudo do desgaste da ferramenta é de grande importância para a área de usinagem. Apesar dos custos com ferramental representarem uma pequena fração nos processos de fabricação, os desgastes e avarias podem resultar em grandes perdas de produtividade durante a parada para substituição, além de aumentar os custos de produção. Sob o ponto de vista de qualidade e acabamento superficial, a compreensão de como os parâmetros de corte influenciam nos mecanismos de desgaste da ferramenta de corte podem auxiliar na busca pela otimização dos parâmetros de processos.

### 1.2. Justificativa

Pesquisas vêm sendo conduzidas com o intuito de compreender e prever a vida das ferramentas de corte a fim de evitar perdas de produtividade e, sobretudo, permitir a correção e reavaliação estratégica dos parâmetros de usinagem de acordo com as características e necessidades do processo de fabricação. Contudo, diferentes materiais usinados promovem diferentes tipos de desgaste. Desse modo, existe uma grande necessidade de adquirir dados reais para melhor compreensão dos mecanismos de desgaste presente em determinadas condições de corte.

### **1.3. Objetivos**

Este trabalho tem como objetivo verificar os tipos de desgaste da ferramenta durante a usinagem do aço SAE 4340, amplamente utilizado na indústria. Foram estudados dois parâmetros de corte: velocidade de corte e profundidade de corte. Para avaliar o desgaste foram feitas análises por imagem através de estereoscopia sob diferentes tempos de usinagem, a saber: 10, 20, 30 e 40 minutos. Ressalta-se que as velocidades de corte ( $v_c$ ) adotadas nesta pesquisa encontram-se abaixo das recomendadas pelo fabricante, no intuito de verificar o comportamento da ferramenta utilizada. Em determinados tempos de usinagem, também foram adquiridos dados de rugosidade superficial das amostras usinadas com o intuito de verificar a influência do desgaste no acabamento superficial das amostras.

### **1.4. Metodologia e Trabalho Realizado**

O desenvolvimento do presente trabalho pautou-se na pesquisa bibliográfica dos tópicos mais relevantes ao tema, estudados em livros e artigos nacionais e internacionais de revistas especializadas e artigos de congressos, além de consultas a Internet. Após o estudo prévio da literatura formal e material acadêmico disponível traçou-se uma estratégia de preparação das amostras, com alternativas baseadas nas possíveis obtenções de qualidade e padrões esperados. A parte experimental foi realizada em laboratórios do CEFET/RJ e, após, foi realizado o tratamento dos dados para posterior discussão e conclusão.

### **1.5. Organização do Trabalho**

O trabalho está organizado em 5 capítulos, a saber: Capítulo 1 – Introdução, onde o tema deste trabalho é definido e exposto; Capítulo 2 – Revisão Bibliográfica; Capítulo 3 – Materiais e Métodos; Capítulo 4 – Resultados e Discussões, referente à pesquisa e definições iniciais do projeto final; Capítulo 5 – Conclusão. Ao final são apresentadas algumas Sugestões para trabalhos futuros, além das Referências Bibliográficas, de onde pode-se resgatar as referências apontadas no texto.

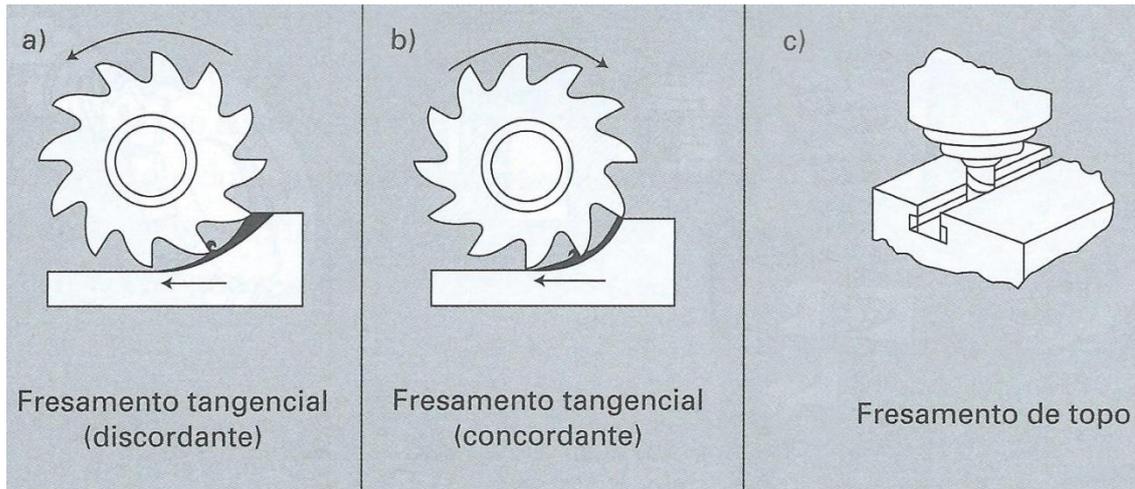
## Capítulo 2

### Revisão Bibliográfica

#### 2.1.Fresamento

Dentre os processos de fabricação, a usinagem destaca-se como o mais popular do mundo. A usinagem é responsável por empregar milhões de pessoas e, apesar de ser um processo relativamente simples, demanda estudos para se obter condições ideais de corte. O desafio é a obtenção de boas tolerâncias dimensionais, acabamento e redução de custo, pois devido às diversas possibilidades de combinações para a entrada do processo, são muitos os resultados possíveis. Diante disso, existem três maneiras de lidar com essa complexidade: através de experiências adquiridas por tentativa e erro, através da comparação com situações análogas e por intermédio de modelos teóricos. Nenhuma dessas maneiras, isoladamente, gera soluções satisfatórias. Por isso, para que encontre melhores condições de corte, recomenda-se a combinação de duas ou mais dessas abordagens [1].

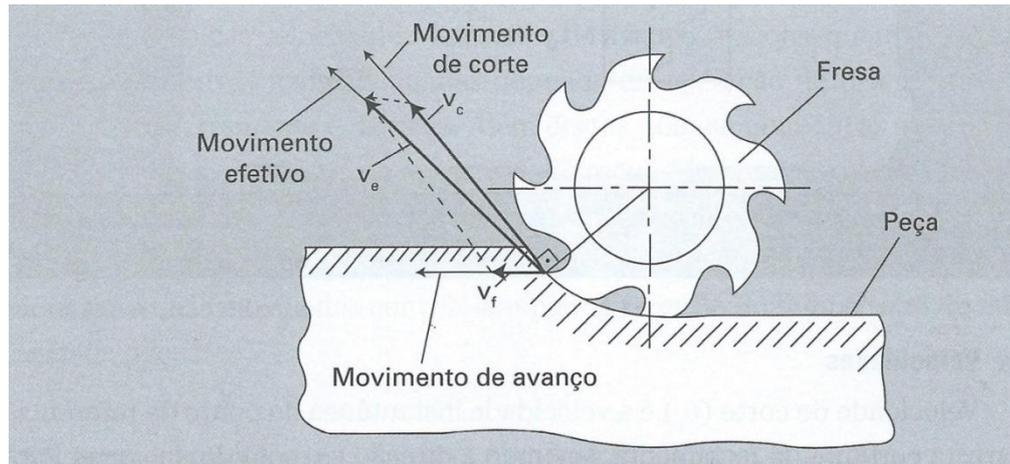
Processos de usinagem podem gerar peças com diferentes geometrias. No entanto, grande parte das superfícies não planas e não de revolução somente podem ser geradas através do fresamento, definido como uma operação de usinagem onde se retira material de uma peça, para que se obtenha forma e dimensão desejada, utilizando uma máquina operatriz denominada fresadora. A remoção do material é feita pela combinação de dois movimentos executados simultaneamente: a rotação da ferramenta de corte (fresa) e o movimento retilíneo da mesa, que realiza o avanço [2]. As principais operações de fresamento são representadas na Figura 1.



**Figura 1:** Principais modos de fresamento: a) Fresamento frontal; b) Fresamento tangencial discordante ([2] modificado).

O avanço pode levar a peça contra o movimento de giro dos dentes da fresa, denominando-se movimento discordante (Figura 1a). Por outro lado, quando o avanço se dá no mesmo sentido do dente da fresa, denomina-se movimento concordante, conforme é observado na Figura 1b. O fresamento de topo (Figura 1c) é destinado à obtenção de uma superfície lisa perpendicular ao eixo de rotação da ferramenta [3].

Segundo Machado *et al.*, 2015 [2], para se executar a usinagem dos metais, é necessário que se conheça e se defina as grandezas físicas do processo. Dentre essas características, os movimentos relativos são os que melhor descrevem os processos de usinagem. Os tipos de movimento podem ser subdivididos em duas categorias: os que causam diretamente a retirada do cavaco e os que não tomam parte diretamente nessa remoção. Os movimentos que causam diretamente a remoção do cavaco são: movimento de corte; movimento de avanço e movimento efetivo de corte, como apresentado na Figura 2. Os movimentos que não contribuem diretamente com a remoção do cavaco são: movimento de aproximação, movimento de ajuste, movimento de correção e movimento de recuo [2].



**Figura 2:** Direções dos movimentos de corte no fresamento tangencial discordante [2].

Segundo Diniz *et al.*, 2001 [1] o fresamento frontal ou de topo é utilizado para obter-se superfícies planas que se encontram posicionadas perpendicularmente ao eixo de rotação da fresa. Nessas operações, os dentes ativos da fresa estão na superfície frontal da ferramenta. A escolha entre o tipo de fresamento vai depender da relação entre profundidade e largura do rasgo, e da máquina disponível.

## 2.1. Parâmetros de corte

A variação dos parâmetros de corte tem grande importância no estudo do desgaste de ferramenta. Dentre esses parâmetros, a velocidade de corte ( $v_c$ ), definida como a velocidade instantânea medida a partir da aresta cortante da ferramenta, segundo a direção e sentido do corte é um dos principais parâmetros de corte. A Equação 2.1 descreve matematicamente a velocidade de corte [2].

$$v_c = \frac{\pi \cdot d \cdot n}{1000} [m/min] \quad (2.1)$$

Onde:

d= diâmetro da peça ou da ferramenta (milímetros)

n=número de rotações por minuto (rpm)

Velocidade de avanço ( $v_f$ ), descrita na Equação 2.2, é a velocidade instantânea medida a partir do ponto de referência a da aresta cortante, segundo a direção e sentido do avanço.

$$v_f = f \cdot n \text{ [mm/min]} \quad (2.2)$$

Onde:

f=avanço (milímetro/revolução)

n=número de rotações por minuto (rpm)

Velocidade efetiva de corte ( $v_e$ ) é a soma vetorial da velocidade de corte ( $v_c$ ) e velocidade de avanço ( $v_f$ ), e pode ser representada como a Equação 2.3.

$$\vec{v}_e = \vec{v}_c + \vec{v}_f \text{ [m/min]} \quad (2.3)$$

Das *et al.*, 2012 [4] realizaram experimentos com aço AISI D2, aço ferramenta com alto teor de carbono e cromo, com diferentes profundidades de corte ( $a_p$ ), avanços (f) e velocidades de corte ( $v_c$ ), como mostra a Tabela 1. Como resultado de seus experimentos, comparou-se a influência dos parâmetros de corte nos desgastes das ferramentas, sendo estimado um valor de 60,85% como contribuição da profundidade de corte, 33,24% como influência da velocidade de corte e apenas 5,70% a contribuição da velocidade de avanço. O resultado é consequência da análise estatística de variância (ANOVA), em concomitância com o software utilizado MINILAB15. Entretanto, o resultado encontrado por Das *et al.*, 2012 [4] não é o mesmo de outros autores, como Machado *et al.*, 2001 [2], que assumem a velocidade de corte ( $v_c$ ) como o parâmetro mais influente do desgaste da ferramenta de corte.

**Tabela 1:** Parâmetros de corte em diferentes experimentos ( [4] modificado).

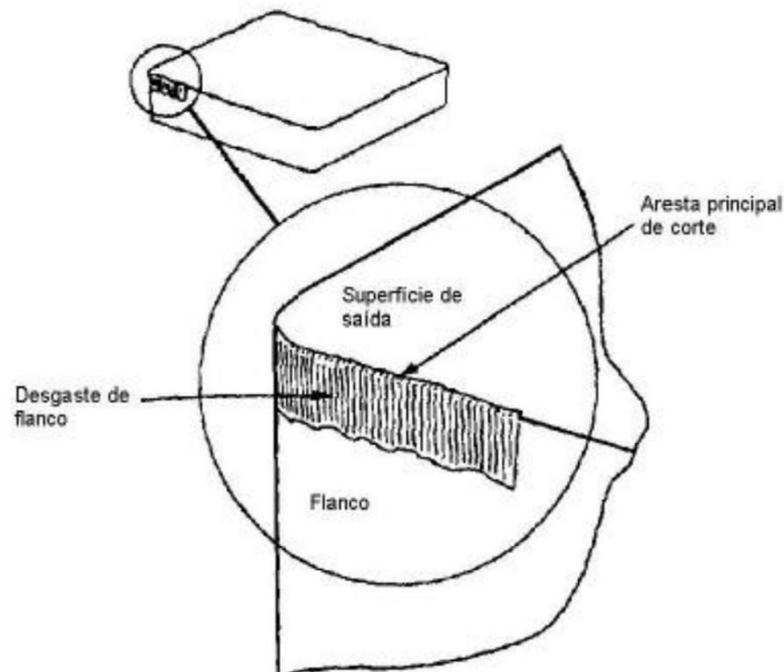
Parâmetro	Experimento		
	1	2	3
Profundidade de corte – $a_p$ (mm)	0,5	0,75	1,0
Avanço – f (mm/rev)	0,15	0,20	0,25
Velocidade de corte –v $v_c$ (m/min)	150	200	250

## 2.2. Desgaste e avaria da ferramenta

Segundo Coppini *et al.*, 2001 [1] o desgaste é o resultado direto da ação do corte, medido por perda contínua e microscópica de partículas da ferramenta e podem ser classificados em várias categorias, sendo as principais:

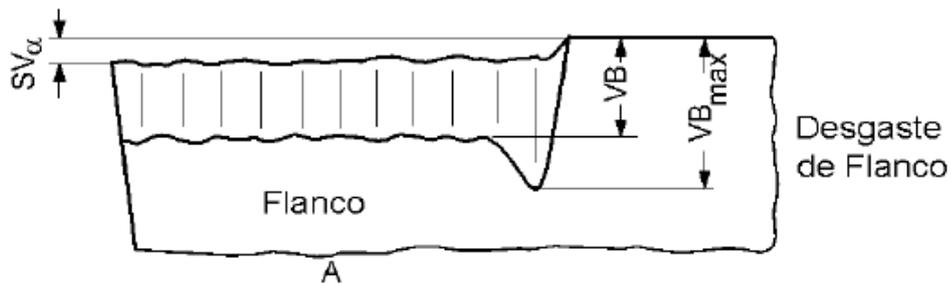
- Desgaste de flanco (ou frontal)
- Desgaste de entalhe
- Desgaste de cratera
- Deformação plástica
- Lascamento
- Trincas de origem mecânica
- Trinca de origem térmica
- Quebra

O desgaste de flanco ocorre na superfície de folga da ferramenta, resultante do contato entre a ferramenta e a peça. Este tipo de desgaste é o mais regular e mais previsível. Por conta disso, procura-se estabelecer condições de corte em correlação a esse tipo de desgaste. As medidas da largura média de desgaste VB é uma forma de avaliar o fim da vida da ferramenta. Geralmente, o desgaste de flanco é incentivado por elevadas velocidades de corte [5]. A Figura 3 apresenta um exemplo de pastilha com desgaste frontal.



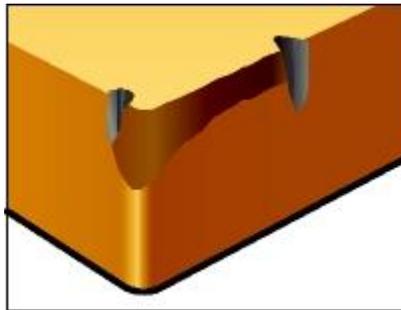
**Figura 3:** Desgaste frontal ou de flanco [6].

A forma mais usual de determinar o fim da vida da ferramenta é considerada através da norma ISO 3685/1993, que indica limites das medições dos desgastes de flanco médios e máximos, representados na Figura 4. Segundo essa norma, para as ferramentas de metal duro devem ser reafiadas ou substituídas ao atingir  $VB=0,3\text{mm}$ , ou desgaste de flanco máximo  $VB_{MÁX}=0,6\text{mm}$  [6].



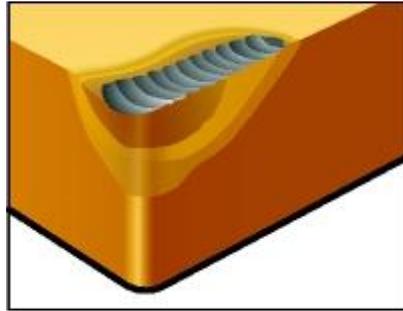
**Figura 4:** Representação do desgaste de Flanco ( [7] modificado).

No desgaste de entalhe, como representado na Figura 5, ocorre nos dois extremos do contato entre a superfície de folga e a peça. O desgaste de entalhe muda a geometria da ponta da ferramenta, gerando uma diferença no acabamento da peça usinada. Geralmente, ocorre devido ao acréscimo da temperatura e da velocidade de corte [1].



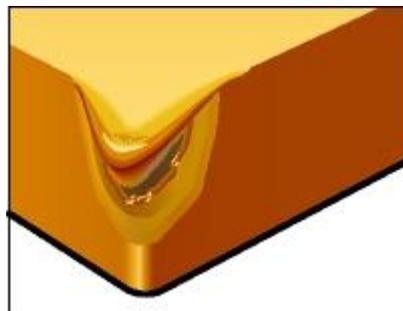
**Figura 5:** Desgaste de entalhe [8].

A Figura 6 representa um desgaste de cratera, que ocorre na superfície de saída da ferramenta, como resultado do atrito entre a ferramenta e o cavaco. Esse desgaste pode ser evitado quando se utiliza ferramentas de metal duro ou ferramentas cerâmicas. O fenômeno também é menos comum quando o material da peça é frágil, e seu cavaco é mais curto. O desenvolvimento do desgaste de cratera pode resultar na quebra da ferramenta, quando o desgaste se encontra com o desgaste frontal [1].



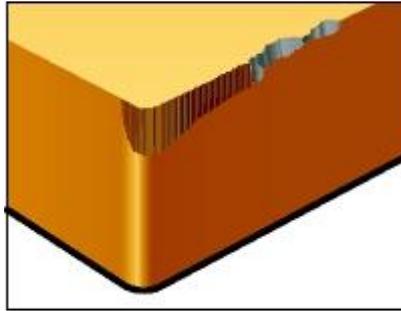
**Figura 6:** Desgaste de cratera [8].

A deformação plástica é a mudança da geometria da aresta de corte através do deslocamento de material. É decorrente do cisalhamento aliado a altas temperaturas durante a usinagem. A deformação plástica pode ser evitada quando se emprega maiores proporções de elementos de liga, podendo, no entanto, comprometer a tenacidade da ferramenta. Isso ocorre pelo aumento na fragilidade na aresta de corte. Geralmente, as deformações plásticas ocorrem em ferramentas mais tenazes, como o aço rápido. A ocorrência nas cerâmicas é difícil, pois para esse grupo de materiais acaba resultando na quebra ou fratura. A deformação plástica é representada na Figura 7 [9].



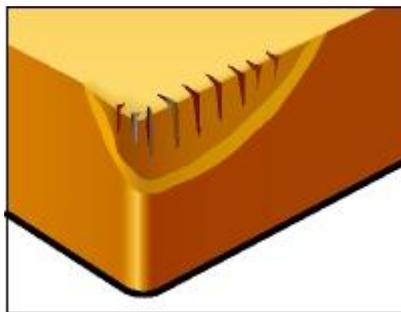
**Figura 7:** Deformação plástica [8].

O lascamento, representado na Figura 8, é um tipo de avaria da ferramenta, onde partículas grandes são removidas subitamente durante a operação de usinagem. O fenômeno ocorre quando se utiliza ferramenta de material frágil e/ou quando a aresta de corte é pouco reforçada. Pode resultar na quebra da ferramenta, e na deterioração da qualidade da superfície da peça usinada [1].



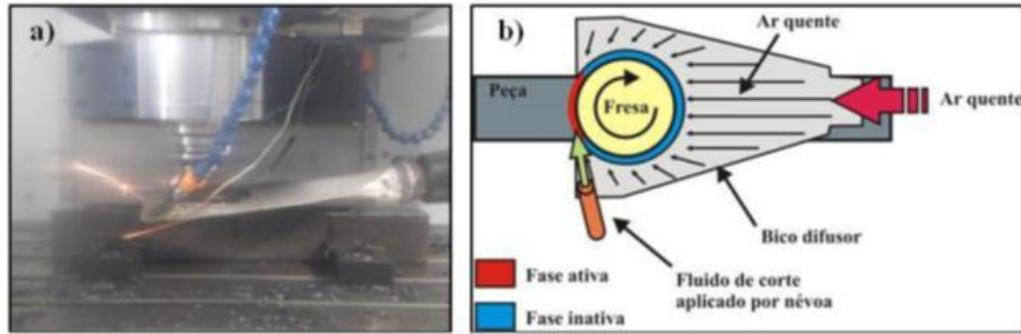
**Figura 8:** Lascamento [8].

As trincas podem ser resultado de solicitações térmicas, como mostra e Figura 9, provocadas pela brusca variação de temperatura, ou em decorrência de elevados esforços mecânicos (trincas paralelas). No fresamento, a aresta de corte tem um período de corte seguido por um período inativo em cada revolução. Esse fato faz com que a temperatura varie em cada volta da ferramenta. As trincas são caracterizadas por serem perpendiculares à aresta de corte [1].



**Figura 9:** Trinca de origem térmica [8].

Segundo Lima & Melo, 2013 [10], quanto maior a diferença de temperatura entre o período ativo e inativo da ferramenta, mais acelerado o processo de fadiga. Conseqüentemente, maiores são as chances do aparecimento da trinca de origem térmica. Os autores realizaram experimentos com sopro de ar quente sobre a fase inativa e obtiveram diminuição do desgaste da ferramenta no fresamento. A Figura 10 apresenta um esquema do experimento utilizado nesse trabalho.



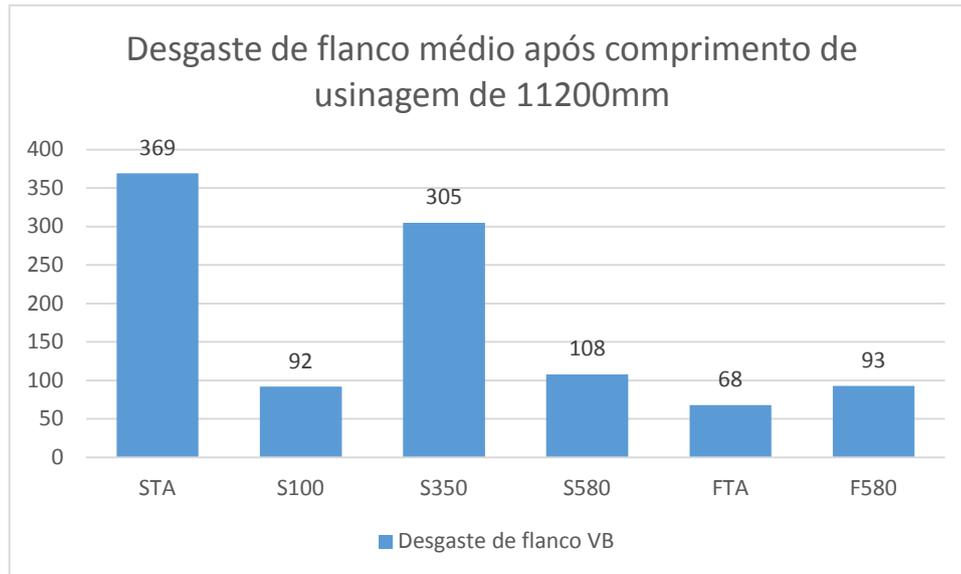
**Figura 10:** (a) Posicionamento do bico do sistema de lubri-refrigeração durante os testes de fresamento; (b) Vista superior mostrando o posicionamento do bico do sistema de lubri-refrigeração em relação ao conjunto fresa/bico difusor/peça [10].

Lima & Melo, 2013 [10] realizaram experimentos em seis diferentes condições de usinagem, no intuito de avaliar a formação das trincas de origem térmica. Alguns parâmetros de corte foram mantidos constantes, e definidos de acordo com a faixa recomendada pelo fabricante, como  $n = 995$  rpm,  $v_c = 250$  m/min,  $a_p = 1,5$  mm e  $f_z = 0,15$  mm/dente. Além disso, os percursos de avanço foram definidos em  $L_f = 1600, 4800, 8000$  e  $11200$  mm. A Tabela 2 apresenta a nomenclatura utilizada e as condições de usinagem durante os ensaios.

**Tabela 2:** Condições de usinagem aplicadas nos ensaios de fresamento [10].

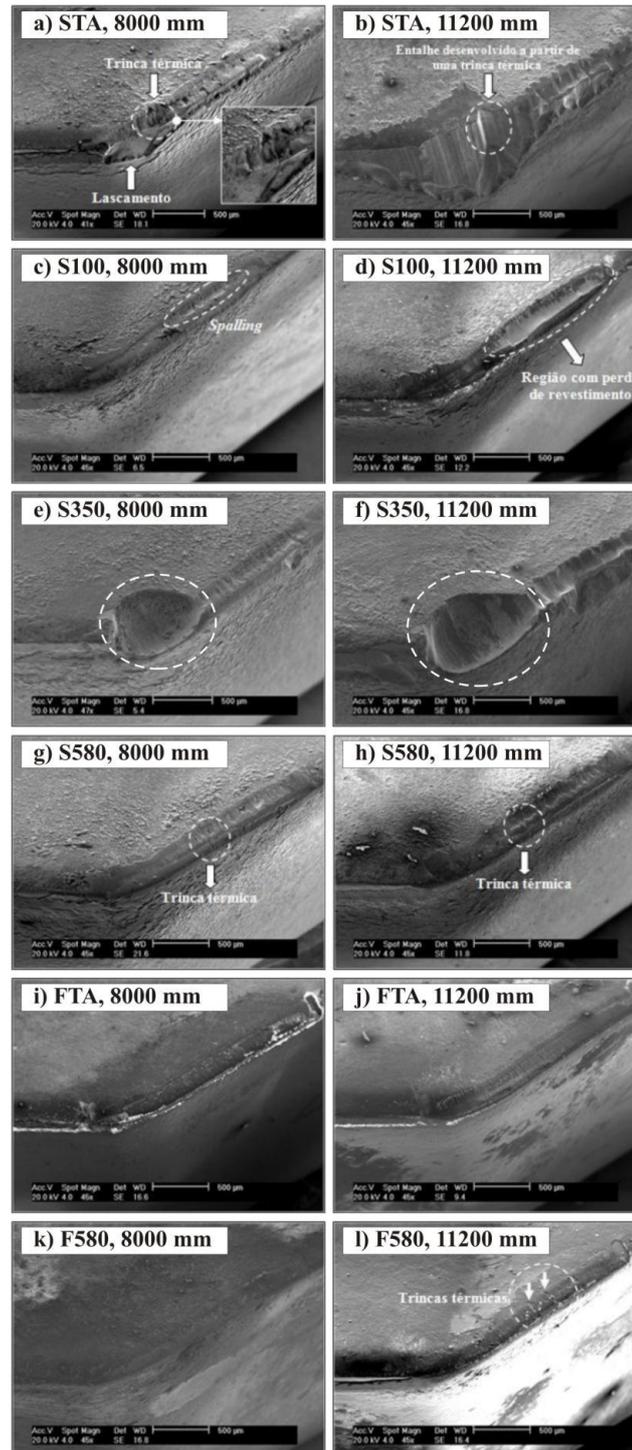
		Condição de usinagem						
		STA	S100	S350	S580	FTA	F580	
Teste	1	$L_f$ (mm)	01600	01600	01600	01600	-	-
	2		04800	04800	04800	04800	-	-
	3		08000	08000	08000	08000	08000	08000
	4		11200	11200	11200	11200	11200	11200
Descrição das condições de corte	STA	Seco/temperatura ambiente						
	S100	Seco/100 °C (temperatura ajustada no soprador)						
	S350	Seco/350 °C (temperatura ajustada no soprador)						
	S580	Seco/580 °C (temperatura ajustada no soprador)						
	FTA	Fluido aplicado por névoa/temperatura ambiente						
	F580	Fluido aplicado por névoa /580 °C (temperatura ajustada no soprador)						

Utilizando um microscópio eletrônico de varredura (MEV), os autores realizaram a contagem de trincas térmicas, e mediram os desgastes de flanco médio dos insertos ensaiados. A Figura 11 compara os resultados de desgaste de flanco obtidos nos ensaios.



**Figura 11:** Desgaste de flanco médio avaliado nos insertos ensaiado após o percurso de avanço  $L_f = 11200$  mm( [10], modificado).

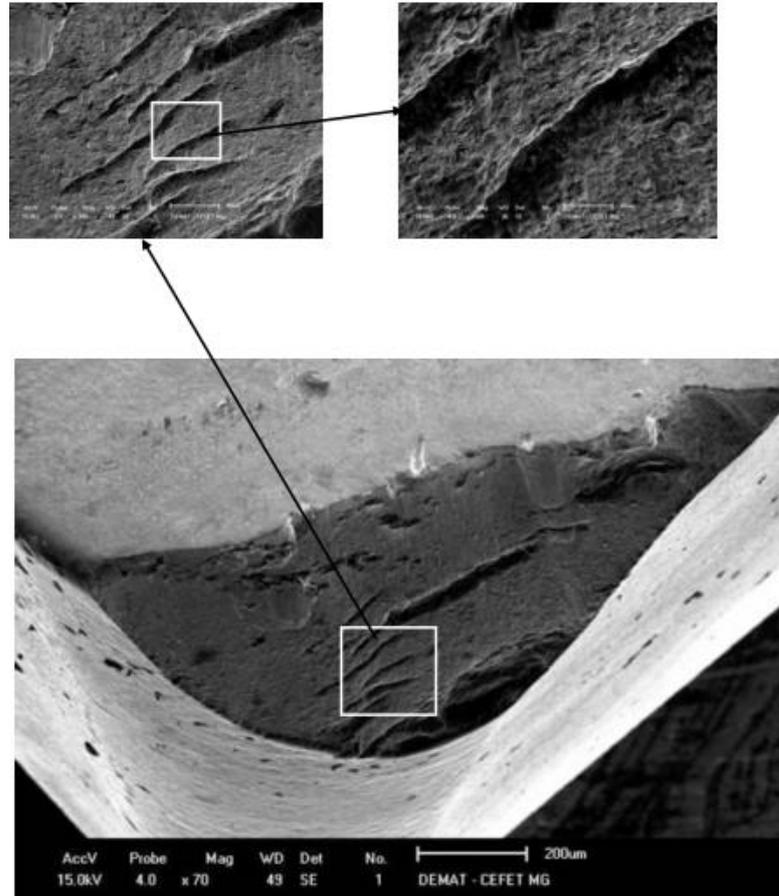
Na Figura 12, são apresentadas as condições das seis arestas de corte ao final da usinagem. Com base em seus resultados, os autores apontam que a aplicação de ar quente na fase inativa da fresa foi efetiva na redução do número de trincas de origem térmica, e conseqüentemente, houve uma redução do desgaste da ferramenta. Além disso, verificou-se o impacto das trincas térmicas no processo de deterioração dos insertos ensaiados.



**Figura 12:** Aresta de corte dos inserts ao final da usinagem para as seis condições de refrigeração ([6] modificado).

As trincas de origem mecânica, (Figura 13) são paralelas à aresta de corte e alguns fatores podem induzir esse tipo de trinca, como o corte interrompido, acesso irregular do fluido de corte e variação da espessura do corte, típica do fresamento. O desenvolvimento das

trincas mecânicas pode resultar na quebra da ferramenta. Para se evitar a formação das trincas de origem de mecânica, deve-se optar por ferramentas mais tenazes e diminuir o avanço [1].



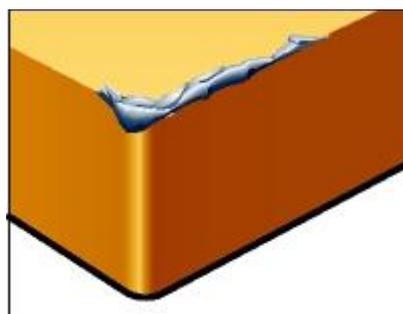
**Figura 13:** Trinca de origem mecânica [11].

A quebra da ferramenta pode ser resultante dos desgastes e avarias mencionados anteriormente. No entanto, a quebra também pode ocorrer inesperadamente devido à dureza excessiva da ferramenta, carga em excesso, raio da ponta, ângulo da ponta ou ângulo de cunha pequena. Pode ser resultante também do corte interrompido, ou devido a entupimento dos canais de expulsão do cavaco ou dos bolsões de expulsão do cavaco. A quebra da ferramenta (Figura 14) pode ocasionar danos ao porta-ferramenta e à própria peça [1].



**Figura 14:** Quebra da ferramenta [12]

A aresta postiça de corte (APC) é um dos mecanismos causadores do desgaste da ferramenta, sendo essa um acúmulo de cavaco sobre a superfície de saída da ferramenta, que permanece aderida à aresta de corte, modificando a força de corte e o acabamento da peça. Além disso, tem influência significativa sobre a vida das ferramentas de corte. Em baixas velocidades de corte, a pressão gerada no corte na zona de aderência acaba por soldar a parte inferior do cavaco à ferramenta. Posteriormente, essa camada de cavaco deforma-se e encrua-se, aumentando assim a resistência mecânica e agindo como aresta de corte. A aresta de corte tende a crescer até que romper-se, gerando assim uma perturbação dinâmica. Além disso, gera um desgaste frontal excessivo, mesmo em baixas velocidades de corte. O acabamento superficial e as tolerâncias dimensionais (especificadas e que deveriam ser alcançadas) da peça usinada também são prejudicados [13]. Um esquema de aresta postiça é representado na Figura 15.

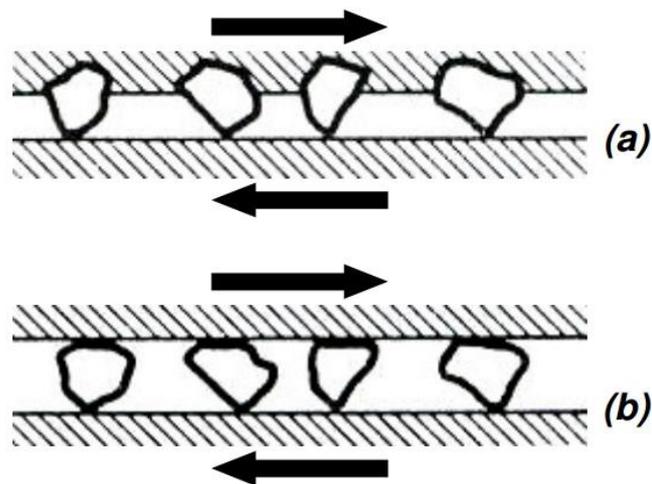


**Figura 15:** Aresta postiça [8].

Diferentes fatores podem influenciar na vida da ferramenta e no seu desgaste. Geralmente, a APC pode ser evitada quando se aumenta a velocidade de corte, possibilitando melhores resultados de rugosidade na peça usinada. Na presença da APC, a marca do desgaste se apresenta inclinada em relação à direção de corte. Em velocidades maiores, e sem a

presença da aresta postiça, a marca de desgaste é aproximadamente paralela à direção de corte [1].

A abrasão mecânica é uma fonte de desgaste comum, resultante da perda progressiva de massa por consequência do movimento relativo entre a superfície e o contato com outro material ou materiais. O desgaste abrasivo ocorre pelo riscamento entre partículas abrasivas incrustadas em uma das superfícies. O desgaste abrasivo pode ainda ocorrer por rolamento, quando as partículas desprendem-se e tornam-se livres, podendo deslizar entre as duas superfícies [14]. O desgaste abrasivo pode resultar no desgaste frontal e desgaste de cratera. As ferramentas com maiores resistências a quente possuem maior resistência ao desgaste abrasivo. Uma forma de caracterização do desgaste abrasivo se dá quando a região desgastada apresenta sulcos abrasivos paralelos à direção do fluxo do material. A figura 16 representa o desgaste abrasivo [1].



**Figura 16:** a) desgaste abrasivo por riscamento; b) desgaste abrasivo por rolamento( [14] modificado).

A aderência, comumente denominada “*attrition*”, ocorre a baixas velocidades de corte ou quando a velocidade se dá de forma irregular. Quando as superfícies da ferramenta e da peça são postas em contato, forma-se um extrato metálico resultando na aderência entre as superfícies. As partículas removidas durante a usinagem são aderidas ao cavaco ou a peça, aumentando o atrito nas interfaces e provocando um maior desgaste da ferramenta por abrasão. O desgaste por aderência pode ser evitado quando se utiliza maiores velocidades de corte, e materiais com melhores acabamentos superficiais. Além disso, podem-se obter melhores resultados quando se utiliza fluidos de corte com boas propriedades lubrificantes [1].

O desgaste por aderência é caracterizado pela aparência áspera da região desgastada. Esse mecanismo de desgaste da ferramenta é realizado quando forma uma união entre o cavaco e a superfície da ferramenta, e geralmente, ocorre quando existe uma deficiência na lubrificação. Outro mecanismo causador do desgaste da ferramenta é a difusão, que é a transferência de átomos entre o metal da ferramenta e da peça, resultante de altas temperaturas na zona de corte, do tempo de contato e de propriedades físico-químicas, podendo resultar no desgaste de cratera. O aspecto resultante do desgaste por difusão é uma superfície lisa. A oxidação, por sua vez, é um mecanismo causador do desgaste que é antecipado na presença de altas temperaturas, ar e água. Quando se utiliza fluido de corte, deve-se atentar às condições de armazenamento na máquina. A armazenagem inadequada do fluido de corte pode resultar em contaminação, causando a corrosão e oxidação da ferramenta. [15]. A Tabela 3 apresenta os principais mecanismos de desgaste e avaria das ferramentas de corte, e as ações para se abrandar esses desgastes ou avarias.

**Tabela 3:** Causas e soluções para abrandar a avaria e desgaste da ferramenta ( [1], modificado).

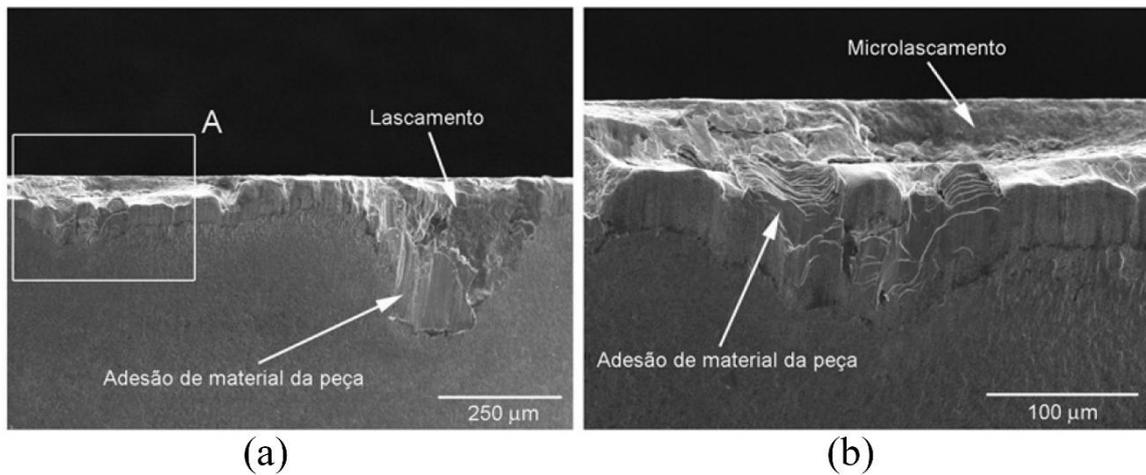
<b>Tipo de desgaste e/ou avaria</b>	<b>Possíveis causas</b>	<b>Ações para minimização</b>
<b>Desgaste de flanco</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Velocidade de corte muito alta ou muito baixa (se a causa for a presença da APC)</li> <li>• Resistência ao desgaste insuficiente da ferramenta</li> <li>• Abrasão</li> <li>• Aresta postiça de corte</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Redução da velocidade de corte</li> <li>• Seleção de classe da ferramenta mais resistente ao desgaste</li> <li>• Aumento da velocidade de corte se o desgaste for causado pela APC</li> </ul>
<b>Desgaste de entalhe</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Oxidação</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Seleção de fluido de corte com agentes anti-oxidantes</li> <li>• Redução da velocidade de corte</li> </ul>
<b>Desgaste de cratera</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Difusão</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Ferramenta com cobertura de óxido de alumínio</li> </ul>
<b>Deformação plástica</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Altas temperaturas combinadas com altas pressões na região de corte</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Seleção de classe de ferramenta com maior dureza a quente</li> <li>• Redução da velocidade de corte</li> </ul>
<b>Trincas de origem mecânica</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Variação excessiva de esforço na aresta de corte</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Seleção de uma classe de ferramenta mais tenaz</li> <li>• Redução do avanço</li> <li>• Suavização do primeiro contato da ferramenta com a peça</li> <li>• Aumento da estabilidade</li> </ul>
<b>Trincas de origem térmica</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Excessiva variação de temperatura</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Seleção de classe de ferramenta mais tenaz</li> <li>• Aplicação de fluido de corte em abundância ou não-aplicação</li> </ul>
<b>Lascamento</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Classe de ferramenta muito frágil</li> <li>• Geometria da ferramenta muito fraca</li> <li>• Choque da ferramenta com a peça</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Seleção de classe de ferramenta mais tenaz</li> <li>• Aumento do ângulo de ponta, raio da ponta e/ou do ângulo de cunha (chanframento de aresta)</li> <li>• Suavização do primeiro contato da ferramenta com a peça</li> </ul>

Diversos fatores influenciam no desgaste e vida da ferramenta. Machado *et al.*, 2015 [2] buscaram os parâmetros de corte que mais influenciam na curva de desgaste das ferramentas utilizadas em seus ensaios. Para a usinagem a seco, a velocidade de corte foi o principal parâmetro responsável pelo desgaste, pois quanto maior a velocidade, mais calor é gerado no processo. O segundo fator que mais influenciou foi o avanço, pois também quanto maior o avanço, mais calor foi gerado no processo. No entanto, compensa-se parte desse calor pelo aumento da área da ferramenta que recebe esse calor. O terceiro parâmetro, que possui impacto significativo no desgaste das ferramentas foi a profundidade de corte sendo, entretanto este o que menos influenciou no desgaste. Segundo os autores, durante o incremento na profundidade de corte, não se altera a energia de corte por unidade de área, nem a velocidade de retirada do cavaco. Neste caso, a diferença está somente no maior volume de cavaco gerado por meio de uso de maior porção da aresta de corte.

### **2.2.1. Desgaste da ferramenta de corte no fresamento**

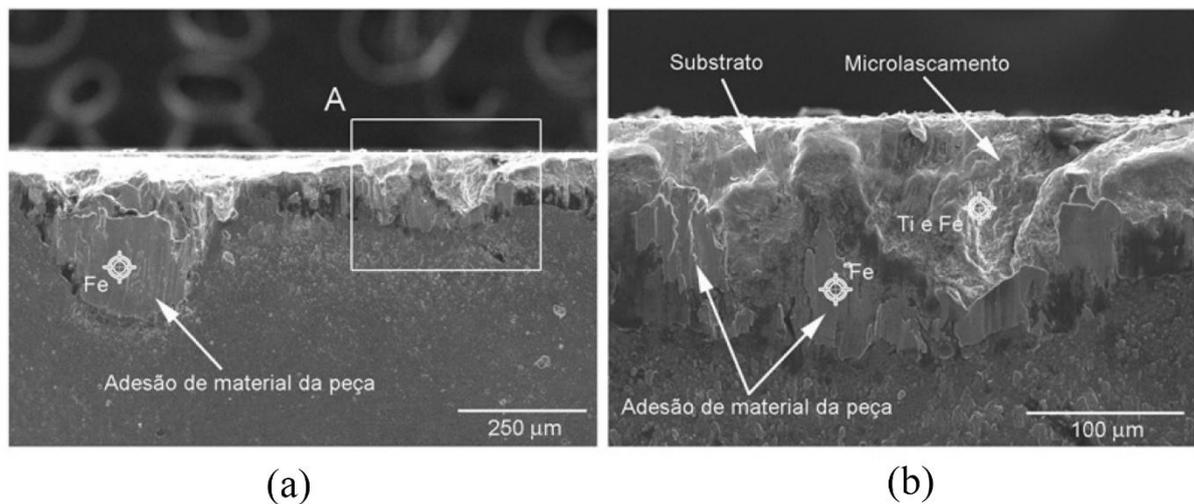
Durante o fresamento, algumas características podem acelerar o desgaste ou avaria da ferramenta. A variação da temperatura na aresta de corte, que aquece quando está em contato com a peça, e resfria quando está em contato com o ar, pode resultar em tensões que podem causar trincas térmicas. A diferença de temperatura é ainda maior quando se utiliza fluido refrigerante. A variação térmica cíclica ocorre várias vezes por segundo, por isso, quando se utiliza ferramenta de metal duro nas operações de fresamento, a vida da ferramenta é geralmente maior no corte a seco, do que quando se utiliza fluido de corte em jorro. Com relação às forças de corte, no momento em que a aresta de corte entra em contato com a peça a ser usinada, há um impacto. A partir desse momento, as forças de corte aumentam rapidamente e depois, variam conforme a direção e espessura do cavaco. Essa variação dos esforços mecânicos pode causar trinca por fadiga [1].

Oliveira, 2007 [16] realizou estudos de desgaste da ferramenta no fresamento de altas velocidades no intuito de comparar a vida das ferramentas de metal duro com e sem cobertura. Os mecanismos de desgastes encontrados na ferramenta recobertas por TiN/TiCN foram microlascamentos e adesão provenientes da peça na aresta de corte. Esses mecanismos foram avaliados pelo autor através da Figura 17.



**Figura 17:** (a) Superfície de folga da ferramenta de metal duro com cobertura (b) Detalhamento da região A [16].

No fresamento em altas velocidades com ferramenta de Cermet (material compósito formado por materiais cerâmicos e metais) sem cobertura, o lascamento determinou o fim da vida da ferramenta. Segundo Oliveira, 2007 [16] a vida da ferramenta de metal duro em comparação a de Cermet sem cobertura é mais que o dobro. Os principais mecanismos de desgaste da ferramenta com cobertura de Cermet foram avaliados através da Figura 18.

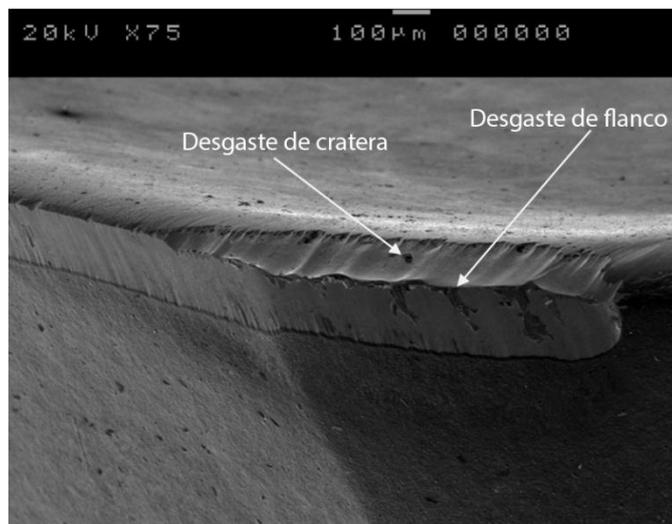


**Figura 18:** (a) Superfície de folga da ferramenta de metal duro sem cobertura (b) Detalhamento da região A [16].

Os autores concluíram que o desgaste e avaria da ferramenta são menores quando se utiliza a cobertura de TiN/TiCN, em comparação com as ferramentas de metal duro sem cobertura. Em suas análises, as principais características de desgaste e/ou avarias nas pastilhas

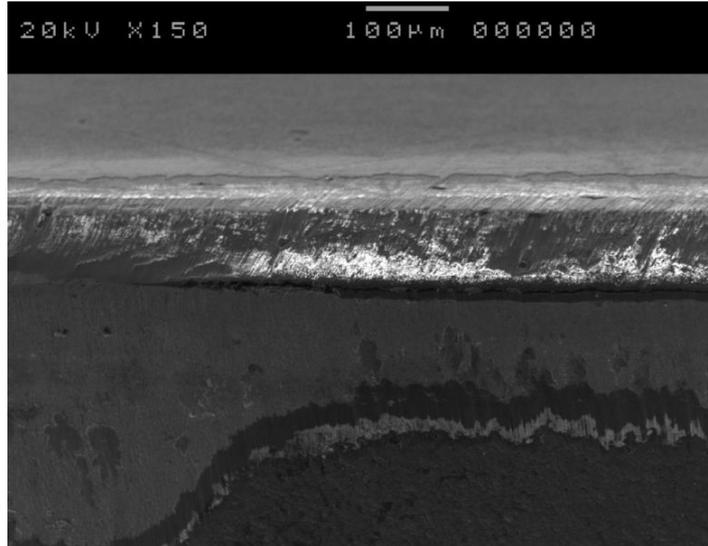
intercambiáveis é a presença de abrasão e difusão, no início da vida da ferramenta, e lascamentos e de adesão de material na peça ao final da vida da ferramenta.

Câmara, 2008 [17] avaliou a influência do ângulo de posição no desgaste da ferramenta de corte no fresamento frontal do níquel puro. Os ângulos de posição avaliados foram  $\alpha_r = 90^\circ$ ,  $\alpha_r = 45^\circ$  e  $\alpha_r = 12^\circ$ . Entre esses ângulos, obteve melhores resultados quanto à vida da ferramenta o valor de  $\alpha_r = 45^\circ$ . O desgaste de flanco e de cratera quando usinando com  $\alpha_r = 45^\circ$ ,  $a_p = 0,5$  mm,  $V_c = 70$  m/min e tempo de usinagem de 30 minutos, é representado na Figura 19.



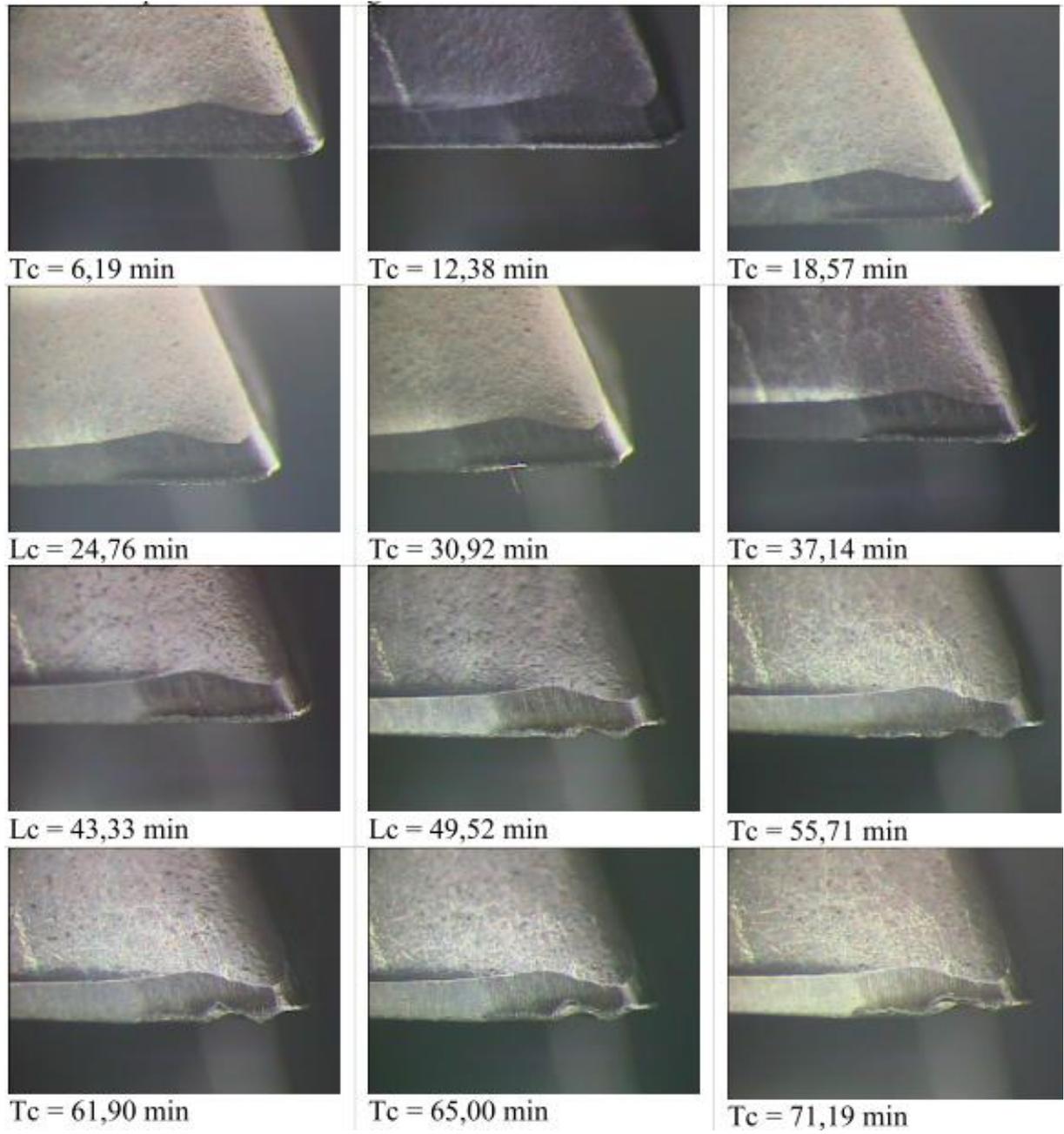
**Figura 19:** Desgaste de cratera e de flanco na aresta principal para  $\alpha_r = 45^\circ$ ,  $a_p = 0,5$  mm e  $v_c = 70$  m/min( [17] modificado)

Na condição de usinagem  $\alpha_r = 12^\circ$ ,  $a_p = 0,5$  mm,  $V_c = 70$  m/min e tempo de 10 minutos, Câmara 2008 [17] obteve desgaste de flanco com difusão e aderência de níquel, conforme apresenta a Figura 20. A aderência, nesse caso, ocorreu devido à afinidade química entre a ferramenta de corte e a peça usinada. A ferramenta de corte é constituída à base de WC-Co. O níquel usinado, e o cobalto (constituente da ferramenta) são adjacentes em número atômico, e possuem similaridades em suas propriedades.



**Figura 20:** Desgaste de flanco com difusão e aderência de níquel [17].

Hassui & Rodrigues, 2007 [18] investigaram a taxa de evolução dos desgastes da ferramenta de metal duro revestidas com AlTiN no processo de fresamento da supeliga Inconel 625. A pesquisa revela o início caracterizado pelo desgaste de flanco, seguido de desgaste de entalhe. A Figura 21 apresenta a evolução do desgaste, de acordo com o tempo de usinagem.



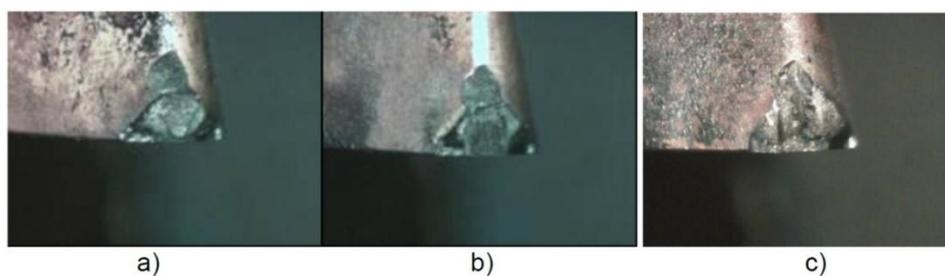
**Figura 21:** Progressão do desgastede flanco e entalhe [18].

Ferreira, 2011 [11] avaliou a influência da refrigeração no desgaste da ferramenta de corte. O material utilizado para usinagem o aço ABNT 4140 temperado e revenido, com fluido de corte emulsionável em água. O autor fresou suas amostras em máquina CNC até o tempo de usinagem  $t_c=50$  minutos, com aplicação do fluido a uma vazão de 15 l/min. Os parâmetros de corte utilizados são representados na Tabela 4.

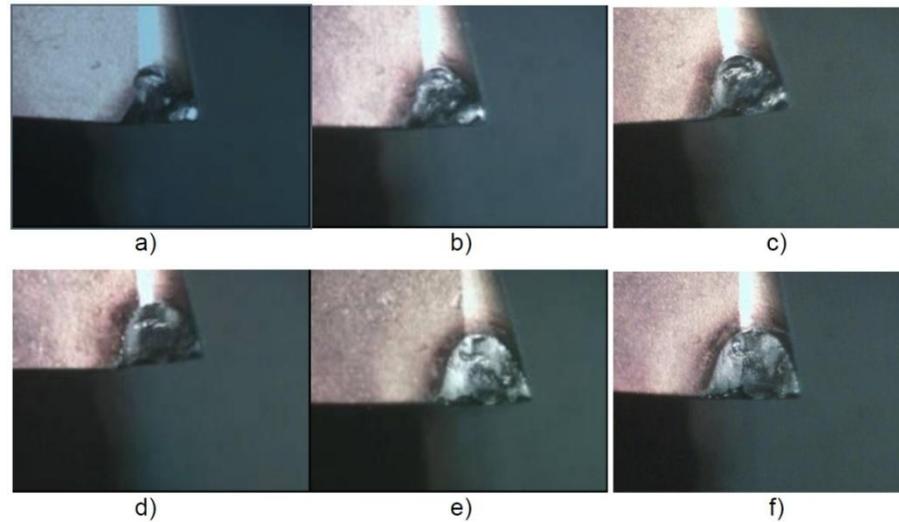
**Tabela 4:** Parâmetros de corte utilizados no fresamento do aço ABNT 4140( [11] modificado)

Parâmetros de corte	
$V_c$ (m/min)	120
$a_p$ (mm)	1
$f_z$ (mm/dente)	0,05
	0,10
	0,15

As fresas utilizadas nos ensaios continham três pastilhas de metal duro WC-Co P-35, revestidas com TiN, caracterizadas por elevada dureza e baixa tenacidade. A Figura 22 apresenta a evolução do desgaste da ferramenta quando o fresamento ocorre sem a presença do fluido lubrificante. Permanecendo com os mesmos parâmetros de corte, mas incluindo o fluido refrigerante, a evolução do desgaste da ferramenta ocorreu como representado na sequência de (a) a (f), referentes à figura 23.

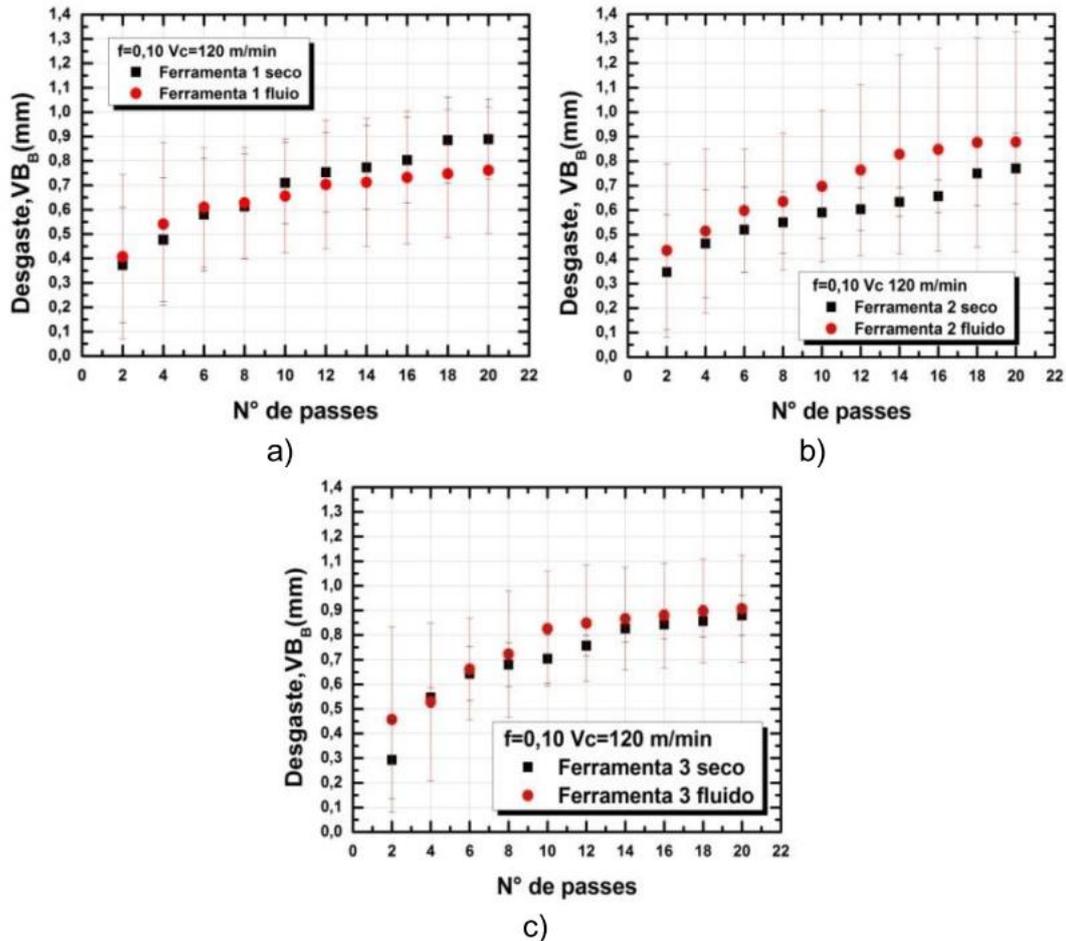


**Figura 22:** Evolução do desgaste na ferramenta no ensaio sem refrigeração  $v_c= 120$  m/min,  $f_z= 0,10$  mm/dente, (a) 2° passe, (b) 4° passe e (c) 12° passe [11].



**Figura 23:** Evolução do desgaste na ferramenta no ensaio  $v_c = 120\text{m/min}$ .  $f = 0,05$  com refrigeração, (a) 2° passe, (b) 4° passe, (c) 10° passe, (d) 14° passe, (e) 18° passe, (f) 20° passe. (15X) [11].

Segundo Ferreira, 2011 [11] a influência da refrigeração nem sempre é de grande relevância para a vida da ferramenta. Além disso, ainda deve ser considerado o descarte do fluido e o custo para mantê-lo dentro das suas especificações. Muitas vezes, o custo pode inviabilizar a refrigeração. A Figura 24 representa o comparativo do desgaste das três pastilhas, na condição de corte de  $v_c = 120\text{m/min}$  e  $f_z = 0,10\text{mm/dente}$  com e sem o fluido refrigerante. Segundo o autor, a influência do fluido de corte está relacionada ao tipo de ferramenta de corte.



**Figura 24:** Curvas de evolução do desgaste no ensaio com  $V_c=120$  m/min,  $f_z=0,10$  mm/dente (a) ferramenta 1, (b) ferramenta 2 e (c) ferramenta 3 [11].

Em um trabalho realizado por Rohloff *et al.*, 2011 [19] destacou-se a importância da seleção do revestimento da ferramenta de corte e sua correlação com o desgaste e avaria da ferramenta. Os autores investigam o desgaste da ferramenta de corte para a usinagem de um aço inoxidável. Utilizaram-se os mesmos parâmetros de corte (Tabela 6), sem fluido para as três ferramentas, sendo o revestimento diferente para cada uma das ferramentas. A ferramenta A era composta de uma primeira camada de CrN, uma camada intermediária de AlTiCrN e, uma camada externa aplicada em forma de gradiente de ligas de AlCrN com  $Si_3N_4$ , sendo a ferramenta de alta tenacidade e refratariedade. A ferramenta B, de alta resistência ao riscamento, apresentava uma combinação de AlTiN e  $Si_3N_4$ . A ferramenta C, com alta dureza a quente, alta estabilidade química, baixa condutividade térmica e elevada proteção ao desgaste, possuía revestimento especial, com tamanho de grão controlado, composto por uma combinação de AlTiSiN. Os resultados mostraram que a ferramenta C obteve melhor

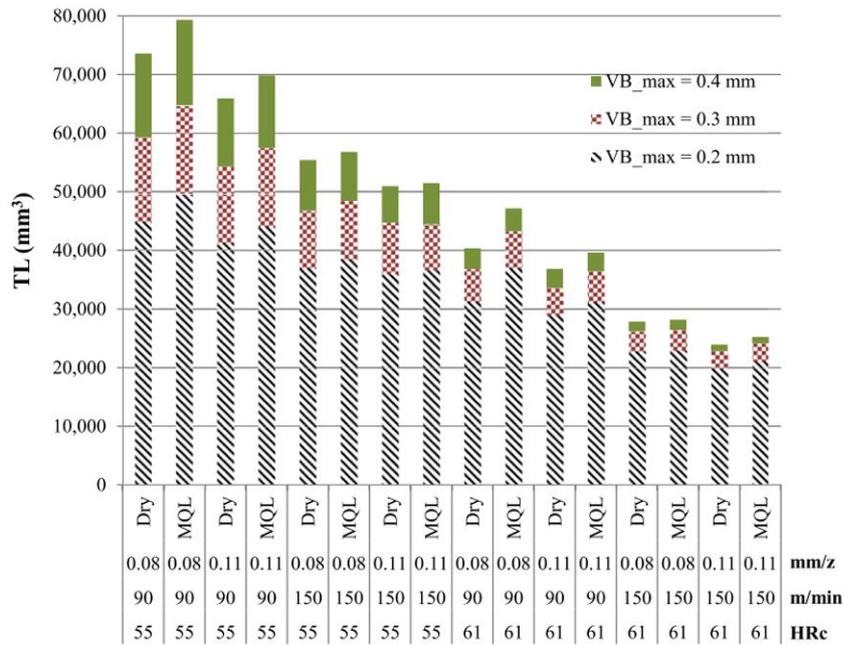
desempenho, apresentando menos desgaste de flanco em suas arestas de corte em comparação às ferramentas A e B.

**Tabela 5:** Parâmetros de corte empregados nos ensaios( [19] modificado).

Velocidade de corte ( $v_c$ )	Profundidade de corte ( $a_p$ )	Largura de corte ( $a_p$ )	Avanço por aresta de corte ( $f_z$ )
150 m/min	0,2 mm	6,0 mm	0,08 mm/dente

Segundo Rohloff *et al.*, 2011 [19], não foi possível definir qual mecanismo de desgaste foi mais relevante, afirmando que o desgaste foi proveniente da combinação de diversos mecanismos. Os resultados apontaram também que o desgaste da usinagem de um aço inoxidável ocorreu de forma acelerada, devido à dureza do material da peça utilizada. Os revestimentos A e B tiveram desgastes mais acentuados que o revestimento C, sendo as ferramentas A e B, produzidas pelo mesmo fabricante. Diante dos resultados, os autores ressaltam a importância da correta seleção do revestimento da ferramenta de corte, e adicionalmente, indicam que o desgaste da ferramenta está relacionada ao seu processo de fabricação.

Iqbal *et al.*, 2016 [20] realizaram experimentos para analisar o desgaste de flanco no fresamento. Esses experimentos são provenientes de diferentes velocidades de corte, avanço por dente, diferentes durezas nas amostras e tipos de lubrificação (Dry – a seco e MQL – mínima quantidade lubrificante). A Figura 25 apresenta a vida da ferramenta nas diferentes condições de corte.



**Figura 25:** Vida da ferramenta em função de diferentes condições de usinagem [20].

Iqbal *et al*, 2016 [20] indicam, através de seus ensaios, que a dureza da amostra usinada e a velocidade de corte são fatores de grande relevância para a vida da ferramenta. Os autores afirmam que o avanço e a lubrificação influenciam ainda na qualidade superficial da amostra usinada e que a melhor forma de lubrificação encontrada no experimento realizado foi a MQL, porque se obtém vantagem na vida da ferramenta e se reduz, de forma geral, o custo do processo de usinagem.

### 2.3.Aço SAE 4340

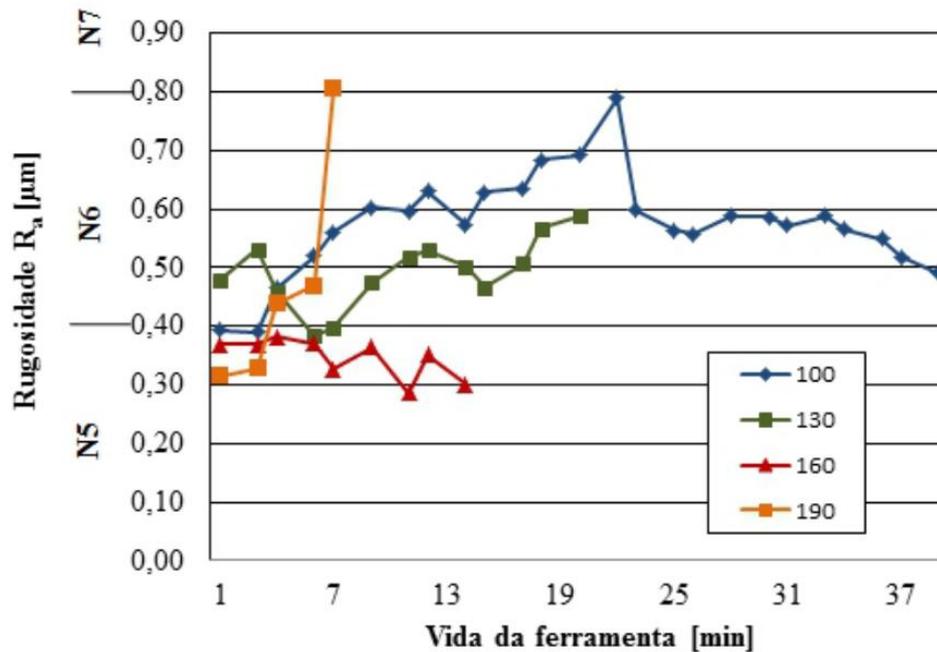
O Aço 4340 é um aço para beneficiamento e pode alcançar elevada resistência e dureza, através do tratamento térmico de têmpera e revenido. A resistência ao escoamento encontra-se na faixa de 930 a 1080 MPa, e dureza na faixa de 28 a 36 Rockwell C. Este material pode ainda ser endurecido superficialmente por nitretação e é utilizado na indústria para aplicações que demandam grandes solicitações mecânicas, como eixos, engrenagens, acoplamentos e pinos. [21]. A composição química do aço 4340, de acordo com a norma ASTM A506 [22], é descrita na Tabela 7.

**Tabela 6:** Composição do aço 4340( [21] modificado).

<b>C</b>	<b>Si</b>	<b>Mn</b>	<b>Cr</b>
0,37-0,44	0,10-0,35	0,55-0,90	1,55-2,00
<b>Ni</b>	<b>Mo</b>	<b>P</b>	<b>S</b>
0,65-0,95	0,20-0,35	0-0,04	0-0,04

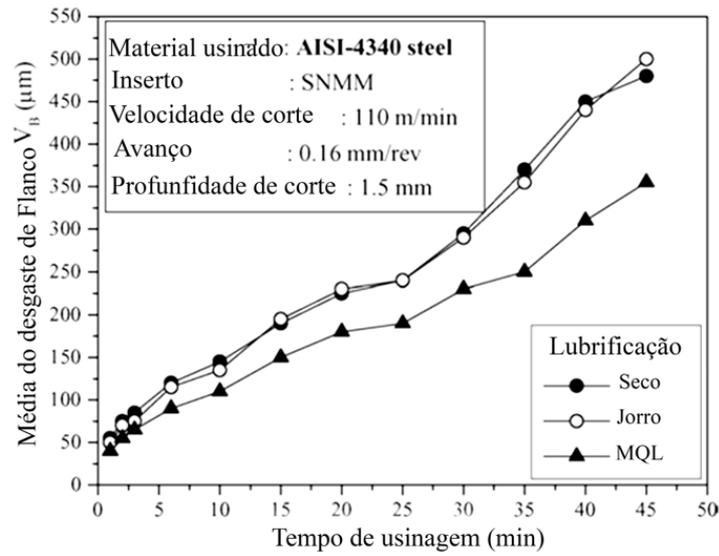
A usinagem é mais bem realizada quando o aço 4340 encontra-se na condição recozido ou normalizado, em resultado do decréscimo dos valores de dureza obtidos através do tratamento térmico. As peças dotadas deste material podem ser usinadas por todos os métodos convencionais tais como torneamento e fresamento [23]. Diversos trabalhos têm sido realizados com o intuito de avaliar o comportamento do aço SAE 4340 em operações de usinagem bem como o desgaste das ferramentas utilizadas nos processos de fabricação e a integridade superficial das peças usinadas.

Noll *et al.*, 2015 [24] realizaram um estudo sobre a influência da velocidade de corte na vida e nos mecanismos de desgaste das ferramentas de metal-duro no torneamento do aço AISI 4340 endurecido com 55 HRC. Os autores submeteram a amostra ao torneamento, utilizando quatro velocidades de corte (100, 130, 160 e 190 m/min). A ferramenta utilizada foi construída com substrato de metal-duro e revestimento de TiCN + AlO + TiN. Os resultados da pesquisa indicam a possibilidade e a viabilidade da aplicação industrial das ferramentas de metal-duro no torneamento de materiais endurecidos. O principal mecanismo de desgaste verificado nos experimentos foi a formação de cratera, sendo atribuída ao mecanismo de desgaste por abrasão. Em todas as condições de corte, os autores verificaram o material da peça usinada aderido à ferramenta ao final dos experimentos. Através de ensaios, verificou-se que a ferramenta de maior vida foi a que se utilizou de menor velocidade  $v_c = 100$  m/min. Os autores afirmam que a forma do gume da ferramenta pode influenciar no acabamento da superfície no parâmetro de rugosidade, ao longo da vida das ferramentas. Os autores apresentam um gráfico que correlaciona a vida da ferramenta à rugosidade da amostra usinada, como pode ser visto na Figura 26. As diferentes velocidades de corte utilizadas dispuseram os valores de Ra entre as classes de rugosidade N5 e N6.



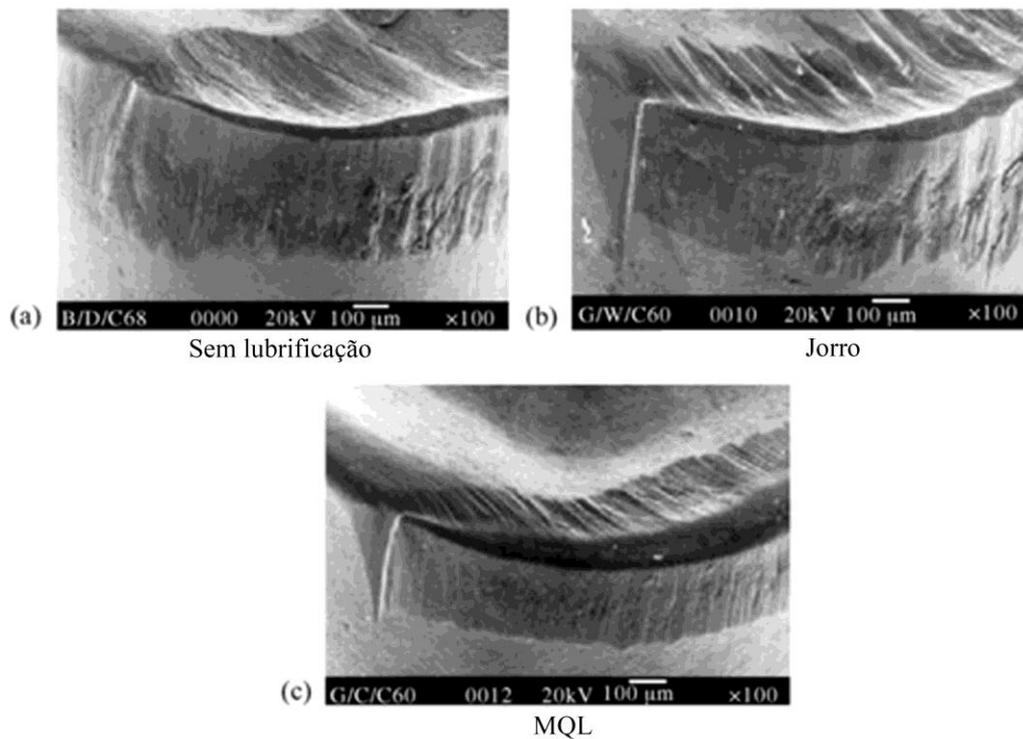
**Figura 26:** Rugosidade  $R_a$  ao longo da vida da ferramenta em função da velocidade corte utilizada [24].

Segundo Dhar *et al.*, 2005 [25] a vida da ferramenta de corte está intimamente relacionada a qualidade superficial das peças usinadas. Segundo os autores, o fluido de corte tem influente participação no controle da vida da ferramenta, porque contribui na lubrificação e arrefecimento, além de contribuir na remoção do cavaco. Os autores compararam o desgaste de flanco durante a usinagem no aço AISI 4340 em três condições de lubrificação. Diante dos benefícios e malefícios da lubrificação, surgiu o conceito MQL (*Minimum Quantity Lubrication* ou Mínima Quantidade de Lubrificante), onde se aplica a lubrificação numa vazão pequena. Os autores investigaram o desgaste da ferramenta de corte no torneamento do aço AISI 4340 em três diferentes condições de lubrificação: corte a seco, utilizando MQL e em jorro. A Figura 27 representa o desenvolvimento do desgaste de flanco na aresta principal de corte na condição sem lubrificação, em jorro e na condição MQL.



**Figura 27:** Desgaste de flanco VB na usinagem com fluido lubrificante, usinagem a seco, na condição Jorro e na condição MQL. ([16] modificado)

Os principais mecanismos de desgaste encontrados neste trabalho foram o lascamento e deformações irregulares na ponta da ferramenta. Os resultados apontam melhores resultados através da condição MQL, em comparação ao torneamento a seco, ou torneamento com lubrificação. Os desgastes das ferramentas de corte foram avaliados após 45 minutos de usinagem, como apresentado na Figura 28.



**Figura 28:** Final da vida das arestas de corte na condição (a) seco, (b) jorro e (c) MQL( [25] modificado).

## 2.4.Rugosidade

A condição de uma superfície usinada engloba diversos fatores que podem influenciar na qualidade da superfície. A integridade superficial vai além da textura da superfície e da forma geométrica, avaliando alterações no acabamento e subsuperficiais. O acabamento e a integridade superficial devem ser definidos e mantidos dentro dos limites especificados para cada projeto [26].

Segundo Machado *et al.*, 2015 [2], o processo de usinagem resulta em pequenas irregularidades e erros microgeométricos. O estudo da rugosidade pode determinar correções na velocidade de avanço, indicar aresta postiça de corte, e até mesmo o desgaste da ferramenta. Há casos que demandam baixa rugosidade, como superfícies que servirão de escoamento para gases e fluido. Por outro lado, componentes que trabalham sob lubrificação demandam uma rugosidade mais elevada, para facilitar a lubrificação. Assim, a rugosidade se torna um dos principais parâmetros de verificação da integridade superficial de uma peça usinada.

Um importante parâmetro de rugosidade é o desvio aritmético médio ( $R_a$ ). Esse parâmetro é a média aritmética dos valores absolutos coletados durante o comprimento da amostragem ( $l_r$ ). Para o fresamento frontal, o ( $R_a$ ) é calculado através da Equação 2.4

$$R_a = \frac{r\varepsilon - \sqrt{r\varepsilon^2 - \left(\frac{f_z}{2}\right)^2}}{2} \quad (2.4)$$

Onde:

$\varepsilon$  – raio da ponta da ferramenta

$f_z$  – avanço por dente

Diversos insertos para fresamento frontal possuem a aresta secundária plana ( $b_s$ ), denominadas pastilhas *wiper*. Essas pastilhas costumam possuir sua aresta secundária de 3 a 10 vezes o avanço por dente, permitindo melhor acabamento do que com pastilhas com raio de ponta. No entanto, quando se aumenta muito o valor de ( $b_s$ ), há tendência ao aumento da vibração na ferramenta e na peça, devido ao maior comprimento em contato. Assim, aumenta a tendência de vibração, que pode comprometer o acabamento. Portanto, existe um valor ótimo de ( $b_s$ ), para que a área de contato entre a ferramenta e a peça seja aumentada, mas que esse incremento não seja grande a ponto de piorar o acabamento pelo aumento da vibração [2].

## Capítulo 3

### Materiais e Métodos

#### 3.1. Material

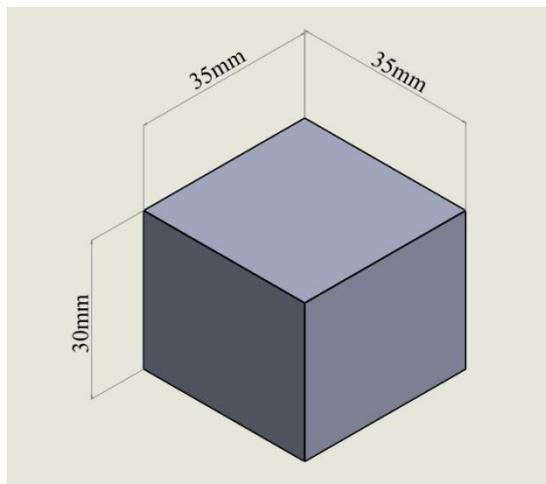
O material usinado neste trabalho foi o aço SAE 4340 com duas polegadas de diâmetro e 500mm de comprimento na condição laminado, com tratamento térmico de alívio de tensão. A dureza, de acordo com o fabricante, é de 27 HRc e a composição química está descrita na Tabela 8.

**Tabela 7:** Composição química do aço SAE 4340 – dados do fabricante (em % de peso).

C	Mn	Si	Cr	Ni	Mo	Fe (em balanço)
0,39	0,72	0,25	0,75	1,72	0,24	
Co	Al	Cu	P	V	S	
0,01	0,050	0,04	0,010	0,01	0,025	

#### 3.2. Fresamento das amostras

Para a obtenção das amostras, foram cortadas quatro amostras a partir do tarugo inicial. As dimensões finais das amostras são apresentadas na Figura 29. O fresamento de topo foi realizado na fresadora Diplomat 3001, modelo FVF 2000 (Figura 30), no laboratório de Pesquisa em Usinagem (LABUS) de CEFET/RJ.



**Figura 29:** Representação da amostra em aço 4340 utilizada no fresamento.



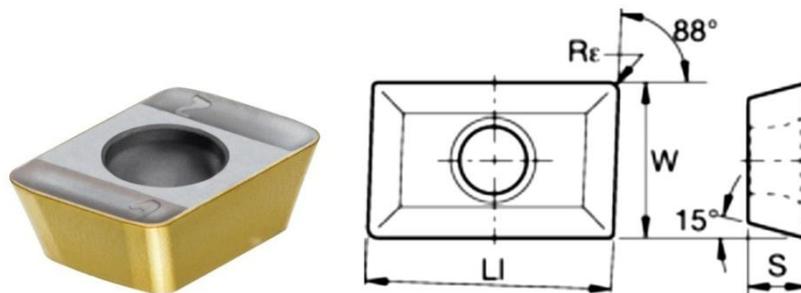
**Figura 30:** Fresadora Diplomat 3001 modelo FVF 2000.

Neste trabalho foram avaliados dois parâmetros de corte: velocidade de corte ( $v_c$ ) e profundidade de corte ( $a_p$ ) totalizando quatro condições, conforme representado na Tabela 8. O planejamento de experimentos adotado utilizou dois níveis para cada parâmetro de corte. A usinagem foi realizada a seco o avanço por dente foi mantido constante em 0,125mm/rev. Os desgastes foram avaliados nos tempos de usinagem: 10, 20, 30 e 40 min.

**Tabela 8:** Condições de corte das amostras usinadas.

Condição	$v_c$ [m/min]	$a_p$ [mm]
1	40	0,4
2	40	0,6
3	50	0,4
4	50	0,6

A usinagem foi realizada utilizando uma fresa intercambiável de 20mm de diâmetro, dotada de dois insertos de metal duro, modelo XDMT090308HXPA120 da fabricante Kennametal. A Figura 31 apresenta as geometrias da ferramenta utilizada, sendo o comprimento  $LI=9,0\text{mm}$ , largura  $W=6,0\text{mm}$ , espessura  $S=3,0\text{mm}$  e o raio de ponta  $R_\epsilon = 0,8\text{mm}$ . Para as condições de corte, o fabricante sugere  $a_p=0,6\text{ mm}$  e  $v_c$  entre 200 e 260 m/min.



**Figura 31:** Inserto utilizado no fresamento

### 3.3. Análise do desgaste da ferramenta

Os insertos utilizados foram examinados no estereoscópio, com o objetivo de avaliar os desgastes decorrentes do fresamento de topo em diferentes condições de usinagem. O equipamento utilizado foi o StudarLab, produzido por Metrimpex e Labimex, modelo PZ0 (Figura 32) do Laboratório de Materiais – LAMAT do CEFET/RJ.



**Figura 32:** Estereoscópio Studar Lab, produzido por Metrimpex e Labimex, modelo PZ0.

No tempo de usinagem de 30 min, foi analisado o desgaste da ferramenta através do Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV) CamScan 3200LS, localizado no Laboratório de Materiais – LAMAT do CEFET/RJ.

### **3.4. Medidas de rugosidade**

Para avaliar a influência do desgaste da ferramenta de corte na integridade superficial da peça usinada foi proposto um estudo complementar da rugosidade das amostras após diferentes tempos de usinagem. O rugosímetro utilizado para as medições de rugosidade Ra foi o Tesa-Rugosurf 10, com resolução de 0,01  $\mu\text{m}$  e comprimento de amostragem de 0,8mm, do Laboratório de Metrologia Dimensional (LAMDI) do CEFET/RJ.

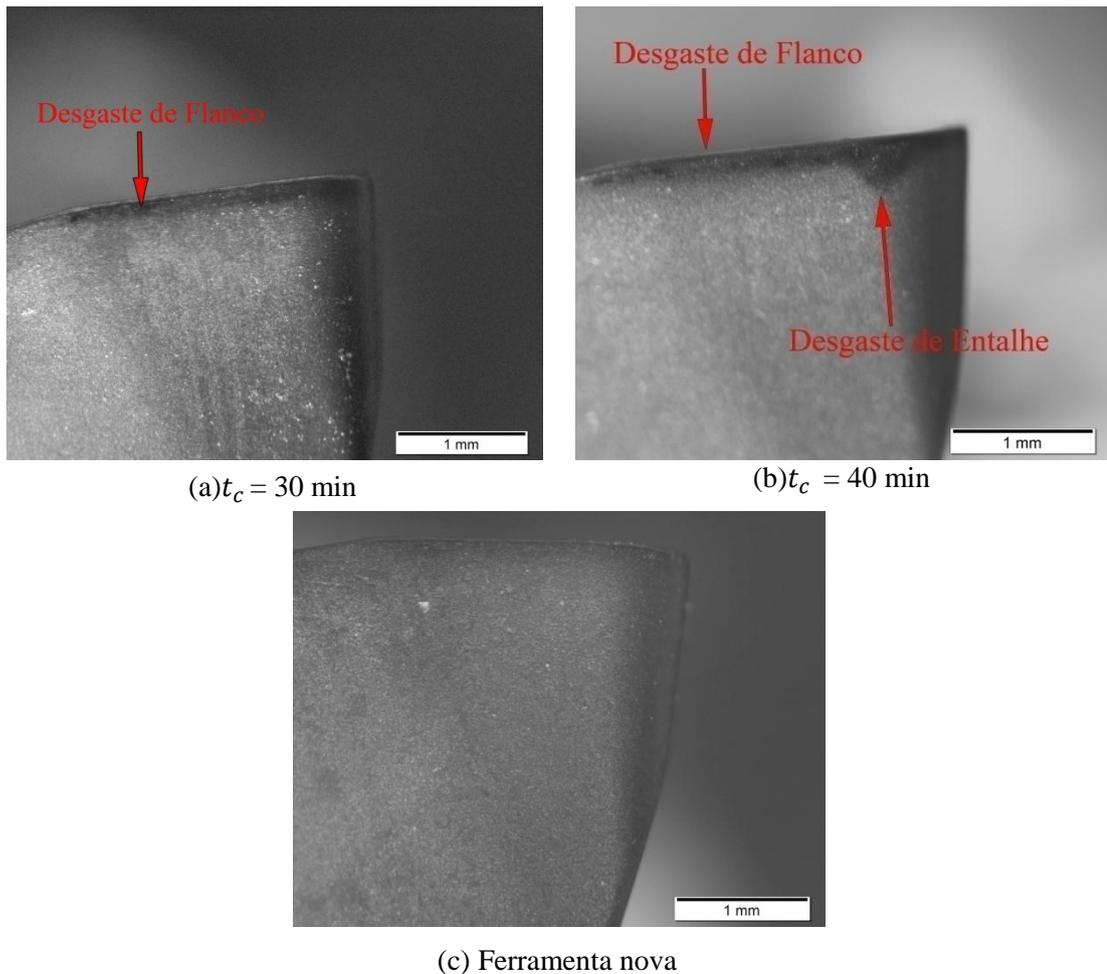
## Capítulo 4

### Resultados e discussão

No presente capítulo, os resultados são apresentados iniciando pela análise por imagem, valores desgaste de flanco da ferramenta, seguidos da rugosidade superficial média (Ra). Complementarmente, são apresentadas imagens de microscopia eletrônica de varredura – MEV do desgaste de ferramenta.

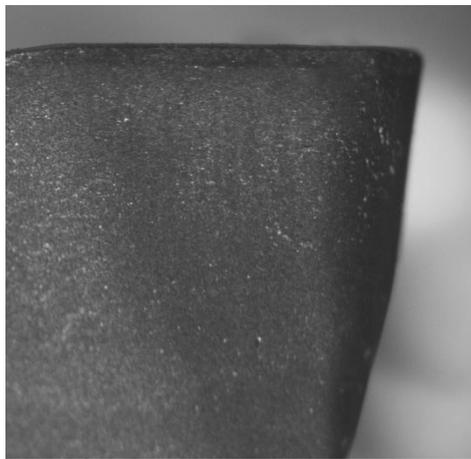
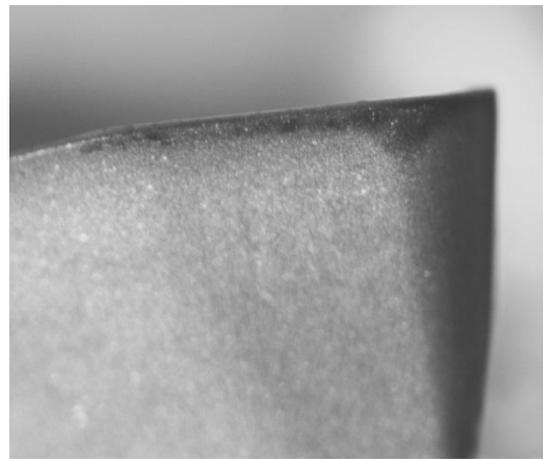
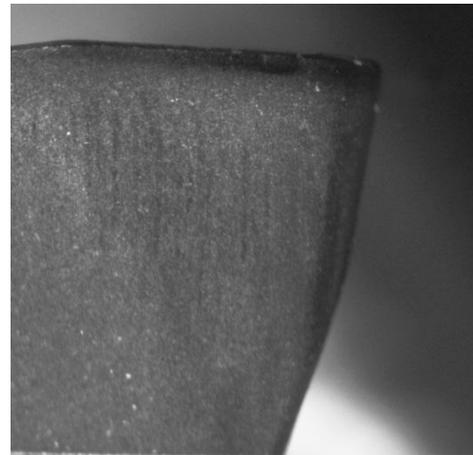
#### 4.1. Análise de imagem do desgaste das ferramentas de corte

Para a análise do desgaste da ferramenta foram obtidas imagens, através do estereoscópio. A Figura 33 apresenta imagens relativas à condição de corte 2, onde os parâmetros são ( $v_c=40$  m/min,  $a_p = 0,6$ mm). Os tempos de corte avaliados são ( $t_c$ ) 30 e 40 minutos, e a ferramenta nova. Analisando as figuras, é possível observar um aumento no desgaste de flanco com o tempo de usinagem. Contudo, os valores de VB (desgaste de flanco) apresentados foram muito pequenos. Esse fato deve estar relacionado com o uso de velocidades de corte muito inferiores as determinadas pelo fabricante da ferramenta de corte. Na Figura 33b também nota-se um desgaste de entalhe mais evidente, mesmo para baixos aumentos.

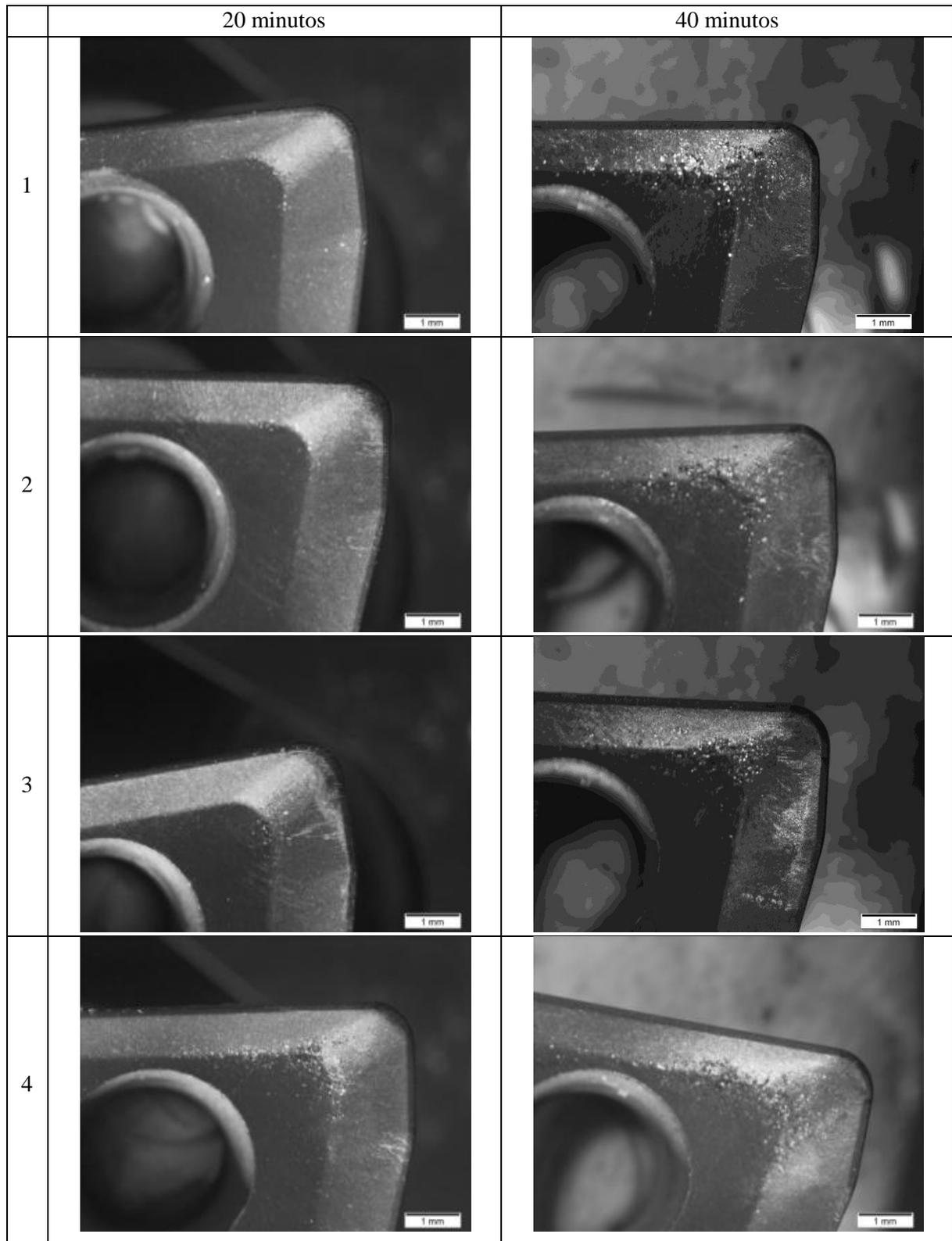


**Figura 33:** Desgaste de flanco para a condição ( $v_c=40 \text{ m/min}$ ,  $a_p = 0,6\text{mm}$ ) para (a)  $t_c = 30 \text{ min}$ , (b)  $t_c = 40 \text{ min}$  e (c) ferramenta nova.

A Figura 34 mostra um comparativo entre os desgastes das ferramentas de corte para todas as condições estudadas no tempo de usinagem de 40 minutos, sendo que o desgaste de flanco é evidenciado em todas as condições. Segundo Machado *et al.*, 2001 [2] o desgaste de flanco é resultado da ação abrasiva do corte e do atrito entre ferramenta e peça. O mesmo é caracterizado por ser gerado em usinagens convencionais e está diretamente relacionada aos parâmetros de corte utilizados. Conforme apresentado no Capítulo 3, as velocidades de corte aplicadas para essa ferramenta, de acordo com o fabricante, são superiores as adotadas neste trabalho. Sabendo que o principal parâmetro de corte que influencia no desgaste da ferramenta é a velocidade de corte [1], era esperado um desgaste menos agressivo para as condições de corte aplicadas.

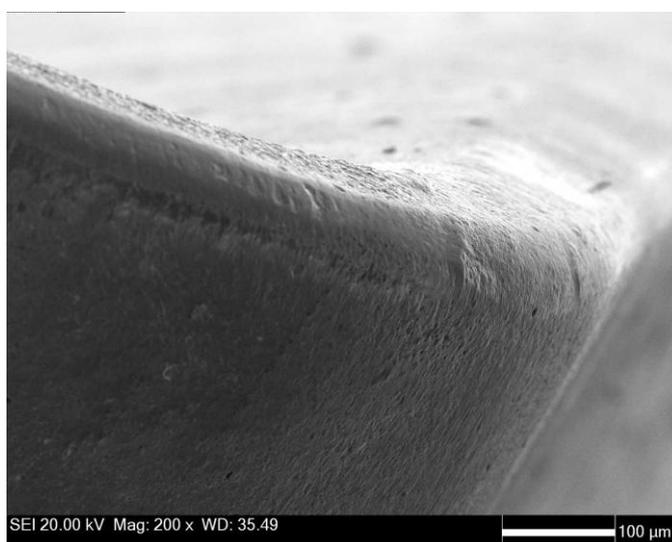
(a)  $v_c=40\text{m/min}$ ,  $a_p=0,4\text{mm}$ (b)  $v_c=40\text{ m/min}$ ,  $a_p=0,6\text{mm}$ (c)  $v_c=50\text{m/min}$ ,  $a_p=0,4\text{mm}$ (d)  $v_c=50\text{m/min}$ ,  $a_p=0,6\text{mm}$ **Figura 34:** Comparação das quatro condições de usinagem após 40 minutos

A Figura 35 avalia o desenvolvimento do mecanismo de desgaste nas superfícies de saída das amostras para as quatro diferentes condições de usinagem. Para o tempo de corte  $t_c = 40$  minutos, ocorre o desgaste abrasivo através do riscamento entre partículas removidas da peça sobre a superfície de saída da ferramenta.



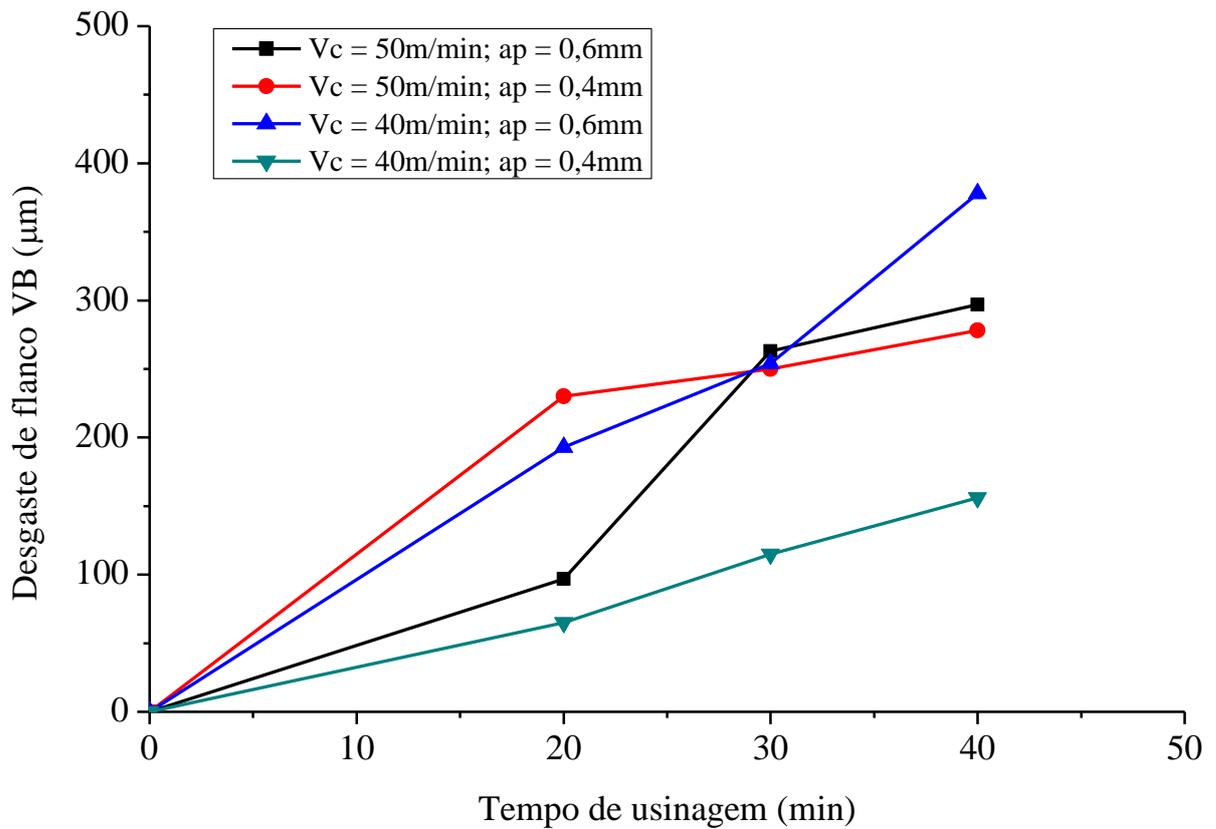
**Figura 35:** Desgaste na superfície de saída das ferramentas.

A análise da Figura 36 obtida através do MEV permite a visualização do desgaste da ferramenta utilizada na condição  $v_c=40\text{m/min}$ ,  $a_p=0,6\text{mm}$  para 30 minutos de usinagem. Essa condição de usinagem foi a mais deletéria para a ferramenta. Nota-se pequena formação do desgaste de flanco por abrasão em virtude das baixas velocidades de corte. Entretanto, ocorreu aderência do material da peça, em virtude de baixas temperaturas e de velocidades de corte mais baixas que as recomendadas pelo fabricante. Esse resultado está em conformidade com a literatura, [2]. Ressalta-se que em todas as condições foram observados os mesmos mecanismos de desgaste (abrasão e adesão) e nas condições de menor velocidade de corte ( $v_c=40\text{ m/min}$ ). A adesão pode resultar na formação uma aresta postiça de corte, prejudicando ainda mais o acabamento superficial da peça.



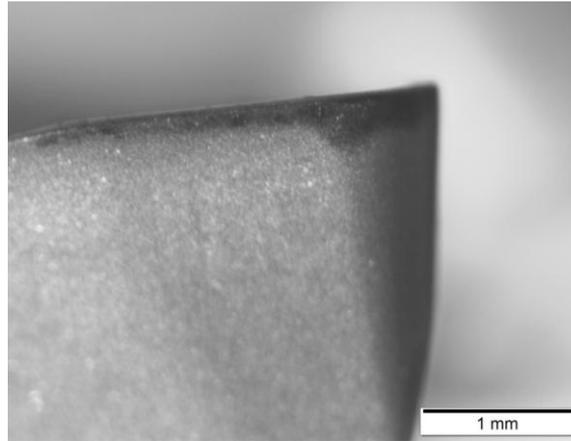
**Figura 36:** Análise dos desgaste da ferramenta após 30 minutos de usinagem.

A fim mensurar o desgaste de flanco, foram obtidos os valores de VB para cada condição de usinagem sob diferentes tempos de corte. A Figura 37 apresenta as curvas de desgaste de flanco durante o fresamento frontal. As condições de usinagem 2 ( $v_c=40\text{m/min}$ ,  $a_p=0,6\text{mm}$ ) e 4 ( $v_c=50\text{m/min}$ ,  $a_p=0,6\text{mm}$ ), que tiveram maiores profundidades de corte, apresentaram desgaste mais acentuado. A condição 2 mostrou-se mais severa, já que resulta em maior aderência, devido a baixa velocidade de corte, conforme indicado na Figura 36. Nessa condição, o desgaste de flanco também foi o maior, confirmando a maior severidade dentre as condições analisadas.



**Figura 37:** Gráfico do desgaste de flanco durante o fresamento frontal.

Através da Figura 38, pode-se observar o início da formação do desgaste de entalhe para a condição2, onde se notou mais ruído durante a usinagem e mais severidade na remoção de cavaco, mesmo sendo a que apresenta menor velocidade de corte. Como o maior tempo de contato entre ferramenta e peça espera-se obter maiores valores de desgaste, principalmente pela maior tendência a aderência de material da peça na ferramenta de corte, conforme observado nas figuras anteriores.



**Figura 38:** Desgaste de entalhe na condição  $v_c=40$  m/min,  $a_p=0,6$ mm.

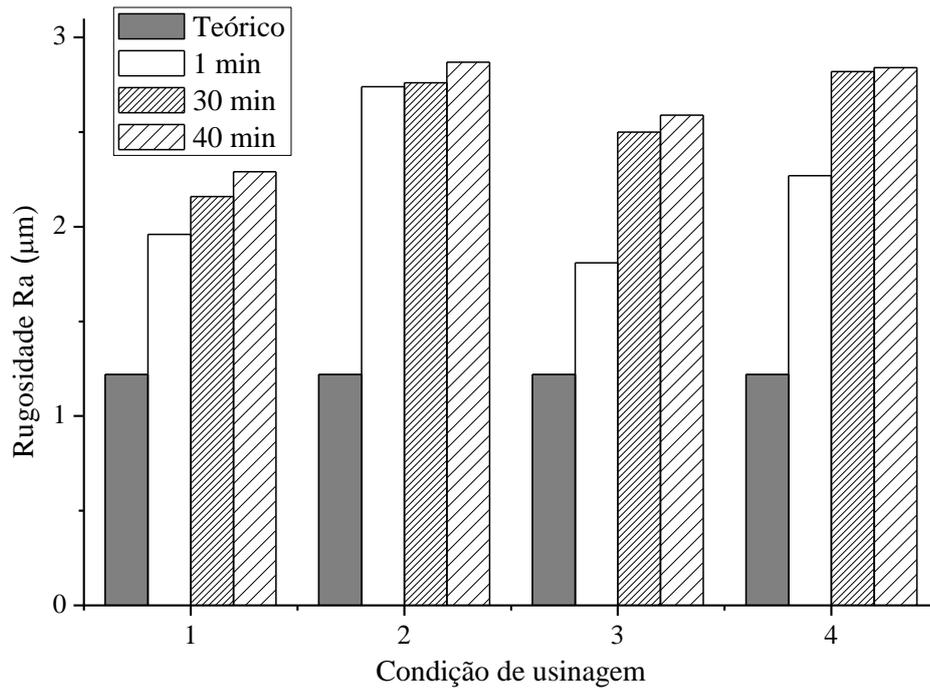
## 4.2. Análise da evolução da rugosidade durante a usinagem

A Tabela 11 apresenta os valores da rugosidade teórica e experimental para a operação de fresamento. Nota-se que um acréscimo da rugosidade das amostras ensaiadas durante o tempo de usinagem. No entanto, como as velocidades de usinagem ( $v_c$ ) foram mais baixas que as recomendadas pelo fabricante da ferramenta, os valores de rugosidade teóricos, calculados através da Equação 2.4, são mais baixos que os encontrados experimentalmente. É possível verificar, que a Equação 2.4, apresenta apenas uma estimativa do valor de rugosidade, pois sabe-se que outros parâmetros de corte, como a velocidade de corte, influenciam significativamente na rugosidade. O tempo 1min foi definido como o tempo para a realização do primeiro passe de usinagem.

**Tabela 9:** Rugosidade teórica e rugosidades Ra medida experimentalmente após fresamento.

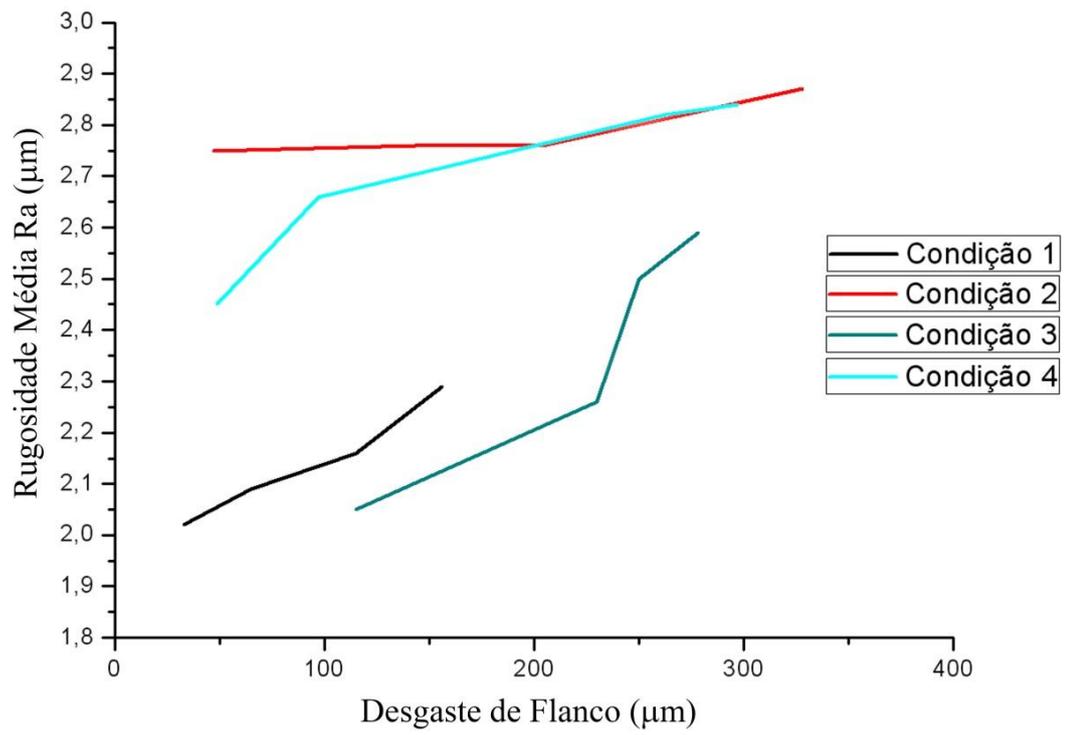
Amostra	Rugosidade Ra ( $\mu\text{m}$ )			
	Teórica	1 min	30 min	40 min
1	1,22	1,96	2,16	2,29
2	1,22	2,74	2,76	2,87
3	1,22	1,81	2,5	2,59
4	1,22	2,27	2,82	2,84

A Figura 39 apresenta os valores de rugosidade encontrados durante o tempo de usinagem. Nota-se o acréscimo da rugosidade média no decorrer do tempo de usinagem. Além disso, é possível observar que a qualidade superficial da peça está correlacionada à profundidade de corte  $a_p$  aplicada ao processo de usinagem. As velocidades de corte também tem influência nos resultados de Ra. No entanto, como as velocidades de corte utilizadas muito próximas, não ocorreram grandes variações em decorrência desse parâmetro.



**Figura 39:** Rugosidade para diferentes tempos de usinagem.

A Figura 40 apresenta uma correlação entre os desgastes de flanco das quatro diferentes condições de usinagem e os valores de rugosidade Ra, das amostras. Pode-se verificar através das análises anteriores que a condição 2 é a mais severa, tanto no desgaste de ferramenta, quanto qualidade superficial, aumentando os valores da rugosidade Ra. A baixa velocidade de corte adotada nessa condição provocou a formação do entalhe, que em conformidade com a literatura [1], influenciou no acabamento das peças usinadas.



**Figura 40:** Evolução do Desgaste de Flanco correlacionado com a Rugosidade média Ra.

## Capítulo 5

### Conclusão

O presente trabalho, que teve como objetivo a análise das influências dos parâmetros de corte no desgaste e vida da ferramenta de metal duro no fresamento do aço SAE 4340, permite as seguintes conclusões:

1. O desgaste de flanco foi o principal tipo de desgaste encontrado nas condições de usinagem. No geral, houve pouco desgaste de flanco em virtude das baixas velocidades de corte. Entretanto, devido às baixas temperaturas e baixas velocidades, ocorreu aderência do material proveniente da peça usinada sobre a superfície de saída da ferramenta.
2. O aumento do desgaste da ferramenta conduziu a um acréscimo da rugosidade média.
3. A rugosidade é diretamente influenciada pelos parâmetros de corte, sendo a profundidade, a que mais influenciou nos resultados obtidos. Para maiores profundidades de corte, têm-se menores valores de rugosidade. Devido à utilização de velocidades abaixo das recomendadas pelo fabricante, não foi possível obter valores de Ra tão baixos quanto os teóricos.
4. Menores profundidades de corte resultaram em melhores acabamentos superficiais da peça, e menores valores de desgaste da ferramenta.

## **Sugestões para trabalhos futuros**

1. Realizar testes em maior número de amostras.
2. Utilizar velocidades de corte mais espaçadas, para avaliar o desgaste da ferramenta.
3. Avaliar o efeito do avanço no desgaste da ferramenta.
4. Avaliar o desenvolvimento do desgaste da ferramenta com usinagem MQL e jorro.

## Bibliografia

1. DINIZ, A. E.; MARCONDES, F. C.; COPPINI, N. L. **Tecnologia da Usinagem dos Materiais**. 3ª ed. ed. São Paulo: Artliber Editora, 2001.
2. MACHADO, A. R. **Teoria da usinagem dos materiais**. [S.l.]: [s.n.], 2015.
3. FERRARESI, D. **Fundamentos da usinagem dos metais**. [S.l.]: [s.n.], 1977.
4. DAS, S. R.; NAYAK, R. P.; DHUPAL. Optimization of cutting parameters on tool wear and workpiece surface temperature in turning of AISI D2 steel. **International Journal of Lean Thinking Volume 3**, Dezembro 2012.
5. MARKUS, W. **Aspectos Tecnológicos da Minimização e Eliminação do Fluido de Corte no Processo de Torneamento com Insertos de Metal-Duro Revestidos Com TiN**. Unversidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, p. 128. 2001.
6. XAVIER, F. A. **Aspectos Tecnológicos do Torneamento do Ferro Fundido Vermicular com Ferramentas de Metal-Duro, em Cerâmica e CBN**. Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, p. 146. 2003.
7. STOETERAU, R. L. Fundamentos dos Processos de Usinagem. Disponível em: <<http://sites.poli.usp.br/d/pmr2202/arquivos/aulas/PMR2202-AULA%20RS1.pdf>>. Acesso em: 10 jun. 2017.
8. TOOL wear. **SANDVIK**, Novembro 2016. Disponível em: <[http://www.sandvik.coromant.com/en-us/knowledge/milling/troubleshooting/tool\\_wear](http://www.sandvik.coromant.com/en-us/knowledge/milling/troubleshooting/tool_wear)>. Acesso em: 2016 novembro 22.
9. SOUTO, U. B. **Monitoramento do Desgaste de Ferramenta no Processo de Fresamento via Emissão Acústica**. Universidade Federal de Uberlândia. Uberlândia, p. 40. 2007.
10. LIMA, R. O. C.; MELO, A. C. A. ANÁLISE DO DESGASTE E DAS AVARIAS EM INSERTOS DE METAL DURO APÓS O FRESAMENTO COM AR QUENTE. **7º CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA DE FABRICAÇÃO**, 20 maio 2013.
11. FERREIRA, M. **Avaliação do desgaste da ferramenta de metal duro revestida com TiN no fresamento do aço ABNT 4140 a seco e com fluido sintético 8% em água**. Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais. Belo Horizonte. 2011.

12. BROWNHILL, M. Minimizing Tool Breakage Cost. **http://advancedmanufacturing.org/**, 2006. Disponível em: <<http://advancedmanufacturing.org/minimizing-tool-breakage-cost/>>. Acesso em: 22 jun. 2017.
13. REIS, A. M. **Influência do ângulo de Posição Secundário da Ferramenta, Raio de Ponta e Lubrificação na Usinagem em Presença da Aresta Postiça de Corte**. UFU. Uberlândia, p. 88. 2000.
14. COZZA, R. C. **Estudo do Comportamento do Coeficiente de Desgaste e dos Modos de Desgaste Abrasivo em Ensaios de Desgaste Micro-Abrasivo**. USP. [S.l.]. 2006.
15. FERNANDES, J. A. **Ferramentas Diamantadas para Usinagem de Madeira**. Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, p. 72. 2009.
16. OLIVEIRA, A. J. D. **Análise do desgaste de ferramentas no Fresamento com Alta Velocidade de aços endurecidos**. Campinas. 2007.
17. CÂMARA, A. **Influência do ângulo de posição sobre o fresamento de níquel puro com insertos de metal duro**. Universidade Federal de Minas Gerais. Belo Horizonte. 2008.
18. HASSUI, A.; RODRIGUES, M. A. **Análise dos desgastes de ferramenta de metal duro revestidas no fresamento da liga a base de níquel - Inconel 625 - Depositada em forma de revestimento metálico**. USP. São Paulo. 2007.
19. ROHLOFF, R. C. et al. **Análise do desgaste de ferramentas de corte com diferentes revestimentos no fresamento do aço inoxidável AISI 420**. Joinville. 2011.
20. IQBAL, A. Effects of tool life criterion on sustainability of milling. **Journal of Cleaner Production**, 2016.
21. METAL de alta resistência. **INTERLLOY**. Disponível em: <<http://www.interlloy.com.au/our-products/high-tensile-steels/4340-high-tensile-steel/>>. Acesso em: 29 novembro 2016.
22. DEFENSE, U. S. D. O. **ASMT A506 - Standard Specification for Alloy and Structural Alloy Steel, Sheet and Strip, Hot-Rolled and Cold-Rolled**. [S.l.]. 2016.
23. 4340 Steel AISI. **ASTMSTEEL**. Disponível em: <<http://www.astmsteel.com/product/4340-steel-aisi/>>. Acesso em: 2016 novembro 29.
24. NOOL, C.; BOING, D. Influência da velocidade de corte na vida e nos mecanismos de desgaste das ferramentas de metal-duro no torneamento do aço AISI 4340 endurecido.

**Revista UNIFEBE**, 2015.

25. DHAR, N. R.; KAMRUZZAMAN; AHMED, M. Effect of minimum quantity lubrication (MQL) on tool wear and surface roughness in turning AISI-4340 steel. **Elsevier**, Bangladesh, Setembro 2005.
26. ROBERTO, B. J. J. **Análise de Tensões Residuais, Integridade Superficial e Forças de Usinagem no Fresamento de Topo de Aço SAE 4340 Endurecido**. Centro Universitário da Fei. São Bernardo do Campo, p. 115. 2009.
27. CHOUDHURY, S. K. Optimization of cutting parameters for maximizing tool life. **International Journal of Machine Tools & Manufacture** **39**, 1999.
28. ORRA, K.; CHOUDHURY, S. K. Development of flank wear model of cutting tool by using adaptive feedback linear control system on machining AISI D2 steel and AISI 4340 steel. **Mechanical System and Signal Processing**, Kanpur, 2016.