

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE - FURG
ESCOLA DE ENGENHARIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

**ANÁLISE DA RELAÇÃO DOS PARÂMETROS DE CORTE COM A QUALIDADE
SUPERFICIAL E DESGASTE DA FERRAMENTA DE METAL DURO COM TRIPLA
CAMADA DE REVESTIMENTO NO TORNEAMENTO A SECO DO AÇO SAE 4140**

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

GISELE DA COSTA BORGES

RIO GRANDE, RS

2020

GISELE DA COSTA BORGES

**ANÁLISE DA RELAÇÃO DOS PARÂMETROS DE CORTE COM A QUALIDADE
SUPERFICIAL E DESGASTE DA FERRAMENTA DE METAL DURO COM TRIPLA
CAMADA DE REVESTIMENTO NO TORNEAMENTO A SECO DO AÇO SAE 4140**

Dissertação de mestrado apresentada ao
Programa de Pós-Graduação em
Engenharia Mecânica da Universidade
Federal do Rio Grande-FURG como
requisito para obtenção do título de “Mestre
em Engenharia Mecânica” – Área de
Concentração: Engenharia de Fabricação

Orientador: Prof. Dr. Fábio Augusto
Dornelles do Amaral

Coorientador: Prof. Dr. Luciano Volcanoglo
Biehl

RIO GRANDE, RS.

2020

Ficha Catalográfica

B732a Borges, Gisele da Costa.

Análise da relação dos parâmetros de corte com a qualidade superficial e desgaste da ferramenta de metal duro com tripla camada de revestimento no torneamento a seco do aço SAE 4140 / Gisele da Costa Borges. – 2020.
100 f.

Dissertação (mestrado) – Universidade Federal do Rio Grande – FURG, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Rio Grande/RS, 2020.

Orientador: Dr. Fábio Augusto Dornelles do Amaral.

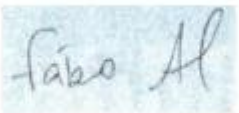
Coorientador: Dr. Luciano Volcanoglo Biehl.

1. Usinagem 2. Metal Duro 3. Desgaste 4. Rugosidade I. Amaral, Fábio Augusto Dornelles do II. Biehl, Luciano Volcanoglo III. Título.

CDU 621.9:669.1

Catálogo na Fonte: Bibliotecário José Paulo dos Santos CRB 10/2344

BANCA EXAMINADORA



Prof. Dr. Fábio Augusto Dornelles do Amaral



Prof. Dr. Luciano Volcanoglo Biehl



Prof. Dr. José de Souza

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, agradeço aos meus pais e ao meu irmão, Henrique, por todo incentivo e toda a confiança em mim depositada, pois sem eles nada disso seria possível.

À minha amiga, Anielle Severo, por sempre estar disponível para me auxiliar nos momentos difíceis, sendo um dos meus pilares para chegar até aqui. Sem tua amizade, essa caminhada seria, com toda certeza, ainda mais difícil. Muito obrigada por tudo.

Ao professor Luciano Biehl, por toda a sensibilidade e disponibilidade. Obrigada por sempre estar disposto a me ouvir e a me ajudar a encontrar soluções. Minha eterna gratidão e admiração.

Ao meu orientador, Fábio Amaral, pela paciência, pela compreensão, e por toda a ajuda prestada, do início ao fim do trabalho, sendo incansável na busca pela excelência deste.

Aos técnicos de laboratório, Jorge, Bruno e Cristiano, por toda boa vontade e dedicação ao me auxiliarem nas atividades experimentais executadas.

Aos colegas Josiara Novôa, Magno Malheiro, Leonardo Conde, Angelo Bonamigo, Hektor Borges, Álvaro Piovesan, Raí Lima e Matheus Martins, por sempre estarem dispostos a me ajudar, em qualquer situação, ao longo desses 2 anos.

Ao CNPq, pela concessão da bolsa de mestrado, que foi de grande importância para a realização desta pesquisa.

E a todos que fizeram parte desta minha caminhada, de maneira direta ou indireta, e que eu possa ter esquecido de mencionar.

RESUMO

O presente trabalho visa encontrar as melhores condições de torneamento cilíndrico externo a seco para um aço SAE 4140 recozido, utilizando-se pastilhas de metal duro sinuosas com revestimento triplo. Foram realizados ensaios de usinagem em um torno mecânico universal, aplicando-se velocidades de 160m/min e 250m/min, avanços de corte de 0,100mm/rev e 0,316mm/rev para cada velocidade e profundidade de 1mm. A definição dos parâmetros se baseou nos diferentes mecanismos de desgaste que operam principalmente após o desgaste de flanco superior a 0,3mm. O desgaste da ferramenta foi avaliado através de um microscópio óptico e microscópio eletrônico de varredura (MEV) e a rugosidade dos corpos de prova medida com o auxílio de um rugosímetro. Foi possível constatar que os mecanismos de desgaste de adesão, abrasão e lascamento da superfície de flanco foram predominantes e que o desgaste que mais se destacou foi o da superfície de flanco secundária. Em relação a influência dos parâmetros de corte, a combinação da velocidade de corte a 160m/min e avanço, 0,100mm/rev gerou o menor desgaste de largura de flanco, 0,237 mm, enquanto o aumento da velocidade para 250m/min com mesmo avanço garantiu a menor rugosidade, 0,81 μm . O ensaio usando os parâmetros mais elevados levou a quebra da ferramenta em 1 minuto e 30 segundos.

Palavras-chave: Usinagem; Metal duro; Desgaste; Rugosidade.

ABSTRACT

The present work aims to find the best conditions for dry cylindrical external turning for an annealed SAE 4140 steel, using sinuous carbide inserts with triple coating. Machining tests were performed on a universal lathe, applying speeds of 160m / min and 250m / min, cutting feeds of 0.100mm / rev and 0.316mm / rev for each speed and depth of 1mm. The definition of parameters was based on the different wear mechanisms that operate mainly after flank wear greater than 0.3mm. Tool wear was assessed using an optical microscope and scanning electron microscope (SEM) and the roughness of the specimens was measured using a rugosimeter. It was possible to verify that the mechanisms of adhesion wear, abrasion and chipping of the flank surface were predominant and that the wear that stood out the most was that of the secondary flank surface. Regarding the influence of cutting parameters, the combination of cutting speed at 160m / min and feed, 0.100mm / rev generated the least flank width wear, 0.237mm, while increasing the speed to 250m / min with the same feed guaranteed the lowest roughness, 0.81 μm . The test using the highest parameters took the tool to break in 1 minute and 30 seconds.

Keywords: Machining; Hard metal; Wear; Roughness.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Parâmetros de corte e superfícies em torneamento cilíndrico.....	20
Figura 2 - Classificação do formato de cavaco segundo norma ISO 3685:2017.....	23
Figura 3 - Efeito do avanço e da profundidade de corte na forma dos cavacos.....	24
Figura 4 - Diagrama de dureza-tenacidade dos materiais de ferramentas de corte.....	27
Figura 5 - Materiais para ferramenta e tendência de suas propriedades.....	28
Figura 6 - Fixação rígida.....	29
Figura 7 - Representação do desgaste de flanco.....	32
Figura 8 - Representação do desgaste de cratera.....	33
Figura 9 - Representação do desgaste de entalhe.....	34
Figura 10 - Contribuição dos mecanismos de desgaste no desgaste total..	35
Figura 11 - Alguns tipos de desgaste e as variáveis de medição do desgaste em ferramentas de usinagem.....	37
Figura 12 - Comportamento do desgaste da ferramenta em função do tempo de corte.....	37
Figura 13 - VBc versus comprimento usinado.....	39
Figura 14 - Desgaste de flanco médio em função das velocidades de corte.....	41
Figura 15 - Emissão de resíduos de fluido de corte.....	43
Figura 16 - Representação dos efeitos externos e efeitos internos da superfície.....	45
Figura 17 - Textura de uma superfície mostrando efeitos de rugosidade (A), ondulações (B) e erro de forma (C).....	46
Figura 18 - Rugosidade Média (Ra).....	47
Figura 19 - Parâmetro de Rugosidade Ry.....	47
Figura 20 - Parâmetro de Rugosidade Rz.....	48
Figura 21 - Representação Rq.....	48
Figura 22 - Influência dos parâmetros de corte sobre a rugosidade Ra.....	51
Figura 23 - Representação Genérica da Pastilha modelo 4025.....	54
Figura 24 - Especificações Técnicas da Pastilha modelo 4025.....	55

Figura 25 - Fluxograma dos procedimentos experimentais.....	56
Figura 26 - Representação dos corpos de provas (escala em mm).....	57
Figura 27 - Representação de disposição da ferramenta de corte com relação ao corpo de prova.....	58
Figura 28 - Microestrutura do aço SAE 4140 laminado.....	60
Figura 29 - Microestrutura do aço SAE 4140 recozido.....	61
Figura 30 - Gráfico dos desgastes de flanco para o Ensaio 1.....	63
Figura 31 - Estado final da superfície de flanco principal – Ensaio 1 (desgaste 196,61 μ m).....	64
Figura 32 - Estado final da superfície de flanco secundária – Ensaio 1 (desgaste 237,29 μ m).....	64
Figura 33 - Gráfico dos desgastes de flanco para o Ensaio 2.....	66
Figura 34 - Estado final da superfície de flanco principal – Ensaio 2 (desgaste 183,05 μ m).....	67
Figura 35 - Estado final da superfície de flanco secundária – Ensaio 2 (desgaste 257,63 μ m).....	67
Figura 36 - Gráfico dos desgastes de flanco para o Ensaio 3.....	69
Figura 37 - Estado final da superfície de flanco principal – Ensaio 3 (desgaste 240,68 μ m).....	70
Figura 38 - Estado final da superfície de flanco secundária – Ensaio 3 (desgaste 403,39 μ m).....	70
Figura 39 - Antes e depois da superfície de flanco principal – Ensaio 4.....	71
Figura 40 - Antes e depois da superfície de flanco secundária – Ensaio 4..	71
Figura 41 - Antes e depois da ponta de ferramenta de corte – Ensaio 4.....	72
Figura 42 - Gráfico de comparação do desgaste de flanco principal.....	73
Figura 43 - Gráfico de comparação do desgaste do flanco secundário.....	73
Figura 44 - MEV do flanco principal para o Ensaio 1.....	75
Figura 45 - MEV do flanco secundário para o Ensaio 1.....	75
Figura 46 - BEC do flanco principal para o Ensaio 1.....	76
Figura 47 - BEC do flanco secundário para o Ensaio 1.....	77
Figura 48 - MEV do flanco principal para o Ensaio 2.....	78
Figura 49 - MEV do flanco secundário para o Ensaio 2.....	78
Figura 50 - BEC do flanco principal para o Ensaio 2.....	79

Figura 51 - BEC do flanco secundário para o Ensaio 2.....	79
Figura 52 - MEV do flanco principal para o Ensaio 3.....	80
Figura 53 - MEV do flanco secundário para o Ensaio 3.....	80
Figura 54 - BEC do flanco principal para o Ensaio 3.....	81
Figura 55 - BEC do flanco secundário para o Ensaio 3.....	81
Figura 56 - MEV do flanco principal para o Ensaio 4.....	82
Figura 57 - MEV do flanco secundário para o Ensaio 4.....	83
Figura 58 - MEV da ponta da ferramenta para o Ensaio 4.....	84
Figura 59 - Curvas de Rugosidade.....	85
Figura 60 - Primeira e última medição de rugosidade.....	86
Figura 61 - Cavaco produzido nos Ensaios 1 e 3.....	87
Figura 62 - Cavaco produzido no Ensaio 2.....	88
Figura 63 - Cavaco produzido no Ensaio 4.....	89

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Composição química do aço SAE 4140	54
Tabela 2 - Parâmetros de corte dos procedimentos experimentais.....	58
Tabela 3 - Combinação dos parâmetros.....	59
Tabela 4 - Espectometria SAE4140.....	60
Tabela 5 - Desgastes de flanco para o Ensaio 1.....	62
Tabela 6 - Desgastes de flanco para o Ensaio 2.....	65
Tabela 7 - Desgastes de flanco para o Ensaio 3.....	68

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
AISI	American Iron and Steel Institute (Instituto Americano do Ferro e do Aço)
<i>ap</i>	Profundidade de corte
CEME-SUL	Centro de Microscopia Eletrônica da Zona Sul
CNC	Comando Numérico Computadorizado
CVD	Chemical Vapor Deposition (Deposição Química de Vapor)
EDS	Sistema de Energia Dispersiva
<i>f</i>	Avanço de corte
FURG	Fundação Universidade Federal do Rio Grande
HV	Dureza Vickers
ISO	International Organization for Standardization (Organização Internacional de Padronização)
KF	Distância entre a cratera e o flanco
KT	Profundidade de cratera
MEV	Microscópio Eletrônico de Varredura
MQL	Mínima Quantidade de Lubrificante
NBR	Norma Brasileira
PVD	Physical Vapor Deposition (Deposição Física de Vapor)
Ra	Rugosidade média
Rq	Rugosidade média quadrática
Ry	Diferença entre o ponto mais alto e o ponto mais baixo do perfil de rugosidade
Rz	Média dos cinco maiores picos e maiores vales de um perfil de rugosidade
rev	Revolução
SAE	Society of Automotive Engineers (Sociedade de Engenheiros Automotivos)
VB	Desgaste de flanco médio
VBc	Desgaste de ponta da ferramenta

VBmáx	Desgaste de flanco máximo
Vc	Velocidade de corte

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	16
1.1. Objetivos	17
1.1.1. Objetivo Geral	17
1.1.2. Objetivos Específicos	17
2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	19
2.1. Processos de Usinagem	19
2.2. Torneamento	19
2.3. Mecanismo de Formação de Cavaco	21
2.4. Aço Recozido	25
2.4.1. SAE 4140	25
2.4.2. Tratamento Térmico de Recozimento	25
2.5. Materiais de Ferramentas de Corte	26
2.6. Desgaste da Ferramenta de Corte	32
2.7. Usinagem a seco	42
2.8. Integridade Superficial	44
3. MATERIAIS E MÉTODOS	54
3.1. Materiais	54
3.1.1. Aço SAE 4140	54
3.1.2. Pastilhas de metal duro	54
3.2. Equipamentos Utilizados	55
3.3. Metodologia	56
4. RESULTADOS E DISCUSSÕES	60
4.1. Análise química e metalográfica do material	60
4.2. Tratamento térmico de recozimento	61
4.3. Análise do desgaste da ferramenta de corte	62
4.3.1. Ensaio 1 - velocidade de corte 160 m/min e avanço 0,1 mm/rev	62
4.3.2. Ensaio 2 - velocidade de corte 160 m/min e avanço 0,316 mm/rev	65
4.3.3. Ensaio 3 - Velocidade de corte 250 m/min e avanço 0,1 mm/ver	68
4.3.4. Ensaio 4 - Velocidade de corte 250 m/min e avanço 0,316 mm/ver	71
4.3.5. Comparação dos desgastes	72
4.4. MEV	74
4.4.1. Análise com MEV - Ensaio 1	74
4.4.1. Análise com MEV – Ensaio 2	77

4.4.3. Análise com MEV – Ensaio 3.....	79
4.4.4. Análise com MEV – Ensaio 4.....	82
4.5. Análise de rugosidade.....	84
4.6. Análise do cavaco	87
5. CONCLUSÕES	90
6. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	91
7. REFERÊNCIAS	92
7.1. Referências Nominais	92
7.2. Referências por Estrato.....	99
7.3. Referências por Qualis.....	99
7.4. Referências por Datas dos Artigos.....	100

1. INTRODUÇÃO

Com as constantes inovações e os recentes avanços das máquinas ferramenta, mudanças significativas nas indústrias de manufatura tornaram-se cada vez mais necessárias, gerando uma busca permanente por melhorias nos processos de usinagem, objetivando a redução de custos e o aumento de produtividade (SOUSA et al, 2012).

As operações de usinagem dividem-se entre processos convencionais e não convencionais. Dentre os processos de usinagem convencionais, o que mais se destaca, devido ao seu uso amplamente difundido, é o torneamento mecânico (AMORIM, 2002).

O entendimento do processo de fabricação por usinagem passa pelo estudo de fenômenos de formação de cavaco, esforços de corte, qualidade superficial do material usinado, mecanismos de desgaste da ferramenta e da influência dos parâmetros de corte e do tipo de material sobre essas variáveis.

O aço trata-se de um material muito importante para o funcionamento da economia, uma vez que faz parte de diversas cadeias produtivas, sendo utilizado, principalmente, pelos setores industrial, civil e automobilístico (NAITZKE et al, 2019).

O SAE 4140 é um aço de baixa liga que alia resistência mecânica, média usinabilidade, baixa soldabilidade e temperabilidade elevada. Na indústria automotiva e agrícola, peças como eixos, pinos e virabrequins são obtidas, muitas vezes, através da usinagem do aço SAE 4140 na condição laminado a quente ou tratado termicamente (FERREIRA, 2011).

O metal duro é um dos materiais mais importantes para ferramentas utilizado na indústria moderna, devido a sua combinação de dureza à temperatura ambiente, dureza a quente, resistência ao desgaste e tenacidade (DINIZ et al, 2014). Trata-se de um produto da metalurgia do pó, designado usualmente como carboneto de tungstênio sinterizado. Seus constituintes fundamentais são intimamente misturados na forma de pós e submetidos a um processamento que resulta em um produto completamente consolidado, denso e com características que propiciam seu emprego em ferramentas de corte.

Os revestimentos ou coberturas das ferramentas de corte objetivam fortalecer a aresta de corte, aumentando a resistência ao desgaste, a lubricidade, o isolamento térmico e a resistência ao ataque químico, promovendo a redução do atrito e o

aumento da dureza superficial, aumentando a vida útil do inserto, diminuindo drasticamente os custos de manufatura e gerando um aumento significativo da produtividade.

Em usinagem, fluido de corte é aplicado para aumentar a produção, qualidade de superfície, reduzir custo e aumentar lucro. Atualmente, os benefícios da usinagem a seco são mais que economia de custos. A indústria de fluido de corte é muito sensível à questão ambiental e está reformulando novas composições que são ambientalmente mais amigáveis. É possível que fluido de corte seja, no futuro, utilizado mais seletivamente ou não utilizado completamente (TELES, 2007).

A realização deste estudo visa adquirir informações que proporcionem uma seleção econômica, tanto de material, quanto dos parâmetros de corte, que levem à diminuição de custos e a uma elevação na produtividade. Buscando-se otimizar os parâmetros para o torneamento cilíndrico externo e entender os mecanismos de desgaste das ferramentas de metal duro, na usinagem do aço SAE 4140 recozido, processo de grande importância no âmbito industrial.

1.1. Objetivos

1.1.1. Objetivo Geral

Este trabalho tem por objetivo geral realizar uma análise da influência dos parâmetros de corte no torneamento cilíndrico externo a seco do aço recozido SAE 4140, com ferramentas de metal-duro. Investigando, durante o processo, o desgaste da ferramenta de corte e a qualidade superficial da peça usinada.

1.1.2. Objetivos Específicos

A fim de alcançar o objetivo geral foram traçados os seguintes objetivos específicos:

- Analisar a influência da variação dos parâmetros de corte (velocidade de corte e avanço) para o torneamento cilíndrico externo a seco do aço recozido SAE 4140 com ferramenta de metal duro do tipo ISO P;
- Estudar o mecanismo de desgaste das ferramentas de metal duro utilizadas;
- Avaliar a vida das ferramentas utilizadas nos ensaios e sua relação com a variação dos parâmetros de corte e estado da ferramenta de corte;

- Avaliar a qualidade superficial das peças usinadas ao longo do tempo, de acordo com os diferentes parâmetros de corte;
- Analisar a influência dos parâmetros de corte no formato do cavaco produzido nos diferentes ensaios de torneamento.

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1. Processos de Usinagem

Entre os diversos tipos de processos de fabricação utilizados na indústria, um dos mais importantes é o processo de usinagem (ESPINDOLA, 2016).

Usinagem é um termo que abrange processos de fabricação por geração de superfícies através da retirada de material, conferindo dimensão e forma à peça. Segundo Ferraresi (2014), operações de usinagem conferem à peça a forma ou as dimensões ou o acabamento, ou ainda uma combinação qualquer destes três itens, produzindo cavaco.

Os processos de usinagem são amplamente utilizados na fabricação de componentes que requerem alta qualidade superficial e/ou grande precisão. Sendo a mais popular do mundo, dentre os processos de fabricação (LAURO et al., 2014).

As operações de usinagem dividem-se em processos de usinagem convencional e os processos especiais de usinagem. Dentre os processos de usinagem convencional também há uma classificação como processos de usinagem com ferramentas de geometria definida (torneamento, o fresamento e furação) e processos de usinagem com ferramentas sem geometria definida (retificação, polimento, tamboreamento).

De acordo com Silva et al. (2019), o torneamento é o processo de usinagem mais executado na indústria, por ser fácil de operar e economicamente viável, apresentando uma grande participação na fabricação de peças usinadas.

2.2. Torneamento

O torneamento é a operação de usinagem mais comumente empregada em trabalhos de corte de metal. E, segundo Uemura et al. (2017), trata-se de um processo que tem por objetivo obter superfícies de revolução, com auxílio de uma ou mais ferramentas monocortantes, através do movimento giratório da peça em torno do eixo principal de rotação da máquina, com deslocamento simultâneo da ferramenta, seguindo trajetória coplanar com o eixo da máquina. Onde a ferramenta é ajustada a uma certa profundidade de corte e, ao mesmo tempo em que a peça

gira, esta se desloca a uma determinada velocidade. Sendo o resultado desses movimentos, a formação do cavaco, que se move sobre a face da ferramenta.

Podemos destacar três características do torneamento que não ocorrem em muitos outros processos de usinagem:

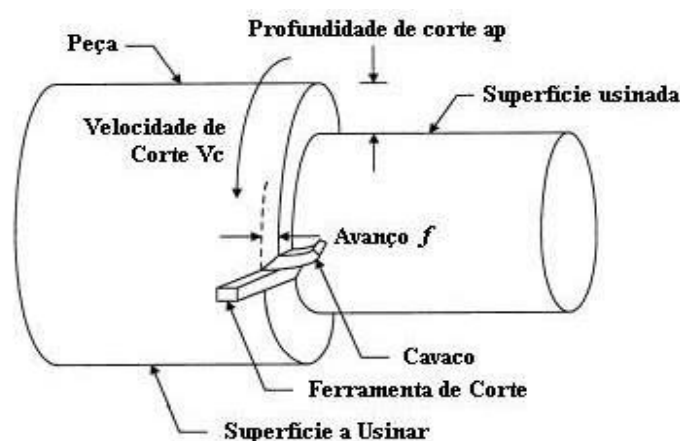
- O corte é normalmente contínuo;
- O corte pode ser descrito em coordenadas cilíndricas (coordenadas polares para a seção reta da peça em rotação e mais uma coordenada de profundidade para designar o movimento da ferramenta);
- Ocorrem, simultaneamente, movimentos da peça e da ferramenta (rotação da peça e translação da ferramenta).

Nos processos de torneamento, os parâmetros de corte e a geometria da aresta de corte determinam o resultado final do processo, independente de material de peça e ferramenta.

Entre os parâmetros de corte, a velocidade de corte (V_c) é a taxa na qual a superfície não cortada da peça passa pela aresta de corte da ferramenta, expressa normalmente em m/min. O avanço (f) é a distância percorrida pela ferramenta por revolução da peça, e a profundidade de corte (a_p) é a espessura ou profundidade de penetração da ferramenta medida perpendicularmente ao plano de trabalho, que é definido pelas direções de avanço e V_c da ferramenta.

A Figura 1 mostra as superfícies definidas sobre a peça e os parâmetros de corte presentes em um processo de torneamento cilíndrico externo.

Figura 1 - Parâmetros de corte e superfícies em torneamento cilíndrico externo



Fonte: Adaptado de Diniz et al., 2014.

De acordo com Davoodi e Tazehkandi (2014) os parâmetros de corte na usinagem de metais afetam diretamente a eficiência, a qualidade e o custo do processamento do produto e, portanto, a otimização dos parâmetros de corte tem sido uma grande preocupação.

Para Sheng et al. (2017), os parâmetros de corte estão intimamente relacionados às ferramentas (geometria e propriedades do material), equipamentos de usinagem e materiais da peça. Portanto, é muito difícil estabelecer um modelo de otimização em conformidade com as condições reais de usinagem. Assim como coordenar o controle do desgaste da ferramenta com outras metas, como qualidade da superfície usinada, precisão da peça usinada e tempo de produção, é uma questão fundamental na otimização do processo de corte.

2.3. Mecanismo de Formação de Cavaco

O cavaco é o principal ponto em comum entre os processos de usinagem, uma vez que representa o subproduto final presente em todos eles.

O estudo da formação de cavaco nos processos de usinagem é muito importante, uma vez que influencia diretamente em diversos fatores dos processos de usinagem, como no desgaste da ferramenta, nos esforços de corte, no calor gerado, na penetração do fluido de corte, entre outros, estando envolvidos diretamente com aspectos econômicos e de qualidade da peça.

Segundo Ferraresi (2014), as etapas de formação do cavaco, em condições normais de usinagem, com a utilização de ferramentas de metal duro ou de aço rápido, são:

- 1) Primeiramente, devido à penetração da ferramenta na peça, uma pequena quantidade de material é recalcada contra a superfície de saída da ferramenta;
- 2) Depois, o material recalcado sofre uma deformação plástica, que aumenta progressivamente até que as tensões de cisalhamento sejam grandes o suficiente para que se inicie um deslizamento entre a porção recalcada e a peça;
- 3) Ao continuar a penetração da ferramenta, ocorrerá uma ruptura parcial ou completa na região de cisalhamento, de acordo com a ductilidade do material e das condições de usinagem, uma vez que para os materiais

altamente deformáveis, o cavaco gerado é contínuo (ruptura parcial) e para os materiais frágeis, se origina o cavaco de ruptura ou de cisalhamento (ruptura completa);

- 4) Seguindo, devido ao movimento relativo entre a ferramenta e a peça, inicia-se um escorregamento da porção de material deformada e cisalhada (cavaco) sobre a superfície de saída da ferramenta. Enquanto isso ocorre, uma nova porção de material forma-se e cisalha-se, escorregando também sobre a superfície de saída, repetindo-se o fenômeno.

Ferraresi (2014) afirma que, tanto na literatura alemã como na americana, os cavacos são subdivididos em 3 tipos, sendo eles:

1. Cavaco Contínuo: Constituído de lamelas justapostas em uma disposição contínua e agrupadas em grupos lamelares sendo a lamela uma camada de material de cavaco, constituída pelos grãos cristalinos deformados. Ocorre na usinagem de materiais dúcteis e homogêneos, com pequeno e médio avanço, com velocidade de corte geralmente acima de 60m/min.
2. Cavaco de Cisalhamento: Constituído de grupos lamelares bem distintos e justapostos, esses elementos de cavaco são cisalhados e parcialmente soldados em seguida. Este tipo de cavaco forma-se quando há diminuição da resistência do material no plano de cisalhamento, devido ao aumento de deformação, à heterogeneidade da estrutura metalográfica, ou às vibrações externas, que resultam em variações da espessura do cavaco. Podendo também ser formado ao empregar grandes avanços e velocidades de corte inferiores a 100m/min.
3. Cavaco de Ruptura: Constituído de fragmentos arrancados da peça usinada, havendo uma ruptura completa do material em grupos lamelares que permanecem separados. Costuma formar-se na usinagem de materiais frágeis ou de estrutura heterogênea, tais como ferro fundido ou latão.

O controle do tipo de cavaco produzido é de extrema importância. O cavaco contínuo, por exemplo, além de oferecer perigo ao operador, pode emaranhar-se ao redor da peça ou ferramenta, dificultando a operação e tornando a superfície usinada menos atrativa (AMORIM, 2002).

Os cavacos de cisalhamento e contínuos podem ser classificados quanto à sua forma geométrica, como: em fita, helicoidais, em espiral, em lascas ou pedaços. Na norma ABNT NBR ISO 3685 (2017) há a classificação detalhada das formas dos cavacos (Figura 2).

Figura 2 - Classificação do formato de cavaco segundo norma ISO 3685:2017

1 - Cavaco em fita	2 - Cavaco tubular	3 - Cavaco espiral	4 - Cavaco hel. tipo arruela	5 - Cavaco hel. cônico	6 - Cavaco em arco	7 - Cavaco fragmentado	8 - Cavaco tipo agulha
1-1 - Longo	2-1 - Longo	3-1 - Plano	4-1 - Longo	5-1 - Longo	6-1 - Conect.		
1-2 - Curto	2-2 - Curto	3-2 - Cônico	4-2 - Curto	5-2 - Curto	6-2 - Solto		
1-3 - Emaranhado	2-3 - Emaranhado		4-3 - Emaranhado	5-3 - Emaranhado			

Fonte: ABNT NBR ISO 3685:2017.

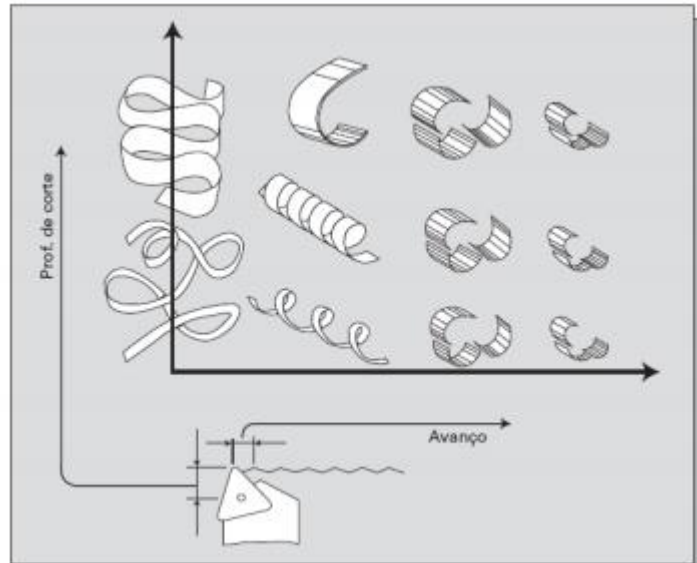
Segundo Ferraresi (2014), algumas formas de cavaco podem dificultar a operação de usinagem e prejudicar o acabamento superficial. O cavaco em fita, por exemplo, pode provocar acidentes, além de ocupar muito espaço e ser de difícil transporte. Já o cavaco helicoidal é considerado a forma de cavaco mais conveniente, enquanto o cavaco em lascas é preferido somente quando há pouco espaço disponível, ou quando se pretende remover o cavaco por meio do fluido refrigerante.

Ferraresi (2014) afirma que o material da peça é o principal fator influenciador na classificação quanto à forma dos cavacos e que quanto maior a velocidade de corte, maior a tendência a produzir cavaco em fita ou contínuo. Menciona também

que o avanço é o parâmetro mais influente e que a profundidade de corte é o que menos influencia na forma de cavacos.

Segundo Machado et al. (2009), os parâmetros de corte que mais influenciam na forma do cavaco é o avanço, seguido da profundidade de corte. A Figura 3 mostra como esses dois parâmetros afetam a formação do cavaco.

Figura 3 - Efeito do avanço e da profundidade de corte na forma dos cavacos



Fonte: Machado et al., 2009.

Reis et al. (2019), ao estudarem o torneamento de um aço ABNT 4340, observaram que o aumento do avanço causou alteração na forma do cavaco, para os dois tipos de material da ferramenta e geometrias de quebra-cavaco estudados. E, comparando-se a espessura do cavaco e o avanço, observaram que quanto menor o valor do avanço, menor foi a espessura do cavaco, e quanto maior a espessura do cavaco, maior a sua fragmentação.

Santana (2011) observou em seu trabalho que com avanço (f) de 0,2 mm/rev, o cavaco apresentou formato espiral, com comprimento inferior a 15 mm e com uma cor mais clara (cinza), que é considerado um bom cavaco para um processo e usinagem. Com o aumento do avanço para 0,25 mm/rev, o cavaco continuou no formato de espiral, mas com um comprimento superior a 15 mm, considerado inadequado. E já com o avanço de 0,3 mm/rev, o cavaco apresentou formato em lascas, considerado o ideal, mas com uma cor escura, mostrando o processo atingiu altas temperaturas na zona de corte, entre a ferramenta e a peça.

Também em relação à coloração do cavaco no processo de torneamento, Reis et. al. (2019) analisaram em seu trabalho que os cavacos provenientes de avanço igual a 0,16 mm/rev apresentaram coloração azul que, segundo os autores, está relacionada a uma fina camada de óxido que é formada poucos segundos após a constituição do cavaco na presença de maiores temperaturas.

2.4. Aço Recozido

2.4.1. SAE 4140

O SAE 4140 trata-se de um aço para beneficiamento com médio-carbono, baixa-liga, que contém cromo e molibdênio em sua composição, o que lhe confere uma boa resistência mecânica a um custo relativamente baixo. Este aço costuma ser utilizado na fabricação de diferentes componentes mecânicos, como eixos, pinos, bielas e virabrequins, de alguns tipos de matrizes simples e de moldes e porta moldes para conformação.

O aço SAE 4140 possui uma boa combinação de resistência mecânica, resistência à fratura e elevada resistência à fadiga.

No torneamento de um aço SAE 4140, a máxima vida da ferramenta corresponde ao estado recozido ou normalizado desse aço (estrutura majoritariamente perlítica) (FAVORIT, 2006).

2.4.2. Tratamento Térmico de Recozimento

Entende-se por tratamento térmico o conjunto de operações de aquecimento e resfriamento a que são submetidos os aços, sob condições controladas de temperatura, tempo, atmosfera e velocidade de aquecimento e resfriamento, que tem por objetivo alterar as suas propriedades ou conferir-lhes características determinadas (TEDESCO, 2007).

O processo de recozimento consiste em um tratamento térmico caracterizado por um resfriamento lento através da zona crítica, a partir da temperatura de austenitização. Sendo normalmente utilizado para aços hipoeutetóides, ou seja, aços que apresentam valores menores de 0,5% de carbono em sua composição, este tratamento tem como objetivo diminuir a resistência mecânica do aço e aumentar sua ductilidade, aumentando, assim, a sua capacidade de deformação a frio e também causando melhora significativa em sua usinabilidade. A microestrutura

final formada nesse tipo de tratamento térmico é a perlita grosseira, de baixa dureza e, mesmo com o resfriamento lento, realizado ao forno, outras estruturas poderão também ser formadas, como a perlita fina e até mesmo a bainita (GALVÃO et al., 2015).

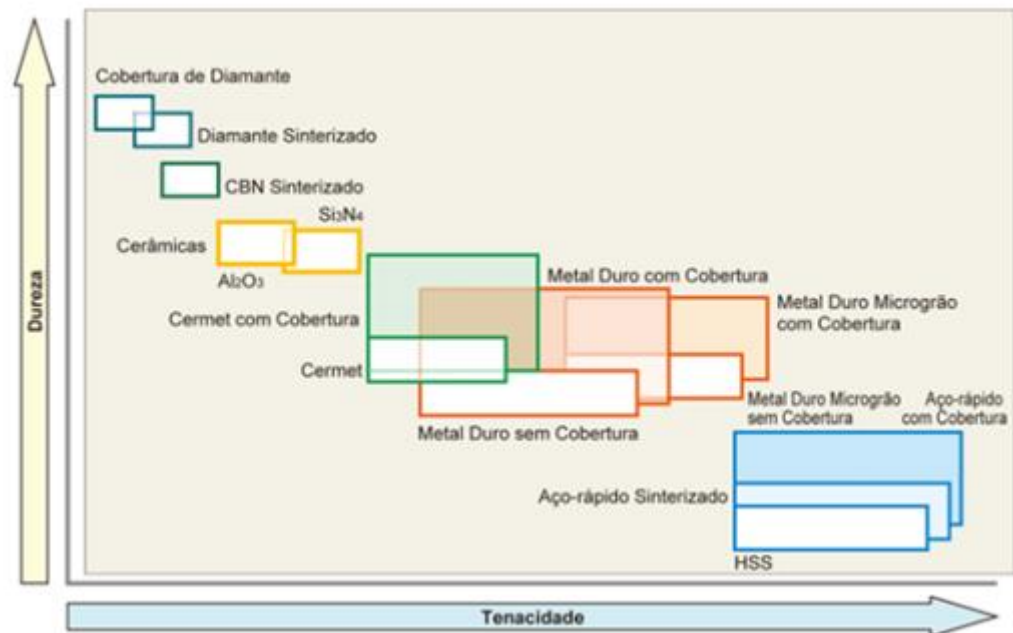
2.5. Materiais de Ferramentas de Corte

Os processos de usinagem convencional em geral baseiam-se no corte de uma peça utilizando-se uma ferramenta de corte, que deve ter dureza maior do que a peça a ser usinada.

O maior desafio no desenvolvimento de ferramentas de corte está exatamente no balanço entre a dureza e a tenacidade, visto que são duas propriedades de extrema importância para o desempenho da ferramenta de corte e que não são facilmente encontradas em um mesmo material. Atualmente, consegue-se boas combinações de dureza e tenacidade, tanto em materiais de ferramenta puros quanto nos revestidos. As ferramentas revestidas buscam o equilíbrio entre as propriedades necessárias através do uso de um material base, que confere propriedades de tenacidade e alguma dureza, e um revestimento, com alta dureza, resistência a abrasão e inércia química (AMORIM, 2002).

Como, geralmente, dureza e tenacidade são duas propriedades antagônicas (alta dureza se associa a baixa tenacidade e vice-versa), o balanço destas propriedades nos materiais de ferramentas de corte se tornou um desafio para o fabricante. A Figura 4 mostra o comportamento de cada material em relação a estas propriedades. A conciliação destas foi conseguida com a produção de ferramentas com diferentes composições químicas, refinamento de grãos, controle dos processos de fabricação e do tratamento térmico, o que lhes confere graus compatíveis de pureza e qualidade (POLLY, 2019)

Figura 4 - Diagrama de dureza-tenacidade dos materiais de ferramentas de corte



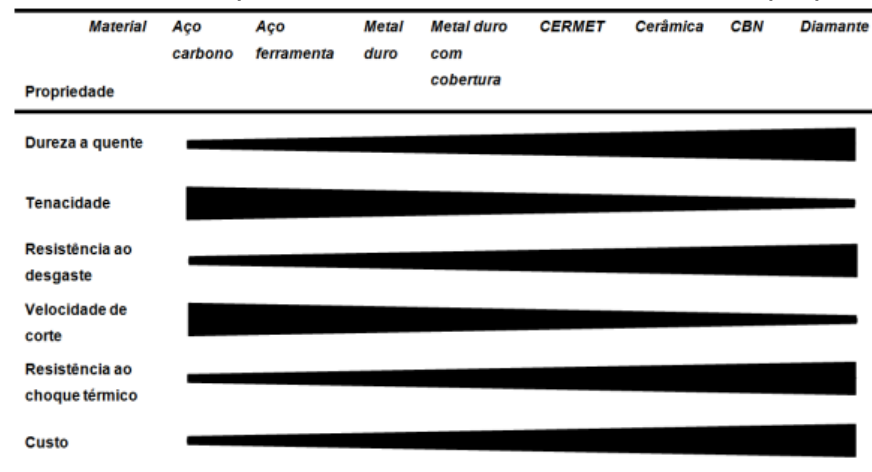
Fonte: Polly, 2019.

Segundo Pervaiz et al.(2014), o material da ferramenta de corte é o parâmetro mais básico que influencia a usinabilidade, não sendo possível conduzir eficientemente um processo de usinagem se o mesmo não for apropriado, mesmo que outros fatores sejam cuidadosamente monitorados.

Historicamente, duas categorias de materiais são as mais utilizadas na usinagem: os aços rápidos e os metais duros. Isso se deve ao fato desses materiais proporcionarem uma ótima relação de custo/benefício, uma vez que, embora não permitam as maiores velocidades de usinagem, permitem rendimentos satisfatórios perante o seu valor de mercado.

Segundo Machado e Silva (2004), as propriedades mais significativas dos materiais das ferramentas de corte são a dureza/resistência ao desgaste e a tenacidade, fatores estes muito significativos nas pastilhas de metal duro, motivação para estes ensaios de pesquisa.

Na Figura 5, pode-se analisar a relação de tendência a algumas características de materiais utilizados para ferramenta de corte, onde nota-se uma combinação de parâmetros desejáveis, quando se trata do metal duro.

Figura 5 – Materiais para ferramenta e tendência de suas propriedades.

Fonte: Adaptado de Machado e Silva, 2004.

Metal duro é o nome dado a um compósito de carboneto de tungstênio, desenvolvido na Alemanha em 1923 por Karl Schröter, frente à necessidade, na época, de materiais com alta resistência ao desgaste, alta dureza e boa tenacidade (AMANCIO, 2018).

O metal duro é o material para ferramentas mais utilizado na indústria, devido à combinação de dureza à temperatura ambiente, dureza a quente, resistência ao desgaste e tenacidade, obtida através de uma variação da composição química (DINIZ et al., 2014). Uma característica importante do metal duro é o coeficiente de dilatação térmica que tem um valor duas vezes menor se comparado com o aço em temperaturas ambiente e até 675°C.

O metal duro é um compósito que consiste em uma fase dura, que possui alta dureza e resistência mecânica, e uma fase ligante, que confere tenacidade e plasticidade ao material (TORRES & SCHAEFFER, 2009). Trata-se de um produto resultante da metalurgia do pó, formado basicamente por dois constituintes:

- **Carbonetos de Tungstênio:** extremamente duro e de alta resistência ao desgaste, podendo ser associados a outros carbonetos como os de titânio (TiC), de tântalo (TaC) e nióbio (NbC) que conferem dureza a temperatura ambiente e sua retenção a altas temperaturas.
- **Elemento aglomerante:** trata-se de um metal do grupo do ferro, usualmente o cobalto, cuja função é aglomerar as partículas dos carbonetos, sendo

responsável pela tenacidade do material. A diminuição da percentagem de cobalto aumenta a dureza a quente do material.

Segundo Hulsendeger (2017), o Carboneto de Tungstênio é um dos mais importantes parâmetros para se ajustar a relação dureza/tenacidade do inserto de uma determinada classe de ferramentas de metal duro. Para um mesmo teor do ligante, quanto mais fino o grão da ferramenta, maior será a sua dureza, e, assim, menor a tenacidade. Já a quantidade de ligante irá controlar a resistência e tenacidade da classe em relação à deformação plástica. Para um mesmo tamanho de grão, quanto maior a quantidade de ligante, mais tenaz será a ferramenta. No entanto, um teor de ligante muito baixo pode resultar em um material quebradiço.

O metal duro é utilizado, normalmente, na forma de pastilhas intercambiáveis (insertos) com fixação mecânica sobre um suporte (Figura 6).



Fonte: Sandvik, 2005.

De acordo com a composição e aplicações, o metal duro é classificado em seis classes:

- **Classe P:** constituídos de metais duros de elevado teor de carboneto de titânio e de tântalo, conferindo, assim, resistência ao desgaste e elevada dureza a quente. Esta classe é indicada para usinagem de materiais que produzem cavacos contínuos: aços, ferro fundido maleável e materiais dúcteis em geral.

- **Classe M:** possui propriedades intermediárias sendo destinado às ferramentas com várias aplicações. Esta classe é indicada para usinagem de metais

e ligas ferrosas que apresentam cavacos tanto longos como curtos, como exemplo o aço inoxidável.

- **Classe K:** composto de carbonetos de tungstênio aglomerados pelo cobalto. Esta classe é indicada para usinagem de metais e ligas ferrosas que apresentam cavacos curtos, de ruptura e materiais não-metálicos: ferro fundido, aços temperados, metais não ferrosos (cobre, latão), plásticos e madeira. Este tipo de metal duro não é resistente ao mecanismo que gera o desgaste de cratera ao usinar os ferrosos.

- **Classe N:** classe do metal duro que combina excelente resistência ao desgaste por abrasão. Recomendada para metais não ferrosos e não metálicos.

- **Classe S:** classe de metal duro que combina boa resistência à deformação plástica, boa resistência ao desgaste por abrasão, tenacidade e boa resistência a altas temperaturas. Pode trabalhar tanto em altas como em baixas velocidades de corte. Recomendada para superligas resistentes ao calor, incluindo ligas de titânio.

- **Classe H:** classe de metal duro que combina boa resistência ao desgaste por abrasão e tenacidade para torneamento de materiais endurecidos em baixas velocidades.

De acordo com Diniz *et al.* (2014), as ferramentas de metal duro podem usinar qualquer tipo de material, desde que este não ultrapasse a dureza de 45 HRC. Nas operações de usinagem como torneamento, as ferramentas de metal duro podem trabalhar com velocidades de corte bem maiores, se comparadas com velocidades de corte de uma ferramenta de aço rápido. No entanto, há uma exigência de máquinas com maiores velocidades e maior rigidez para prevenir vibrações, já que o metal duro possui uma tenacidade menor, se comparado com o aço rápido, podendo, assim, chegar a uma avaria em um curto espaço de tempo de uso. Para melhorar as propriedades mecânicas das ferramentas de metal duro foram desenvolvidas coberturas, que aumentam a resistência ao desgaste da camada superior que entra em contato com o cavaco e com a peça.

Atualmente, grande parte das ferramentas de metal duro comercializadas apresenta de uma a três coberturas para melhorar o desempenho de usinagem. Os tipos mais comuns dessas coberturas são o carboneto de titânio (TiC), o carbonitreto de titânio (TiCN), o nitreto de titânio (TiN) e o óxido de alumínio (Al_2O_3). Geralmente,

a primeira camada de cobertura, logo acima do núcleo, é a de carboneto ou carbonitreto de titânio, que algumas vezes é a única camada de cobertura.

Essas camadas são aplicadas utilizando-se o processo CVD (deposição química a vapor). Por exemplo, para a deposição de uma camada de TiC, vaporiza-se uma mistura de tetracloreto de titânio ($TiCl_4$) e metano (CH_4). Essa mistura é colocada em um forno com atmosfera protetora de hidrogênio, temperatura da ordem de 1000°C e pressão levemente negativa, onde se encontram as pastilhas de metal duro que receberão o recobrimento.

O uso de coberturas nas pastilhas de metal duro proporciona maior resistência mecânica a quente, melhor estabilidade química, menor coeficiente de condutividade térmica e menor porosidade. Isso permite que o núcleo da ferramenta continue com a mesma tenacidade, diminuindo a probabilidade de falhas catastróficas (DINIZ et al., 2014).

As principais características de cada uma das camadas de cobertura das pastilhas de metal duro, segundo Diniz et al. (2014), são:

- Carboneto de Titânio (TiC) e Carbonitreto de Titânio (TiCN) : apresentam excelente resistência ao desgaste por abrasão, além de funcionarem como elemento de adesão das camadas de cobertura com o metal duro do núcleo, uma vez que não se consegue uma forte adesão entre o óxido de alumínio e o substrato de metal duro, devido a diferença entre os coeficientes de dilatação térmica desses 2 materiais.

- Óxido de Alumínio (Al_2O_3): garante a estabilidade térmica necessária a altas temperaturas, devido ao fato de possuir baixa condutividade térmica e alta dureza a quente. Apresenta também alta resistência ao desgaste por abrasão, alta resistência à oxidação e alta estabilidade química na presença do ferro. Esta cama é a principal responsável pela baixa tendência de formação de desgaste de cratera das ferramentas de metal duro recobertas.

- Nitreto de Titânio (TiN): reduz o coeficiente de atrito entre a pastilha e o cavaco, além de ser quimicamente mais estável que o carboneto de titânio, apresentando menor tendência à difusão com aços.

A espessura total das camadas que recobrem o metal duro varia entre 2 e 12 μm . Aumentando-se a espessura de cobertura, aumenta-se a resistência ao desgaste, porém a tenacidade diminui e aumenta a tendência ao lascamento das arestas da pastilha (DINIZ et al., 2014).

2.6. Desgaste da Ferramenta de Corte

Segundo Amorim (2002), em um processo de usinagem existe duas causas que levam à substituição da ferramenta de corte:

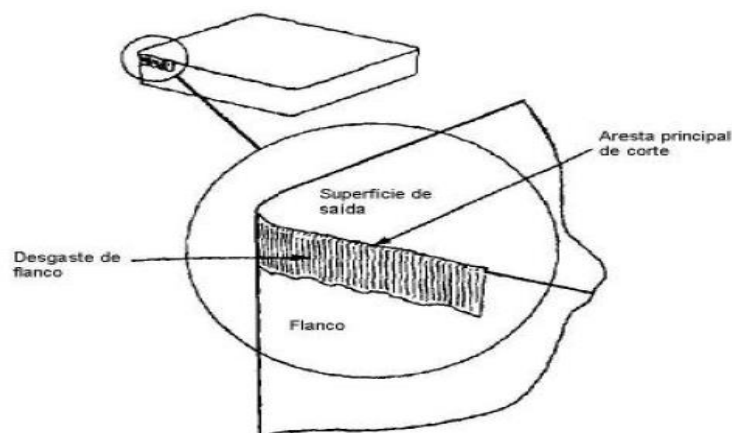
- Avarias, ou falhas catastróficas, como o lasqueamento, o trincamento ou até mesmo a quebra da ferramenta e;
- Desgaste excessivo, de modo que comprometa as condições de corte e a qualidade da peça usinada.

As avarias e falhas catastróficas costumam ocorrer devido a choques térmicos e mecânicos, em processos de corte interrompido, enquanto o desgaste pode ser resultante de diversos mecanismos diferente, tanto em cortes contínuos, quanto em cortes interrompidos.

Existem 3 tipos principais de desgastes de ferramenta, são eles: o desgaste de flanco, o desgaste de cratera, e o desgaste de entalhe.

O desgaste de flanco, Figura 7, é o tipo mais comum de desgaste e ocorre nas superfícies de folga da ferramenta. Dá-se devido à abrasão causada por constituintes duros no material da peça, sendo incentivado pelo aumento da velocidade de corte. Este interfere diretamente na qualidade superficial da peça e nas suas especificações dimensionais.

Figura 7 – Representação do desgaste de flanco



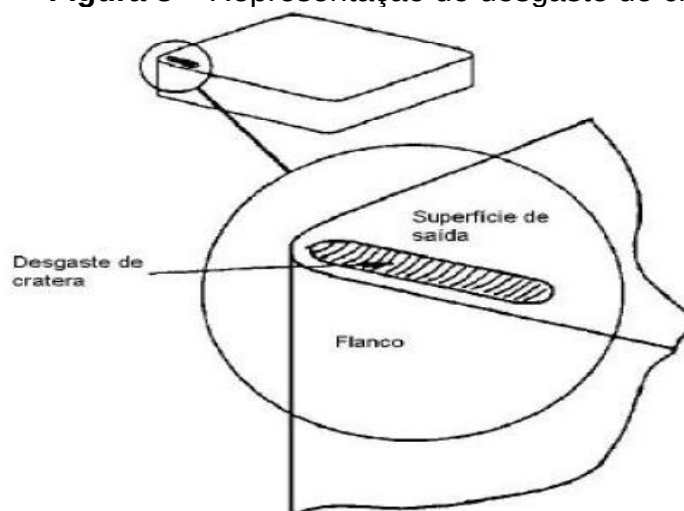
Fonte: Amorim, 2002.

Esse mecanismo de desgaste limita a ferramenta de corte, causando a perda de material cortante e, por isso, é normalmente adotado como critério de fim de vida (LIMA, 2012).

Todo processo de usinagem causa desgaste de flanco, resultando em piora do acabamento superficial e perda das características dimensionais da peça. Este desgaste tende a aumentar em velocidades de corte mais altas. (SANTOS & SALES, 2014)

O desgaste de cratera, Figura 8, ocorre na superfície de saída da ferramenta, onde localiza-se a zona de deslizamento do cavaco durante o corte. É causado por uma combinação entre os mecanismos de desgaste por abrasão e por difusão. Acontece em altas velocidades de corte, devido à elevação da temperatura.

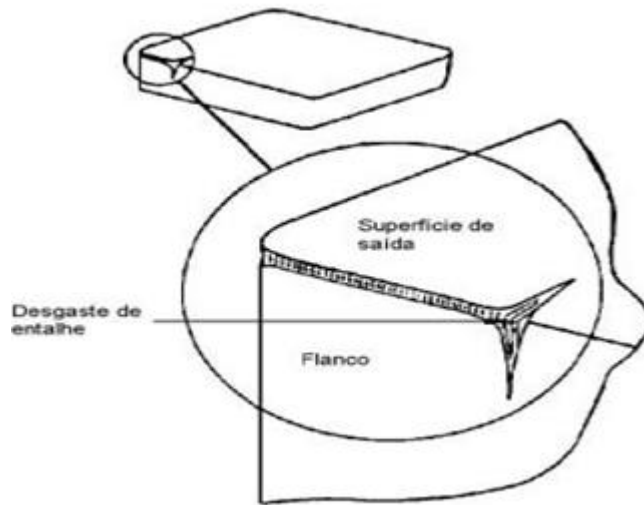
Figura 8 – Representação do desgaste de cratera



Fonte: Amorim, 2002.

O desgaste de entalhe, Figura 9, é caracterizado pelo dano excessivo localizado na face e no flanco da ferramenta, na linha da profundidade de corte. É causado pela adesão de material e deformação na superfície. Acontece mais comumente na usinagem de aços inoxidáveis.

Figura 9 – Representação do desgaste de entalhe



Fonte: Amorim, 2002.

Para entender como resolver o problema de desgaste de um material/componente, é essencial saber quais são os mecanismos de desgaste existentes e como eles funcionam. Segundo Neves (2017), os principais mecanismos de desgaste são:

- **Adesão / aresta postiça de corte:** a baixas temperaturas de corte, pode ocorrer o fenômeno de formação de um extrato metálico entre duas superfícies em contato, onde ocorre a “migração” de partículas de uma superfície para a outra. Este mecanismo contribui na formação do desgaste de entalhe e pode ser minimizado pelo uso adequado de lubrificação e pelo uso de materiais de ferramenta com baixo coeficiente de atrito.

- **Abrasão:** gerado pelo atrito entre as superfícies em contato. Costuma ocorrer no desgaste de flanco e de cratera, sendo mais proeminente no desgaste de flanco, já que a superfície de folga atrita com um elemento rígido (peça).

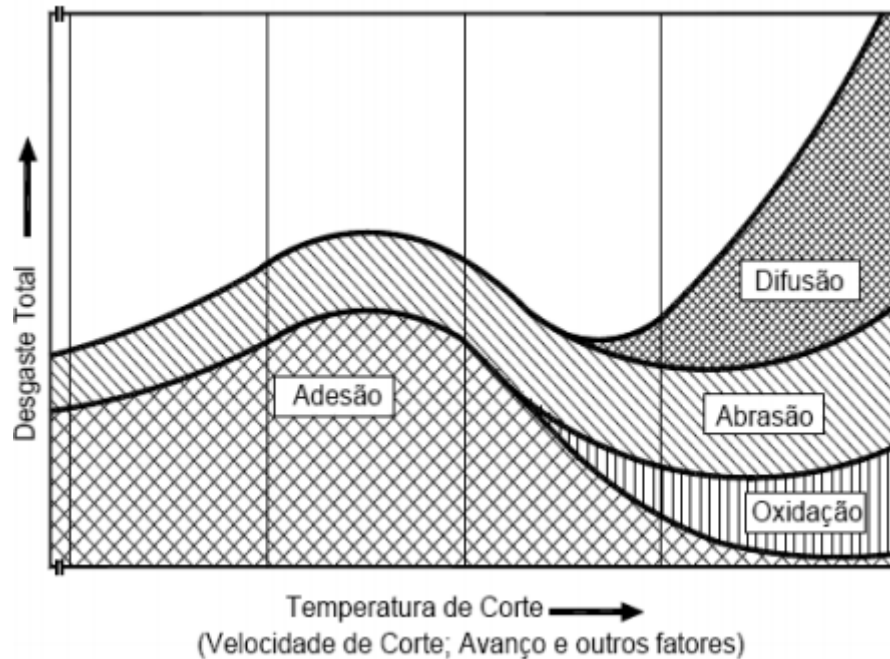
- **Difusão:** fenômeno microscópico que consiste na transferência de átomos de um metal para o outro, ativada pela temperatura de corte e pela afinidade físico-química dos dois metais envolvidos. Ocorre principalmente na superfície de saída devido às altas temperaturas, sendo o principal mecanismo para formação do desgaste de cratera.

- **Oxidação:** fenômeno que ocorre a altas temperaturas e na presença de ar e água (contida no fluido de corte). Provoca a formação de óxidos porosos na

superfície da ferramenta, que são facilmente levados pelo atrito. Este se forma especialmente nas extremidades do cavaco, devido ao acesso do ar/fluido nesta região, sendo fundamental para o desgaste de entalhe.

Na Figura 10 é possível ver a contribuição de cada mecanismo de desgaste no desgaste total, de acordo com o aumento da temperatura de corte.

Figura 10 – Contribuição dos mecanismos de desgaste no desgaste total



Fonte: Neves, 2017.

O desgaste da ferramenta de corte pode ser avaliado através de métodos de medição diretos e indiretos. No método direto, o desgaste da ferramenta pode ser avaliado das seguintes formas:

- Inspeção visual com comparações de padrões, através da utilização de lupas;
- Medição mecânica, com a utilização de paquímetros, micrômetros, entre outros;
- Medição óptica, utilizando microscópios de ferramentas e;
- Medição óptica/eletrônica, com o uso de câmeras CCD.

Já o método de medição indireta utiliza a aquisição de valores medidos de variáveis do processo (tais como a força de corte, temperatura, vibração, emissão acústica) e da relação entre o desgaste da ferramenta e esses parâmetros de processo.

Testar a vida da ferramenta envolve a consideração de variáveis numerosas tais como o material, geometria e revestimento da ferramenta, característica do material da peça, condições de corte, o tipo e a modalidade de aplicação do fluido de corte, as características dinâmicas da ferramenta, da máquina e dos dispositivos elétricos da ferramenta/peça, etc.

As falhas da ferramenta de corte (desgaste e ruptura) representam aproximadamente 20% da vida de uma ferramenta na máquina. O desgaste da ferramenta atua diretamente na qualidade da superfície da peça, na sua precisão dimensional e, finalmente, no custo do produto final.

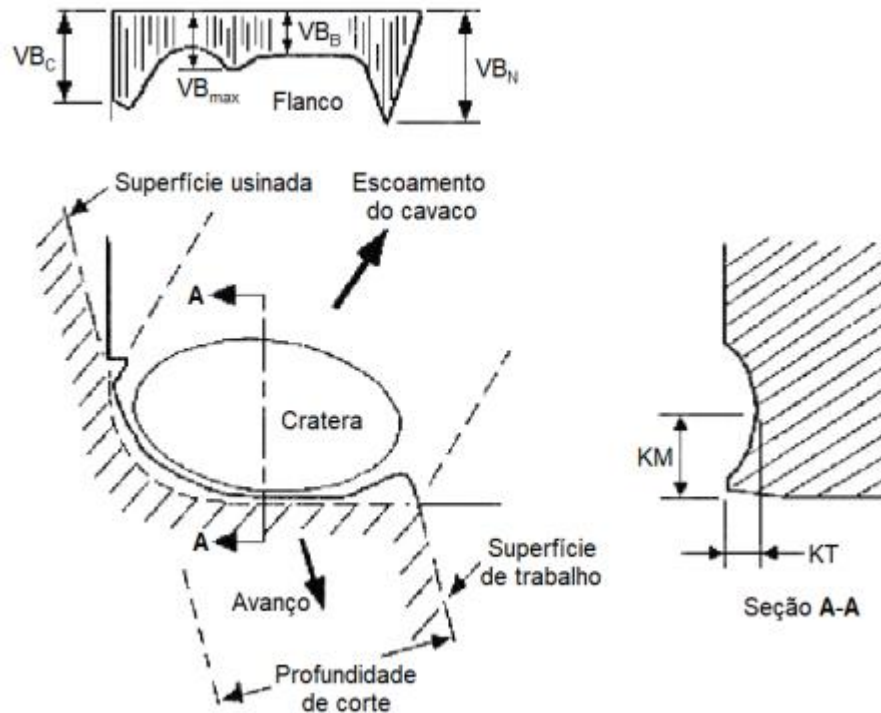
Devido ao desgaste progressivo da ferramenta de corte, é necessário, a fim de evitar danos por falhas catastróficas e gastos excessivos por operação inadequada da máquina operatriz, que se defina o limite de vida da ferramenta, que é quando esta começa a perder suas características operacionais e deve ser reafiada ou substituída (AMORIM, 2002).

A forma mais usual de determinar o fim da vida da ferramenta é pela norma ISO 3685 (2017), que estabelece ensaios de usinabilidade para determinar o período de tempo em que uma ferramenta pode trabalhar até que seja necessária sua substituição, e este período é definido como “tempo de vida da ferramenta de corte” e é determinado através do tempo de trabalho necessário para que ocorra um defeito crítico na ferramenta.

Segundo a norma ISO 3685 (2017), os critérios de fim de vida que devem ser adotados para ferramentas de metal duro (Figura 11) são:

- Desgaste de flanco médio, $VB = 0,3\text{mm}$;
- Desgaste de flanco máximo, $VB_{\text{máx}} = 0,6\text{mm}$;
- Profundidade de cratera, $KT = 0,06 + 0,3f$, onde f representa o avanço em mm/ver;
- Distância frontal entre cratera e flanco, $KF = 0,02\text{mm}$;
- Falha catastrófica.

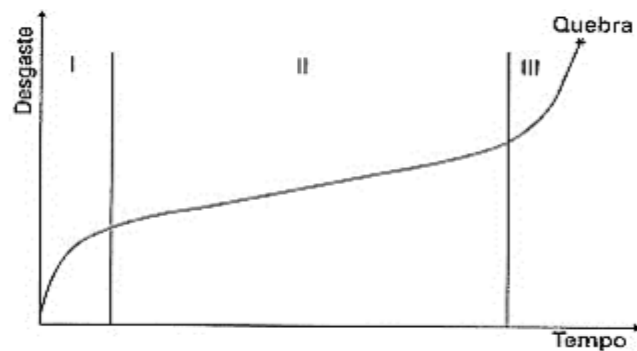
Figura 11 - Alguns tipos de desgaste e as variáveis de medição do desgaste em ferramentas de usinagem.



Fonte: Norma ISO 3685, 2017.

De acordo com Machado et al (2009), normalmente, as arestas de corte se desgastam seguindo uma curva característica, que está representada na Figura 12. Na ordenada, o desgaste pode ser representado por qualquer um dos parâmetros anteriormente citados.

Figura 12 – Comportamento do desgaste da ferramenta em função do tempo de corte



Fonte: Machado et. al., 2009.

Na evolução do desgaste, podem-se distinguir três estágios:

- Estágio I: no início do corte, o desgaste aumenta rapidamente devido à adequação ao sistema tribológico envolvido (acomodação da cunha cortante).
- Estágio II: o desgaste se estabiliza e se mantém linear até perto de seu fim de vida; a ferramenta encontra-se totalmente adequada ao processo e os mecanismos de desgaste operam constantemente.
- Estágio III: o desgaste aumenta de forma acelerada e promove a quebra da ferramenta em um curto espaço de tempo. Isto acontece porque o desgaste atingiu níveis tão elevados que as temperaturas e as tensões envolvidas poderão promover o colapso da ferramenta.

Corrêa et al. (2017) estudaram os mecanismos de desgaste presentes nas superfícies de ferramentas de metal duro revestidos com TiC / TiCN / TiN por CVD. Foram investigados durante o torneamento de dois aços inoxidáveis, o S41000 (martensítico) e o S41426 (supermartensítico). Os testes de vida útil da ferramenta foram realizados sob várias condições de corte. O desgaste do flanco foi monitorado em todos os testes e, no final, os mecanismos de desgaste foram investigados usando um microscópio eletrônico de varredura (MEV) equipado com EDS. Os resultados mostraram que, em altas velocidades de corte e alta profundidade de corte, o aço inoxidável supermartensítico apresentou uma vida útil mais curta do que o aço inoxidável martensítico. Na usinagem do aço inoxidável martensítico, a abrasão e difusão foram os mecanismos de desgaste predominantes, enquanto para o aço inoxidável supermartensítico, o atrito e abrasão foram dominantes.

Em seu trabalho, Gong et al. (2017) investigaram os padrões de falha da ferramenta de metal duro revestido através do faceamento a alta velocidade do aço temperado SKD11. A morfologia da falha na superfície da ferramenta, a força de corte e a rugosidade da superfície usinada também foram analisadas para revelar os mecanismos de falha. Os resultados indicaram que o padrão de falha dominante da ferramenta de metal duro revestido foi quebra, sendo o principal mecanismo de quebra da ferramenta a fratura por fadiga.

Rosa et al. (2017) analisaram o desgaste de ferramentas de metal duro com revestimento ultrafino em torneamento rígido de aço inoxidável AISI 420C, usado em ferramentas cirúrgicas e dentais, devido às suas propriedades mecânicas, aliadas a resistência à corrosão. Testes de vida da ferramenta foram realizados com diferentes níveis de velocidade de avanço e velocidade de corte, sendo

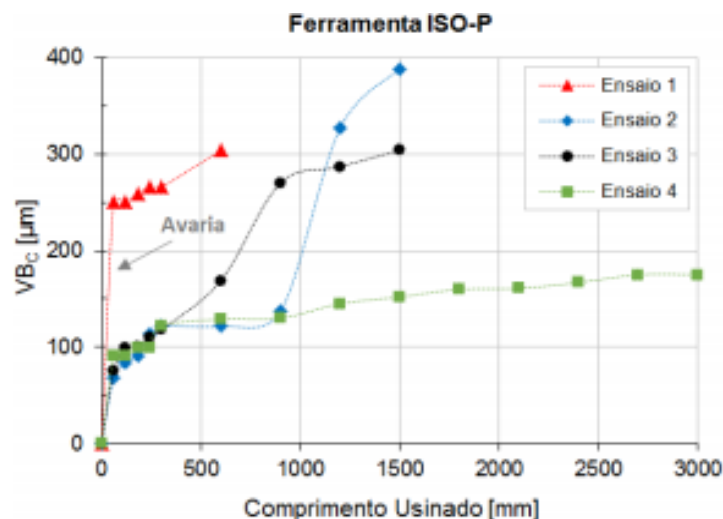
periodicamente interrompidos para avaliar o desgaste do flanco. Os experimentos indicaram a influência da velocidade de corte e da taxa de avanço em relação à vida útil da ferramenta.

Santana (2011) realizou em seu trabalho um estudo dos parâmetros de usinagem do aço SAE 4140 no torneamento CNC e observou que o parâmetro determinante analisado para a vida da ferramenta de corte, com relação ao desgaste, foi a velocidade de corte, uma vez que seu aumento proporcionou maior desgaste as ferramentas testadas. Além disso, observou que a velocidade de avanço não é o fator crucial que interfere na vida ao desgaste da ferramenta, mas compromete a qualidade da usinagem.

Amorim (2002), em seu trabalho, ao analisar a usinagem de um aço ABNT 1045 com uma ferramenta de metal duro, percebeu uma forte relação entre a força de corte e o desgaste do flanco máximo da ferramenta. Além disso, constatou que a vida da ferramenta é inversamente proporcional a velocidade de corte aplicada.

Hülsendeger (2017) analisou em seu trabalho o desgaste da ferramenta de metal duro de classe ISO-P ao torner um aço SAE 4140 em diferentes condições. Na Figura 13 é possível ver graficamente os resultados obtidos para o desgaste da ponta da ferramenta (VB_c) em função do comprimento usinado, onde o ensaio 1 e o ensaio 2 tratam-se de processos de usinagem à seco, com velocidades de corte de 120m/min e 60m/min respectivamente e os ensaios 3 e 4 foram realizados com lubrificação MQL (mínima quantidade de lubrificante) e velocidades de 120m/min e 60/min.

Figura 13 - VB_c versus comprimento usinado



Fonte: Hülsendeger, 2017.

Ao observar a situação de corte a seco aplicando a maior velocidade de corte (Ensaio 1), observa-se que o inserto quase atingiu o valor máximo, logo no primeiro passe, onde possivelmente ocorreu uma falha prematura da ferramenta durante o passe, que acelerou o desgaste. Analisando o comportamento do Ensaio 4, é possível concluir que a menor velocidade de corte combinada com MQL aumentou expressivamente o tempo de vida da ferramenta ISO-P na usinagem do aço SAE 4140, uma vez que essa foi a única condição que permitiu alcançar o comprimento usinado de 3000 mm (ou 50 passes) sem a largura de desgaste atingir 300 μm . Nos demais ensaios com o inserto ISO-P, a ferramenta ultrapassou os 300 μm de desgaste de ponta antes de atingir os 50 passes.

Ferreira (2011) avaliou em seu trabalho o desgaste da ferramenta de metal duro revestida com nitreto de titânio no fresamento de um aço ABNT 4140 e observou que o aumento do avanço de corte em seus ensaios resultou em um aumento consequente do desgaste da ferramenta de corte. Além disso, concluiu também que o desgaste da ferramenta de corte não tem relação direta com a rugosidade superficial da peça usinada, uma vez que aumentando o desgaste da ferramenta, a rugosidade superficial oscila, aumentando e diminuindo conforme o formato de lascamento impresso na peça.

Almeida (2010) avaliou o desgaste da ferramenta de metal duro revestida com TiN no fresamento do aço ABNT 4140 laminado a quente e temperado/revenido e observou que para diferentes velocidades de corte aplicando-se o menor avanço proposto, 0,1mm/rev, o desgaste de flanco da ferramenta de corte utilizada foi o menor. E que para a maior velocidade aplicada, 240 m/min, o desgaste foi maior para o avanço de 0,2mm/rev (o maior utilizado), onde nos primeiros 20 minutos de ensaio houve o lascamento da ferramenta.

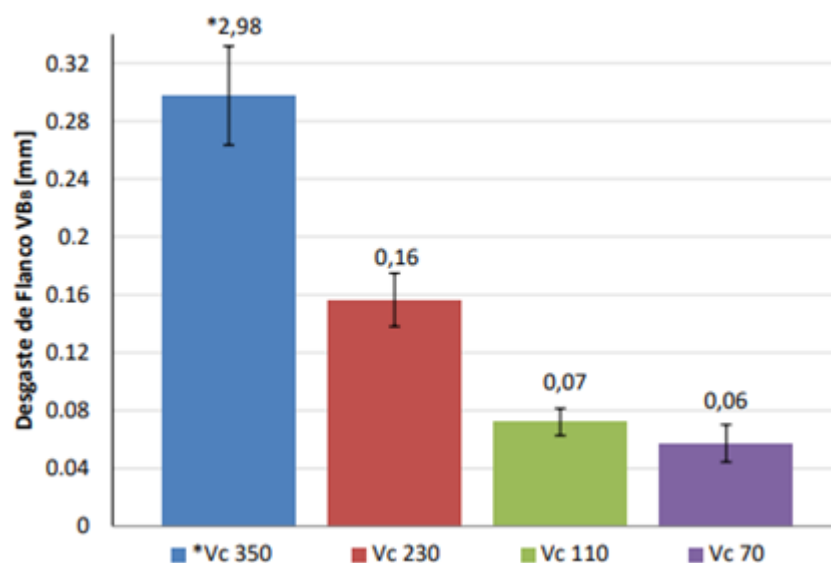
Lima (2012) estudou o desgaste de ferramentas de metal duro e cerâmicas em processos de torneamento do Inconel® 751 e Inconel® 718, onde notou que os maiores tempos de vida da ferramenta de corte para os insertos de metal duro foram obtidos nas menores velocidades de corte, na maioria dos casos. Além disso, observou também que o tipo de desgaste que predominou foi o desgaste de flanco médio e que o aumento da velocidade de corte mostrou ser o fator que mais incrementou os desgastes de flanco médio e os desgastes de ponta, durante os ensaios com os insertos de metal duro. Onde concluiu que a variável que mais influenciou na vida das ferramentas de metal duro foi a velocidade de corte, o que,

segundo o autor, se justifica, uma vez que a maior geração de calor, na aplicação da maior velocidade de corte, acelera os mecanismos de desgaste e diminui a vida da ferramenta.

Polly (2019), ao analisar o torneamento a seco de um aço SAE 4340, utilizando ferramentas de metal duro, também notou que a velocidade de corte teve grande influência na vida das ferramentas de corte, e que os desgastes predominantes no inserto de metal-duro foram os de flanco e cratera.

Pereira (2019), em seu trabalho, analisou o torneamento a seco do aço ABNT 1045 recozido, utilizando ferramentas de metal duro, onde observou que o desgaste de flanco médio apresentou comportamento crescente, com o aumento da velocidade de corte, conforme pode se visto na Figura 14.

Figura 14 – Desgaste de flanco médio em função das velocidades de corte



Fonte: Pereira, 2019.

Veiga et al. (2013) afirmam que o aumento da velocidade de corte tem efeito pronunciado na redução da vida útil da ferramenta, pois é o principal parâmetro responsável pelo aumento de temperatura na região de formação dos cavacos, o que acelera os mecanismos de desgaste. E, segundo os autores, essa é a razão pela qual a curva de vida de uma ferramenta é expressa em termos da velocidade de corte.

2.7. Usinagem a seco

Atualmente, pode-se observar que está havendo um grande interesse pela conscientização ambiental dentro das indústrias, pelo fato do aumento da poluição, da criação de leis para prevenção ambiental e do crescimento da demanda de produtos e processos novos, que fazem com que as indústrias, de forma geral, promovam ações preventivas para redução dos impactos ambientais. Com isso, torna-se imprescindível adotar métodos e ferramentas de gestão para desenvolver inovação sustentável, a exemplo da produção mais limpa, para tornar processos mais eficientes (SILVA et al., 2019).

Quando se fala de consciência ambiental na área de manufatura das indústrias, o maior ponto a ser observado é o aumento da poluição. Com isso, foram criadas leis com foco nos processos e em uma produção “verde”. Recentemente, têm-se realizado grandes esforços focados em aliviar os impactos ambientais, são eles: desenvolvimento de um processo de reciclagem, especialmente para metais e plásticos, e substituição de produtos químicos nos processos de manufatura, denominando-os “processos limpos” (OLIVEIRA & ALVES, 2007).

Para sobreviver dentro da economia com concorrência global, as empresas fabricantes de peças metálicas, especialmente as automotivas, precisam ter capacidade para reagir a curto prazo e com preços competitivos aos desejos dos clientes. O desenvolvimento dos produtos e os processos de manufatura, equipamentos e capacidades produtivas precisam estar adaptados para cumprir estas exigências. É obrigatório saber fabricar diversos produtos e utilizar de maneira otimizada os meios de capacidade instalados. E um dos principais aspectos de gestão estratégica da indústria atual é sua relação com o meio ambiente (STOLL, 2008).

Um dos processos mais utilizados na manufatura em geral é a usinagem. O uso de fluidos de corte neste processo é comum, devido à melhora nas condições tribológicas. O emprego de fluido de corte aumenta a vida da ferramenta, minimiza a geração de calor durante o processo, auxilia na remoção dos cavacos e, geralmente, melhora a eficiência do sistema produtivo.

Entretanto, as vantagens proporcionadas pelos fluidos de corte têm sido severamente discutidas, devido aos seus inúmeros efeitos negativos no aspecto ambiental, custos e na saúde dos operadores.

A utilização de fluidos de corte no processo de usinagem faz da indústria metal-mecânica uma potencial agressora do meio ambiente. São vários os problemas decorrentes desta utilização, que vão desde a geração de efeitos nocivos ao ambiente de trabalho até a agressão do meio ambiente. Ao avaliar os impactos gerados pela utilização dos fluidos de corte, devemos considerar dois principais efeitos: efeitos nocivos à atmosfera (interna e externa) e degradação do solo e recursos hídricos, que estão demonstrados na Figura 15.

Figura 15 - Emissão de resíduos de fluído de corte.



Fonte: Alves & Oliveira, 2006.

Os fluidos de corte podem ser dispostos depois de seu uso pela própria companhia ou por uma empresa especializada em disposição de resíduos. Dependendo da qualidade e modo de disposição do resíduo, o resultado será poluição do solo, águas e ar.

Não são apenas os problemas de disposição que despertam interesse, mas as perdas de fluidos de corte podem também ser muito prejudiciais e custosas. Elas ocorrem no sistema de manufatura pela vaporização na usinagem, na saída de cavacos e peças da máquina, nos componentes da máquina, tais como dispositivos de fixação e manuseio, no vácuo, nos sistemas de pressurização do ar e na

formação de gotas e vazamentos. O vazamento do fluido é um fator crítico que contribui para a perda e, em alguns casos, para as influências negativas nos sistemas hidráulicos da máquina.

A aplicação dos fluidos de corte nos processos de usinagem gera vapores, sobretudo, no contato do refrigerante com superfícies quentes e em movimento da peça trabalhada, da ferramenta, ou do cavaco, comprometendo o ar do local de trabalho. Acredita-se que há substanciais evidências de aumento do risco de câncer, em diferentes órgãos do corpo humano, associado com a utilização dos fluidos de corte (OLIVEIRA & ALVES, 2007).

Para Sahoo e Sahoo (2012), as operações de usinagem devem ser orientadas para a usinagem a seco ou o mais próximo desta, a fim de evitar os problemas ambientais causados e priorizar a saúde dos operadores.

Um dos aspectos mais importantes para que a redução da utilização de fluidos tenha sucesso é a compreensão e o controle dos efeitos da temperatura sobre o processo e a peça. A temperatura tem grande influência sobre o desgaste da ferramenta e a qualidade superficial do componente usinado e, portanto, a compreensão dos fenômenos térmicos que ocorrem no processo é de grande importância para a eficiência do mesmo. Portanto, o desafio é encontrar parâmetros e estratégias de corte de modo a atingir condições de temperatura que facilitem o cisalhamento do material sem potencializar os mecanismos de desgaste (ZEILMANN et al., 2010).

Gu et al. (1999) mostraram em seu trabalho que o uso de refrigerante não aumentou a vida da ferramenta na usinagem de um aço ABNT 4140, utilizando-se ferramentas de metal duro. Khrais & Lin (2007) verificaram também, em sua pesquisa, que no torneamento do aço ABNT 4140, a curva de vida da ferramenta consiste dos três estágios inicial, gradual e catastrófico e não houve efeito positivo do óleo lubrificante na vida da ferramenta.

2.8. Integridade Superficial

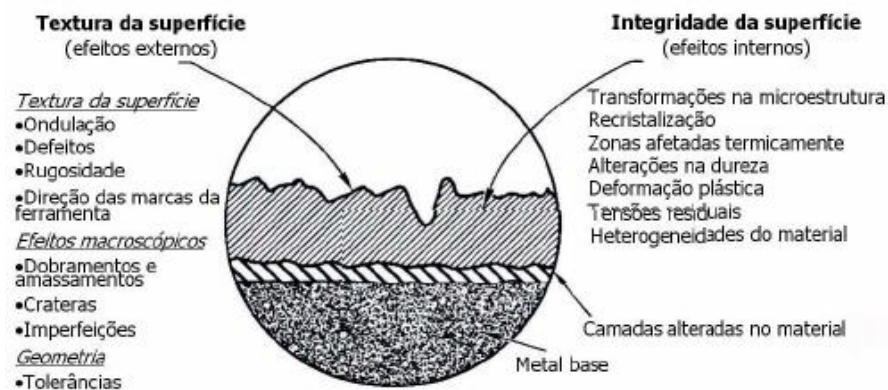
A qualidade da superfície é considerada um parâmetro crítico em relação ao desempenho de peças usinadas, tendo efeitos relevantes em várias propriedades

mecânicas, como vida em fadiga, resistência à corrosão e vida sob fluência. Outros atributos funcionais, como atrito, desgaste, lubrificação e condutividade térmica e elétrica também podem ser afetados. Por isso, um bom acabamento é de fundamental importância para garantir o desempenho funcional de peças mecânicas (GUPTA & SOOD, 2017).

Segundo Ratnam (2017), a rugosidade de uma superfície usinada é considerada como uma das principais características de um produto, uma vez que influencia diretamente na vida em fadiga, no coeficiente de atrito, na resistência ao desgaste e, pôr fim, na confiabilidade do produto durante o serviço.

A integridade superficial é o termo utilizado para denotar as condições e a qualidade de superfícies usinadas, e resulta da combinação do processo de deformação plástica, propagação de trincas, reações químicas e forma de energia empregada para a remoção do cavaco (Figura 16), e deve ser interpretada com elementos que descrevem a estrutura real da superfície e subsuperfície.

Figura 16 - Representação dos efeitos externos e efeitos internos da superfície.



Fonte: Oliveira e Diniz, 2009.

Segundo Oliveira e Diniz (2009), as irregularidades podem ser classificadas de acordo com a superfície ou acabamento superficial como:

- Rugosidade superficial: são finas irregularidades resultantes de ação inerente do processo de corte, ou seja, marcas de avanço. A altura ou profundidade média dessas irregularidades são medidas em pequeno comprimento chamado “cut-off” (comprimento da amostra). Pode-se dizer que a rugosidade e ondulações

constituem a textura de uma superfície apesar de apresentarem outras caracterizações.

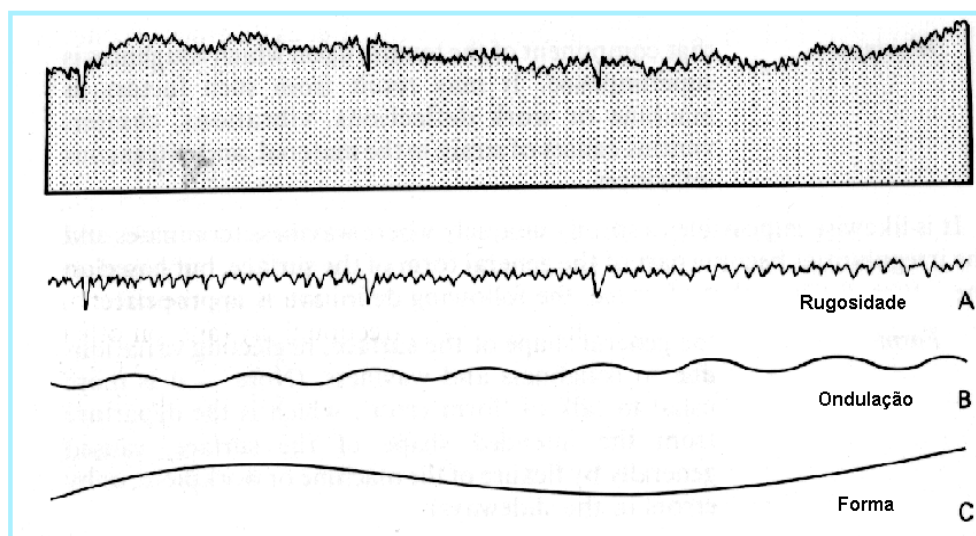
- Ondulações: consistem de irregularidades superficiais cujos espaçamentos são maiores em aproximadamente 1mm que o cutt-off, causado por deflexões e vibrações da ferramenta ou da peça.

- Marcas de avanço: denotam as direções das irregularidades superficiais, dependendo da orientação da peça e ferramenta de corte na máquina, ou do movimento relativo da peça e ferramenta.

- Falhas: são interrupções na topografia típica da superfície de um componente, sendo inesperadas e indesejáveis, causadas por defeitos tais como trincas, bolhas, inclusões que podem surgir durante o processo de corte.

A Figura 17 apresenta as irregularidades superficiais presentes em materiais usinados.

Figura 17 - Textura de uma superfície mostrando efeitos de rugosidade (A), ondulações (B) e erro de forma (C).



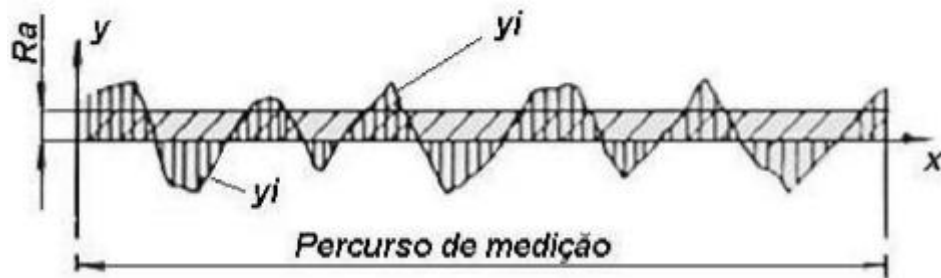
Fonte: Oliveira e Diniz, 2009.

Para avaliar o acabamento superficial de um componente são utilizados alguns parâmetros de rugosidade e dentre todos, o mais amplamente utilizado é a rugosidade média (R_a). Esse parâmetro de rugosidade consiste na média aritmética dos valores absolutos das ordenadas de afastamento (Equação 1) em relação a linha média (Figura 18).

$$Ra = \frac{1}{l_m} \int_0^{l_m} |y(x)| dx \quad (1)$$

onde l_m é o percurso da medição.

Figura 18 – Rugosidade Média (Ra)

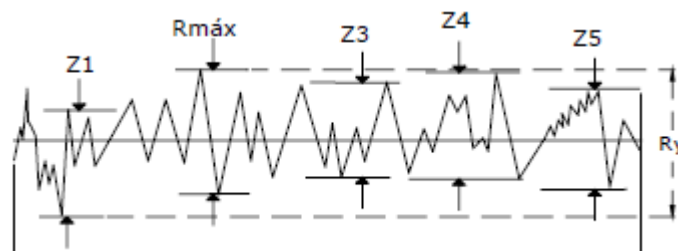


Fonte: Amorim, 2002.

O valor de Ra é geralmente expresso em μm no sistema métrico e μin no sistema inglês, com os rugosímetros possuindo, geralmente, resoluções que vão de 0,1 a 0,001 μm .

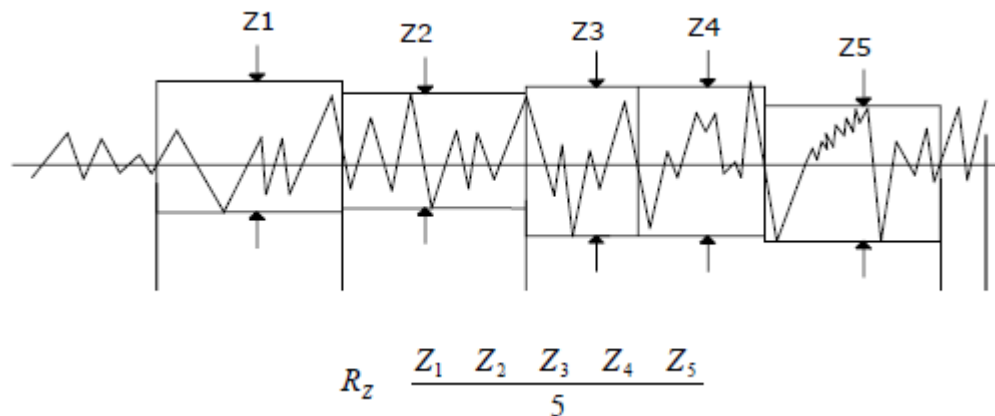
Além do Ra, existem também outros parâmetros de avaliação de rugosidade, como o Ry e o Rz, por exemplo, que são os indicadores de amplitude do perfil de rugosidade superficial, ou seja, da altura das reentrâncias e saliências. O Ry (Figura 19) corresponde à diferença encontrada entre o ponto mais alto e o ponto mais baixo ao longo do perfil de rugosidade traçado.

Figura 19 – Parâmetro de Rugosidade Ry



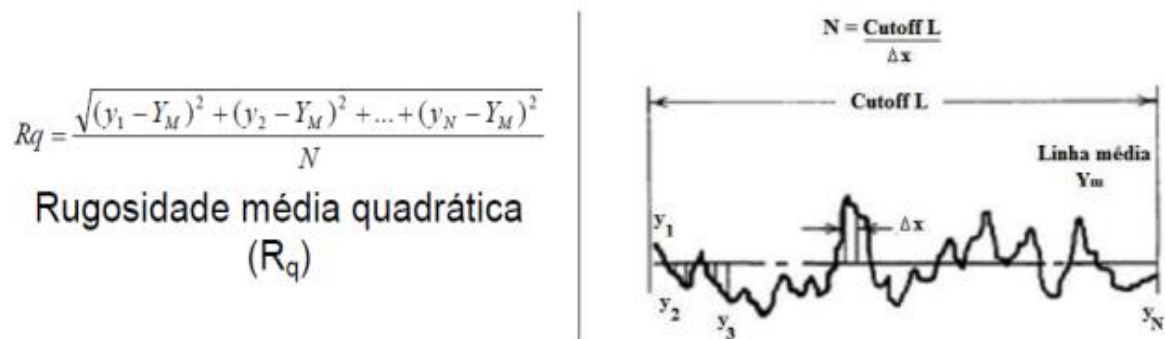
Fonte: Senai (Modificado).

O Rz (Figura 20) é muito semelhante, porém para aumentar a representatividade da análise, considera a média dos cinco pontos mais altos e mais baixos do perfil antes de efetuar a diferença entre eles (PARRA et al., 2006).

Figura 20 – Parâmetro de Rugosidade Rz

Fonte: Senai (modificado)

Além desses anteriormente mencionados, existe também o parâmetro R_q (Figura 21), denominado rugosidade média quadrática, que representa o desvio padrão do perfil de rugosidade.

Figura 21 – Representação R_q 

Fonte: ABNT NBR ISO 4287:2002

A rugosidade de uma peça, produzida pelo processo de torneamento de acabamento é mais difícil de controlar do que as dimensões físicas do produto, porque é afetada por vários fatores que podem ser divididos em quatro categorias, segundo Ratnam (2017):

a) Fatores devido a parâmetros de usinagem – como avanço, velocidade de corte e profundidade de corte.

- b) Fatores devido aos parâmetros da ferramenta de corte – como desgaste da ferramenta, geometria da ferramenta, material da ferramenta e revestimento da ferramenta.
- c) Fatores devido às condições de usinagem e máquina-ferramenta – como torneamento a seco ou molhado, tipo de fluido de corte, aplicação dos fluidos, rigidez e vibrações da máquina- ferramenta.
- d) Fatores devido às propriedades do material da peça – tais como dureza, microestrutura, tamanho de grão e inclusões.

Entre os parâmetros mais comuns no processo de usinagem, o que tem maior influência no acabamento da superfície, e na precisão dimensional do produto usinado é o avanço, seguido da velocidade de corte e da profundidade de corte. Esses são os mais facilmente controlados, em comparação com outros parâmetros em um processo de torneamento. Existem diversos fatores na ferramenta de corte que influenciam o acabamento da superfície, entre eles a geometria, material, condições e revestimento das ferramentas (RATNAM, 2017).

A rugosidade influencia não apenas a precisão dimensional das peças usinadas, mas também suas propriedades, sendo um parâmetro importante para avaliar o desempenho das ferramentas de corte. A irregularidade de uma superfície é o resultado do processo de usinagem, incluindo a seleção ideal das condições de corte. No processo de torneamento de acabamento de aços, a rugosidade é bastante afetada por vários fatores, como avanço, raio da ponta, dureza do material, ângulos de corte e condições de corte (MUHL, 2019).

REIS et al. (2019), ao analisar o torneamento de um aço ABNT 4340 com a utilização de insertos de metal duro, observou que o aumento do avanço em cerca de 2,5 vezes levou a um ganho de 5 vezes na rugosidade média da superfície, concluindo que o avanço mostra-se como o parâmetro mais influente nessa variável, uma vez que a altura média dos vales das marcas de avanço tende a aumentar em proporção quadrática ao avanço.

Barbosa (2019), ao analisar a Influência dos parâmetros de usinagem na integridade superficial da liga biomédica de CoCr ASTM F75, utilizando ferramentas de metal duro, notou que o avanço exerceu influência significativa nos valores de

rugosidade superficial. Quando comparou os resultados que possuem a mesma velocidade de corte e avanços diferentes, observou que a condição com maior avanço resultou em uma rugosidade consideravelmente mais alta. Assim, afirmou, com uma confiabilidade de 95%, que o avanço interfere diretamente nos valores de rugosidade média.

Keblouti et al. (2017) comparando os efeitos dos parâmetros de corte na rugosidade no torneamento do aço AISI 52100, com dureza de 242 HV, perceberam que 93,97% da variação de R_a , quando se usinou com metal duro revestido, era explicado pela modificação do avanço. E o segundo fator que interferiu na qualidade da superfície foi a velocidade de corte, contribuindo para a variação da qualidade superficial em 2,32% e 7,41% para inserto revestido e não revestido, respectivamente. Por fim, os autores também constataram que a profundidade de corte apresentou pouca influência sobre a rugosidade da superfície, com contribuição inferior a 2%, para ambas as ferramentas de corte analisadas.

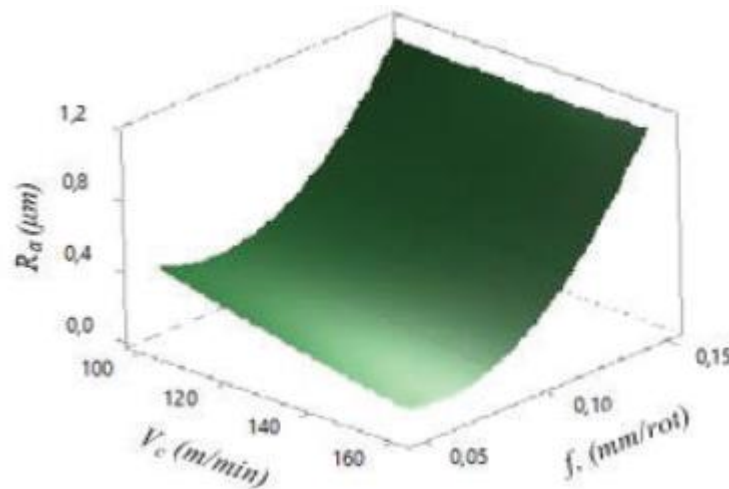
Denkena et al. (2015), utilizaram ferramenta de metal duro para realizar o torneamento de acabamento interno do aço AISI 52100, visando analisar os efeitos dos parâmetros, como velocidade de corte, avanço e geometria de gume sobre a rugosidade. Os resultados apontaram que o avanço e o raio de gume são os principais fatores que influenciam a qualidade da superfície. Ao adotar maiores valores de avanço, a rugosidade aumentou devido as marcas deixadas sobre a superfície usinada. Já com valores mais baixos de avanço, a influência do raio de gume foi maior sobre a rugosidade. Para finalizar, os autores mencionam que baixos valores de rugosidade podem ser conseguidos com baixos valores de avanço e profundidade de corte, e raios de gume maiores.

Qehaja et al. (2015), utilizaram ferramentas de metal duro para torneamento a seco e observaram que o avanço é o parâmetro que tem o efeito mais significativo na rugosidade, seguido pelo raio da ponta e pelo tempo de corte. Para obter melhores acabamentos superficiais, os autores recomendam níveis mais elevados de velocidade de corte, profundidade de corte e níveis mais baixos de avanço.

Muhl (2019) estudou a otimização dos parâmetros de usinagem de acabamento através da rugosidade no torneamento de um aço ABNT 4340, analisando a interação entre a velocidade de corte e avanço sobre a rugosidade. Ao

analisar o comportamento obtido no gráfico de rugosidade média versus velocidade de corte e avanço, da Figura 22, o autor observou que a rugosidade mais baixa foi obtida com uma combinação de baixo avanço e alta velocidade de corte.

Figura 22 – Influência dos parâmetros de corte sobre a rugosidade R_a



Fonte: Muhl, 2019.

Muhl (2019) afirma que o avanço tem o maior efeito sobre a rugosidade, uma vez que sua variação é muito alta quando comparado com os demais parâmetros, sendo o fator mais significativo. Em contrapartida, a rugosidade tem uma tendência a reduzir com o aumento da velocidade de corte, quando se utiliza baixos valores de avanço. Resultados esses que também estão de acordo com as pesquisas realizadas por Hessainia et al. (2013).

Kikukawa et al. (2019) ao analisarem o processo de torneamento em relação a rugosidade superficial de um aço SAE 1010, concluíram que quanto maior a rotação e menor o avanço, menor será o valor da rugosidade. E que a presença de fluido de corte não é o principal fator que influencia no acabamento superficial, uma vez que rotação e avanço possuem maior significância no acabamento superficial.

Telles (2018), ao avaliar a rugosidade no torneamento de acabamento em titânio, também analisou que na interação velocidade com o avanço, o aumento da velocidade de corte tende a diminuir a rugosidade para menor valor de avanço, ao

passo que, para avanço em nível alto, maior rugosidade é obtida com o incremento da velocidade, o que mostra o efeito de interação de uma variável de controle sobre a outra.

Segundo Korkut e Dornetas (2007), o acréscimo na velocidade de corte resultou em menor valor de rugosidade para o fresamento do aço ABNT 1020. A geometria da ferramenta tem um efeito significativo no desempenho da usinagem. Entre os vários parâmetros geométricos o ângulo de saída radial e raio da ferramenta são dos mais importantes, pois determinam, respectivamente, a área de contato entre cavaco e ferramenta e formação do cavaco e, portanto, afetam o consumo de energia. (RAO & REDDY, 2006)

Nalbant e Gokkaya (2007) concluíram que acréscimo do raio do inserto, a diminuição da velocidade de avanço e da profundidade de corte decrescem a rugosidade superficial. O avanço é o fator que mais afeta a rugosidade superficial, e para um dado raio de ferramenta, varia com o quadrado da velocidade de avanço.

Amorim (2002), ao analisar o torneamento cilíndrico externo de um aço ABNT 1045, utilizando uma ferramenta de metal duro, notou uma queda na rugosidade do material no ensaio com aplicação da menor velocidade de corte (355m/min), o que ocorreu, segundo ele, devido ao desgaste mais lento do raio de ponta da ferramenta.

Pinto (2017) em seu trabalho, ao realizar o torneamento de um aço SAE 1045 com uma ferramenta de carboneto de tungstênio, observou que maiores valores de avanço, resultaram em um aumento dos valores de parâmetros de rugosidade. Além disso, percebeu que houve incremento do valor de ondulação da superfície da peça nas medições dos corpos de prova que sofreram aplicação de maior velocidade de corte.

Almeida (2010), ao estudar a rugosidade superficial de um aço ABNT 4140 submetido a usinagem com uma ferramenta de metal duro observou que o desgaste da aresta de corte da ferramenta não se relacionou com a rugosidade superficial da peça usinada. Além dele, Ferreira (2011) também chegou a mesma conclusão, utilizando os mesmos material, observando que o desgaste da ferramenta não teve uma relação direta com a rugosidade superficial da peça usinada.

Aouici (2013) afirma que a rugosidade de uma superfície aumenta com o aumento do avanço, devido a geração de sulcos helicoidais, resultado do movimento

da ferramenta sobre a superfície da peça. E esses sulcos tornam-se mais amplos e profundos à medida que o avanço aumenta.

3. MATERIAIS E MÉTODOS

Todos os procedimentos experimentais foram realizados na Universidade Federal do Rio Grande (FURG), nos laboratórios de Fabricação Mecânica e de Metalografia do Departamento de Engenharia Mecânica, e no Centro de Microscopia Eletrônica da Zona Sul (CEME-SUL).

3.1. Materiais

3.1.1. Aço SAE 4140

O aço SAE 4140 foi obtido comercialmente no estado laminado a quente. Sua composição química fornecida pela empresa Favorit está exposta na Tabela 1.

Tabela 1 – Composição química do aço SAE 4140

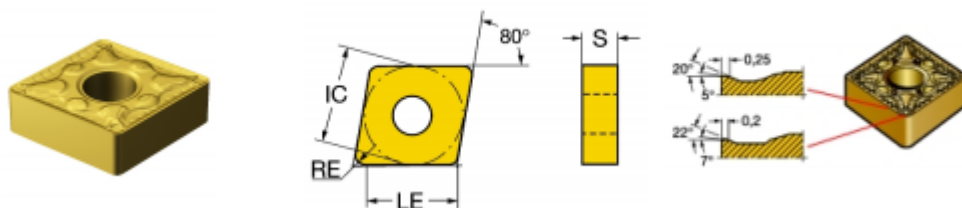
C	Mn	P	S	Si	Cr	Mo
0,38 - 0,43	0,75 - 1,00	0,035	0,040	0,15 - 0,35	0,80 - 1,10	0,15 - 0,25

Fonte: Favorit, 2006.

3.1.2. Pastilhas de metal duro

As pastilhas de metal duro utilizadas neste trabalho são especificadas como insertos T-Max® P para torneamento, modelo CNMG 12 04 04-PM 4025, da marca Sandvik, cujas especificações podem ser vistas nas figuras 23 e 24.

Figura 23 – Representação Genérica da Pastilha modelo 4025



Fonte: Sandvik.

Figura 24 – Especificações Técnicas da Pastilha modelo 4025

Classificação de materiais nível 1 (TMC1ISO)



Formato e tamanho da pastilha (CUTINTSIZESHAPE)

CN1204

Código do formato da pastilha (SC)

C

Raio do canto (RE)

0,397 mm

Sentido (HAND)

N

Substrato (SUBSTRATE)

HC

Espessura da pastilha (S)

4,763 mm

Peso do item (WT)

0,01 kg

Ciclo de vida útil (LCS)

Obsoleto

Diâmetro do círculo inscrito (IC)

12,7 mm

Comprimento efetivo da aresta de corte (LE)

12,496 mm

Propriedade da aresta Wiper (WEP)

false

Classe (GRADE)

4025

Cobertura (COATING)

CVD TiCN+AL2O3+TiN

Ângulo de folga principal (AN)

0 deg

Sensor embedded property (SEP)

0

ID de liberação do pacote (RELEASEPACK)

95.1

Valores iniciais



ap

3 mm(0.4-5.5)

fn

0.2 mm/r(0.1-0.3)

vc

385 m/min(450-340)

Fonte: Sandvik.

3.2. Equipamentos Utilizados

Para o corte dos corpos de prova foi utilizada uma serra Franho, tipo S225, de 0,5 cv de potência. O tratamento térmico de recozimento dos aços foi realizado em um forno elétrico da marca Pyro.

A análise microestrutural dos aços foi realizada num Microscópio Óptico Olympus GX51 em conjunto com o sistema de aquisição Olympus Soft Imaging Solution GmBH.

Para realização de espectrometria nas amostras dos aços foi utilizado um Espectômetro Foundry – Master Pro, da marca Oxford Instruments e para medir suas respectivas microdurezas um Microdurômetro HMV-2 Series, da marca

Shimadzu. Para os ensaios experimentais de torneamento foi utilizado um Torno Mecânico Universal Mascote MS 205 AS, da marca Nardini.

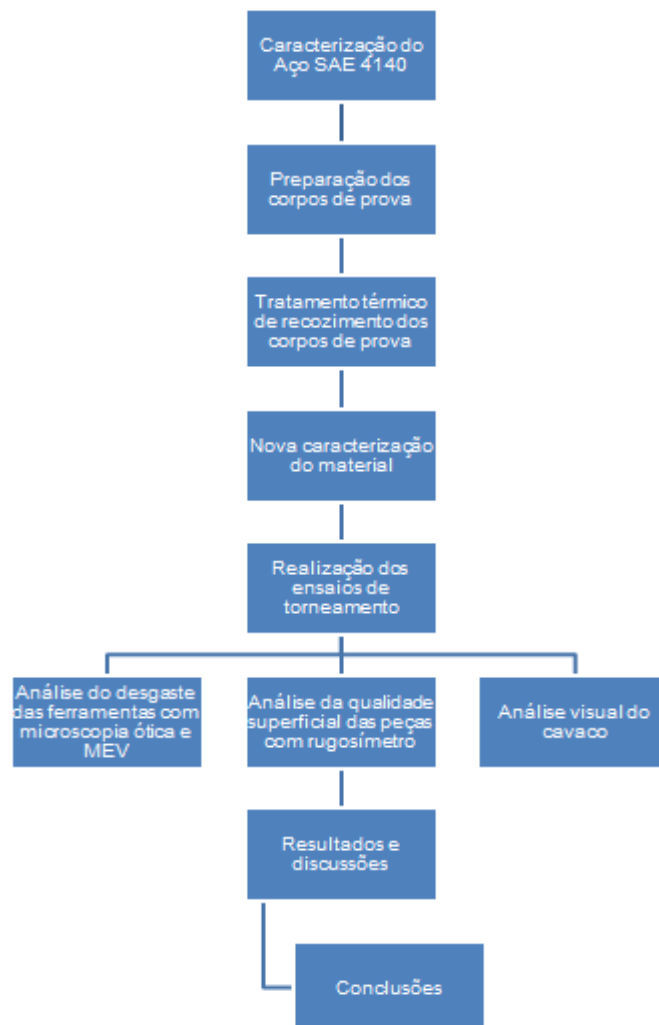
As análises de rugosidade das peças usinadas foi utilizado um rugosímetro portátil Surftest SJ 201P, da marca Mitutoyo.

Para análise das características microestruturais das ferramentas de corte foi utilizado um Microscópio Eletrônico de Varredura JSM-6610LV, da marca JEOL.

3.3. Metodologia

A Figura 25 apresenta o fluxograma dos procedimentos experimentais que foram realizados.

Figura 25 – Fluxograma dos procedimentos experimentais a serem realizados



Fonte: Autor.

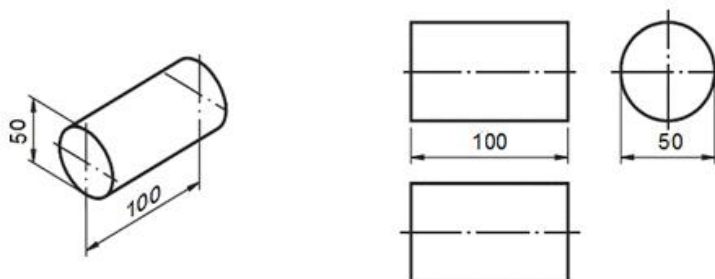
Inicialmente, uma amostra do aço SAE 4140 foi caracterizada quantitativamente através de espectrometria ótica de emissão, onde foi conhecida sua composição.

Posteriormente, outra amostra do material foi analisada morfológica e estruturalmente através de análise metalográfica com ataque químico com Nital 3%, objetivando evidenciar as microestruturas formadas.

Após a análise microestrutural, a amostra foi submetida, também, a um ensaio de microdureza, que foi realizado utilizando uma carga de 1HV, sempre em triplicata.

Feitas as análises, foram cortados corpos de prova das barras dos aços no sentido radial, obedecendo a norma NBR ISO 3685:2017, que determina que não é recomendada uma relação comprimento/diâmetro maior que 10 para os corpos de prova. Sendo assim, as peças foram cortadas de acordo com as medidas, em milímetros, expostas na Figura 26, sendo a relação comprimento/diâmetro igual a 2.

Figura 26 – Representação dos corpos de provas (escala em mm)



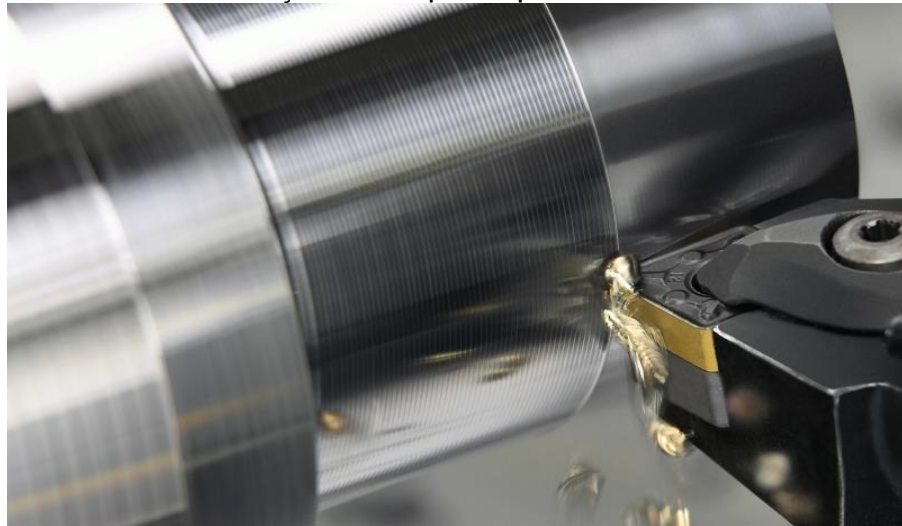
Fonte: Autor.

Posteriormente ao corte e anteriormente aos ensaios mecânicos, os corpos de prova foram tratados termicamente, sendo submetidos a um processo de recozimento, onde foram aquecidos a uma temperatura acima da zona crítica, próxima de 850°C, sendo mantidos nessa temperatura por 2 horas, conforme recomenda GGD Metals (2015), e após resfriados lentamente no forno.

Após o tratamento térmico de recozimento, uma nova amostra do aço foi retirada e preparada para análise microestrutural, a fim de evidenciar a zona termicamente afetada e as microestruturas formadas durante o processo. Assim como, também foi realizado novo ensaio de microdureza, para fins de comparação.

Preparados os corpos de prova, iniciaram-se os ensaios mecânicos de torneamento cilíndrico externo a seco do aço SAE 4140 recozido, que foram realizados conforme exposto na Figura 27, que se trata de uma exemplificação de como foi disposta a ferramenta de corte com relação ao corpo de prova.

Figura 27 – Representação de disposição da ferramenta de corte com relação ao corpo de prova



Fonte: Sandvik.

Foram realizados ensaios de torneamento com duração total de 50 minutos, que segundo a literatura, para velocidade de corte superior a 120 m/min, representa o tempo de ocorrência de fratura da ferramenta (PANJAN et. al., 2003).

Os parâmetros de corte aplicados estão apresentados na Tabela 2, e a forma com que foram combinados está exposta na Tabela 3.

Tabela 2 – Parâmetros de corte dos procedimentos experimentais.

Parâmetros de corte	
V_c (m/min)	160
	250
a_p (mm)	1
f_z (mm/rev)	0,100
	0,316

Fonte: Autor.

Tabela 3 – Combinação dos parâmetros

Ensaio	Velocidade de Corte (m/min)	Avanço de Corte (mm/ver)	Profundidade de Corte (mm)
1	160	0,100	1
2	160	0,316	1
3	250	0,100	1
4	250	0,316	1

Fonte: Autor.

Os processos de torneamento dos corpos de prova foram realizados com uma ferramenta de metal duro classe P, modelo CNMG 12 04 04-PM, da marca Sandvik, a seco, ou seja, sem aplicação de fluido de corte. Para cada ensaio foram preparados 10 corpos de prova, que foram submetidos a até 5 passes de 1 mm de profundidade por corpo de prova. Assim, cada corpo de prova foi usinado em média por 5 minutos e se o inserto resistir a todo ensaio ele usinará um comprimento total de 5 metros, aproximadamente.

O acabamento superficial da peça usinada foi avaliado com a utilização de um rugosímetro, realizando-se 3 medidas consecutivas de rugosidade média (Ra) e fazendo-se a média destas.

O desgaste da ferramenta de corte foi avaliado por meio de microscópio ótico, sendo medida a largura do desgaste de flanco, através de um recurso do próprio programa de coleta de imagem e aquisição de dados, acoplado ao microscópio.

Tanto a rugosidade superficial da peça, quanto a avaliação do desgaste largura de flanco foram medidos a cada intervalo de tempo de 5 minutos de torneamento, até atingir o tempo total de usinagem, que foi de 50min.

Após o término dos ensaios, as ferramentas de corte foram analisadas no MEV, a fim de obter imagens mais detalhadas de seu real estado com objetivo de avaliar mecanismos de desgaste dos insertos.

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1. Análise química e metalográfica do material

O resultado da análise da composição química do aço SAE 4140, feita por meio de espectrometria, apresentou valores dentro dos limites esperados, de acordo com a literatura (FAVORIT, 2006) e pode ser analisado na Tabela 4.

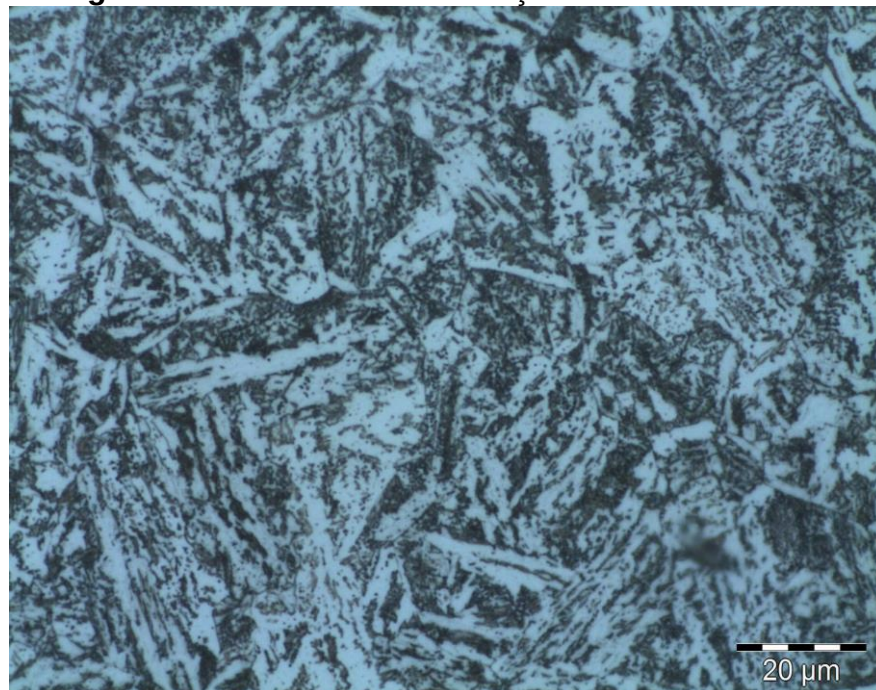
Tabela 4 – Espectrometria SAE4140

Fe	C	Si	Mn	Cr	Mo
97,1	0,410	0,364	0,898	0,943	0,167

Fonte: Autor.

Na Figura 28 é possível ver a microestrutura do aço SAE 4140 em seu estado laminado a quente, anterior à sua submissão ao tratamento térmico de recozimento.

Figura 28 – Microestrutura do aço SAE 4140 laminado



Fonte: Autor.

Ao analisar a microestrutura do aço SAE 4140 laminado a quente, é possível ver que os grãos encontram-se refinados, devido ao processo de laminação.

Além das análises química e microestrutural, o material foi submetido também a um ensaio de microdureza que atestou uma dureza de 283 HV no seu estado laminado.

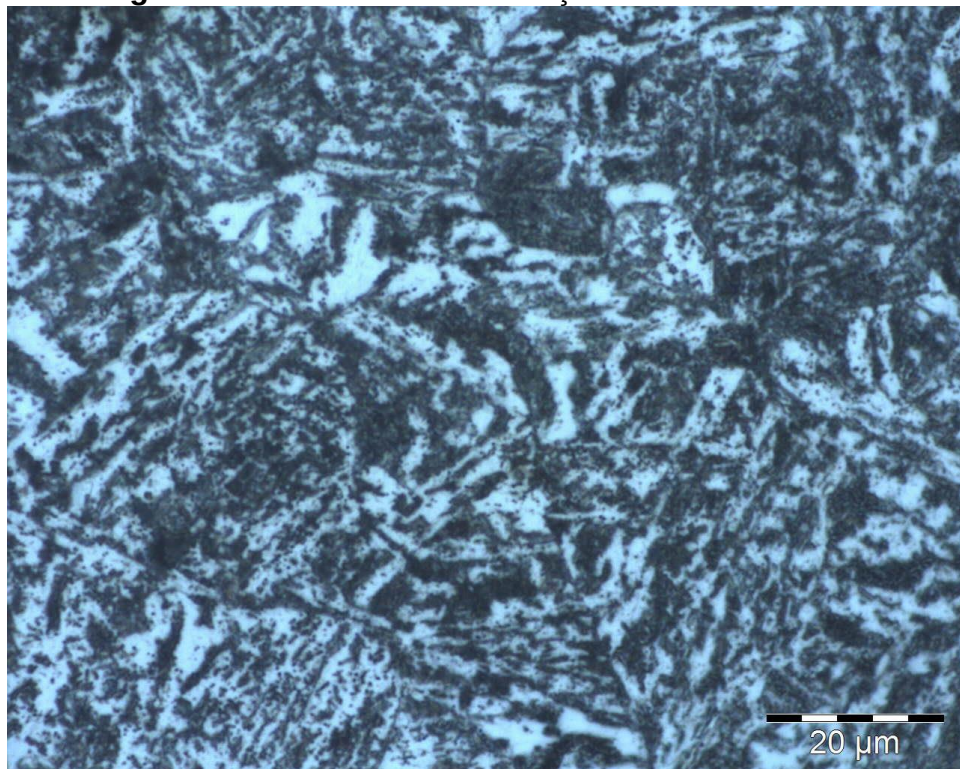
A partir da análise dos resultados obtidos com relação às propriedades do material, foi possível comprovar que de fato tratava-se de um aço SAE 4140, permitindo o prosseguimento da pesquisa.

4.2. Tratamento térmico de recozimento

O recozimento foi realizado aquecendo-se as amostras à temperatura de 850°C e mantendo-as no forno por 2 horas, o que corresponde a 1 hora para cada 25mm de diâmetro de amostra, conforme exige a literatura. Após isso, os corpos de prova foram resfriados lentamente ao forno.

A microestrutura obtida após o tratamento térmico de recozimento pode ser vista na Figura 29.

Figura 29 – Microestrutura do aço SAE 4140 recozido



Fonte: Autor.

Analisando a Figura 29 é possível notar que a microestrutura do aço SAE 4140 recozido é constituída de ferrita e perlita grosseira. A ferrita (tonalidade clara) apresenta-se em plaquetas alongadas e grossas. Já a perlita (tonalidade escura) trata-se de uma alteração de plaquetas alongadas das fases ferrita e cementita.

Após análise microestrutural, o material foi submetido a um novo ensaio de microdureza, para fins de comparação, que atestou uma dureza de 246 HV para o aço SAE 4140 em seu estado recozido, o que se justifica uma vez que esse processo tem como objetivo aumentar o tamanho de grão, diminuindo a dureza e consequentemente melhorando a usinabilidade do metal.

4.3. Análise do desgaste da ferramenta de corte

Os ensaios de usinagem foram realizados conforme consta na Tabela 4, obedecendo a ordem e a combinação de parâmetros previamente lá determinados.

O tipo de desgaste da ferramenta de corte que se destacou durante os ensaios foi o desgaste de flanco, fato provavelmente relacionado ao raio de ponta da ferramenta, que possui um valor abaixo de 0,4 mm, o que gera maior instabilidade no gume quando exposto a altas temperaturas e abrasão mecânica(FERRARESI, 2014).

Não foi identificado nenhum desgaste expressivo na superfície de saída dos insertos. A difusão depende da temperatura, duração do contato, afinidade físico-química e intensidade do contato entre os metais envolvidos. Estas condições estão presentes na zona de fluxo (zona de cisalhamento secundário), portanto esse é um mecanismo principalmente causador de desgaste de cratera. As ferramentas de metal duro com revestimento de carboneto de titânio, que é muito mais resistente que o de tungstênio, evitam a craterização da ferramenta. Por este motivo, o foco das análises foram os desgastes de flanco principal e secundário.

4.3.1. Ensaio 1 - velocidade de corte 160 m/min e avanço 0,1 mm/rev

Na Tabela 5 é possível ver os resultados de desgaste da ferramenta de corte ao longo do tempo para o Ensaio 1, referente ao desgaste de flanco principal e secundário.

Tabela 5 – Desgastes de flanco para o Ensaio 1

Tempo de usinagem (min)	Desgaste do flanco principal (µm)	Desgaste do flanco secundário (µm)
5	141,66	149,15
10	159,32	164,41
15	161,02	169,49
20	166,10	186,44
25	169,49	203,39

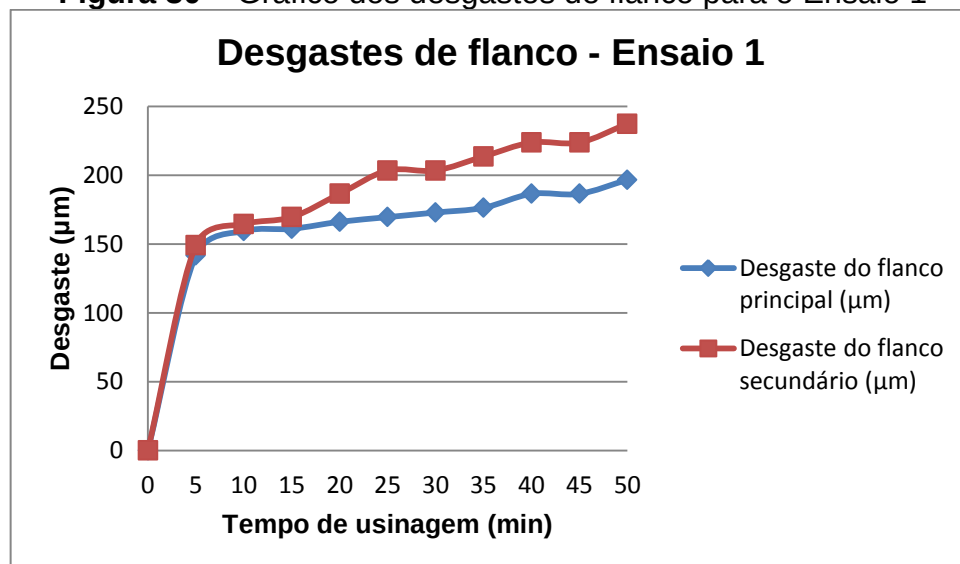
Tabela 5 – Desgastes de flanco para o Ensaio 1 (continuação)

30	172,88	203,39
35	176,27	213,56
40	186,44	223,73
45	186,44	223,73
50	196,61	237,29

Fonte: Autor.

Pode-se verificar que o desgaste foi crescendo continuamente com o aumento do tempo de usinagem, chegando a um valor máximo 0,196 mm para o desgaste médio no flanco principal e 0,237 mm no flanco secundário, valores inferiores ao parâmetro de fim de vida da ferramenta segundo a norma ISO 3685 (1993).

Na Figura 30 é possível observar o comportamento de ambos os desgastes graficamente.

Figura 30 – Gráfico dos desgastes de flanco para o Ensaio 1

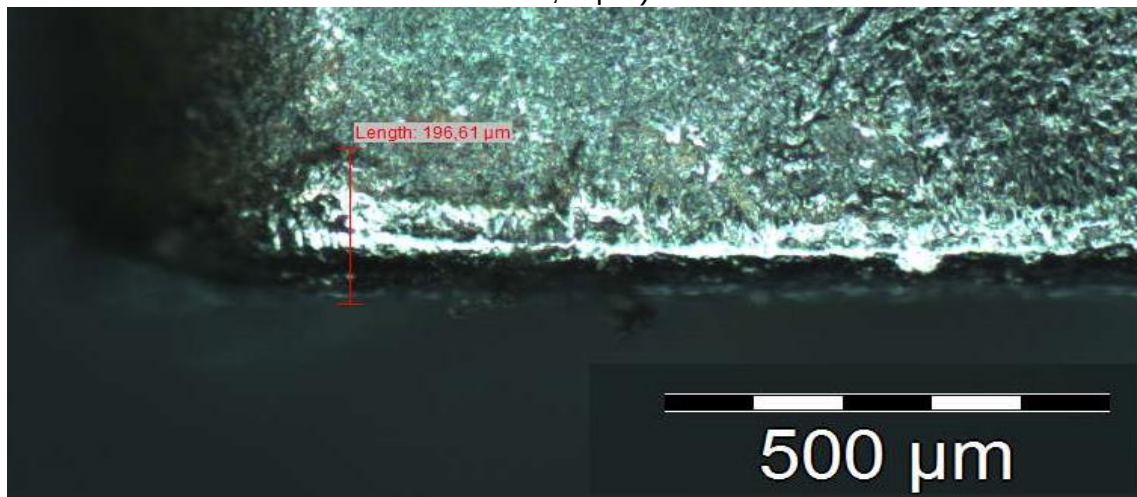
Fonte: Autor.

Comparando-se as curvas de desgaste da Figura 30, é possível notar que a partir do vigésimo minuto, quando a ferramenta já torneou 4 corpos de prova o desgaste de flanco secundário começa a aumentar a uma taxa mais elevada que o primário, o que pode ser relativo ao fato de que, devido ao ângulo de ponta do inserto, a combinação de alta temperatura e abrasão é mais sentida pois esta região

da ferramenta passa mais tempo em contato com a parte da peça com maior gradiente de temperatura.

Nas Figuras 31 e 32 é possível observar o estado das superfícies de flanco principal e secundária da ferramenta de corte utilizada no Ensaio 1, após o término dos 50 minutos de ensaio de torneamento.

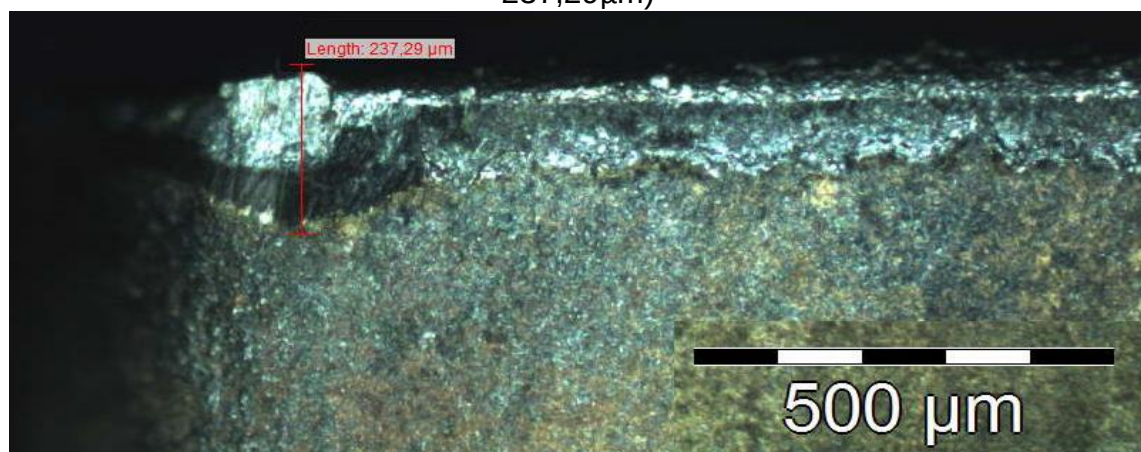
Figura 31 – Estado final da superfície de flanco principal – Ensaio 1 (desgaste 196,61 μ m)



Fonte: Autor.

Na Figura 31 se observa que o flanco principal sofreu um desgaste relacionado com abrasão mecânica, gerando uma retração do flanco e sulcos abrasivos paralelos à direção do fluxo de material. Não são notadas avarias como lascamentos, deformação plástica nem trincas na aresta principal.

Figura 32 – Estado final da superfície de flanco secundária – Ensaio 1 (desgaste 237,29 μ m)



Fonte: Autor.

A Figura 32 apresenta com clareza a superfície de flanco secundária com maior desgaste, se comparada com a superfície de flanco principal. Além disso, é possível notar que o mecanismo de desgaste que se destaca é a abrasão mecânica, havendo um pequeno lascamento e também marcas de queima ao longo da superfície, que caracteriza a presença de altas temperaturas durante o processo.

4.3.2. Ensaio 2 - velocidade de corte 160 m/min e avanço 0,316 mm/rev

Na Tabela 6 é possível analisar os valores de desgaste de flanco principal e secundário obtidos ao longo do Ensaio 2.

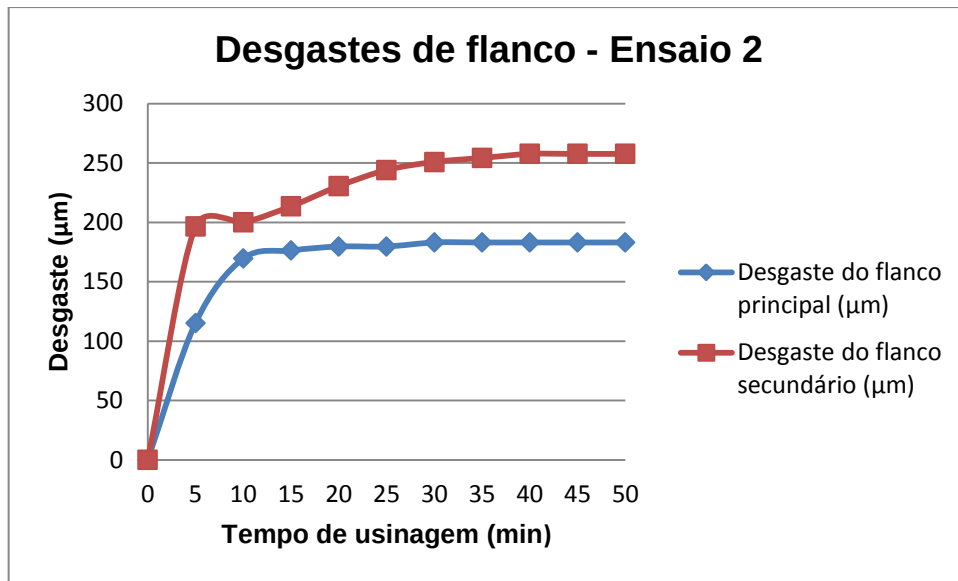
Tabela 6 – Desgastes de flanco para o Ensaio 2

Tempo de usinagem (min)	Desgaste do flanco principal (μm)	Desgaste do flanco secundário (μm)
5	115,25	196,61
10	169,49	200,00
15	176,27	213,56
20	179,66	230,51
25	179,66	244,07
30	183,05	250,85
35	183,05	254,24
40	183,05	257,63
45	183,05	257,63
50	183,05	257,63

Fonte: Autor.

No segundo ensaio o desgaste do flanco principal estabilizou em 30 minutos de usinagem, chegando a um valor máximo 0,183 mm para o desgaste médio. No flanco secundário, o valor do desgaste é crescente, mas a partir de 30 minutos sua taxa de crescimento é reduzida, chegando a 0,257 mm, novamente valores inferiores ao parâmetro de fim de vida da ferramenta segundo a norma ISO 3685 (1993).

Na Figura 33 estão representadas graficamente as curvas de desgaste ao longo do tempo para ambas as superfícies de flanco da ferramenta utilizada no Ensaio 2.

Figura 33 – Gráfico dos desgastes de flanco para o Ensaio 2

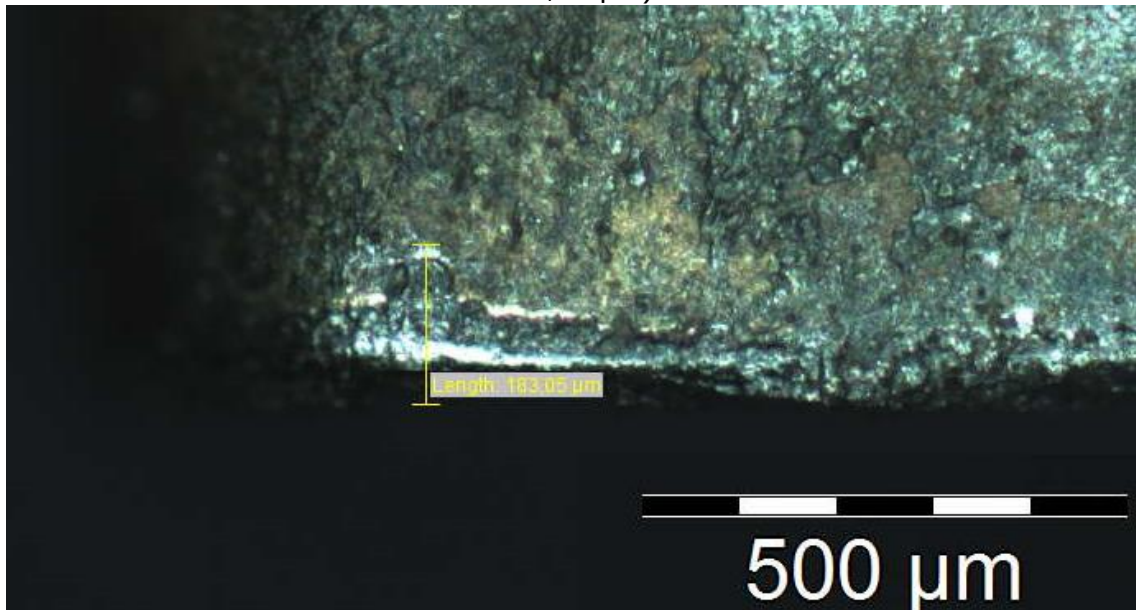
Fonte: Autor.

O aumento do avanço sem a modificação da velocidade de corte não afetou significativamente o desgaste do flanco principal em comparação com o primeiro ensaio, tendo um leve aumento no flanco secundário. Segundo Ferraresi (2014), isso se deve ao fato da velocidade de corte ser o principal parâmetro que afeta as forças de corte, que aumenta a vibração no processo, deteriorando o acabamento superficial e enfraquecendo a ferramenta, gerando aumento no desgaste que pode levar a quebra da mesma.

Santana (2011) também já havia notado, em seu estudo, que o avanço não é um fator crucial que interfere na vida da ferramenta, causando maior influência na qualidade superficial da peça usinada.

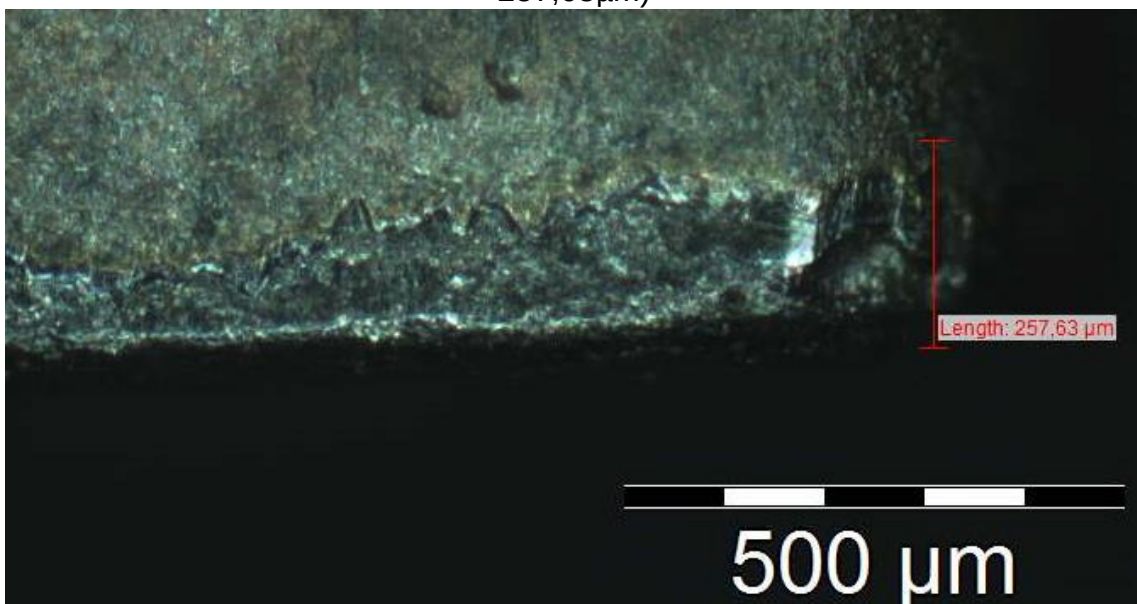
Nas Figuras 34 e 35 é possível analisar o estado das superfícies de flanco principal e secundária, respectivamente, após o término do Ensaio 2.

Figura 34– Estado final da superfície de flanco principal – Ensaio 2 (desgaste 183,05 μm)



Fonte: Autor

Figura 35 – Estado final da superfície de flanco secundária – Ensaio 2 (desgaste 257,63 μm)



Fonte: Autor.

Nas duas figuras é possível notar que, assim como no primeiro ensaio, houve desgaste por abrasão, mais notavelmente na superfície de flanco secundária, apresentando maior presença de partículas aderidas e sinais de temperaturas mais elevadas, com aparente queima em ambas as superfícies. Não são notadas avarias como lascamentos, deformação plástica, nem trincas.

4.3.3. Ensaio 3 - Velocidade de corte 250 m/min e avanço 0,1 mm/ver

A Tabela 7 demonstra o comportamento dos desgastes das superfícies de flanco principal e secundária ao longo do tempo, para o Ensaio 3.

Tabela 7 – Desgastes de flanco para o Ensaio 3

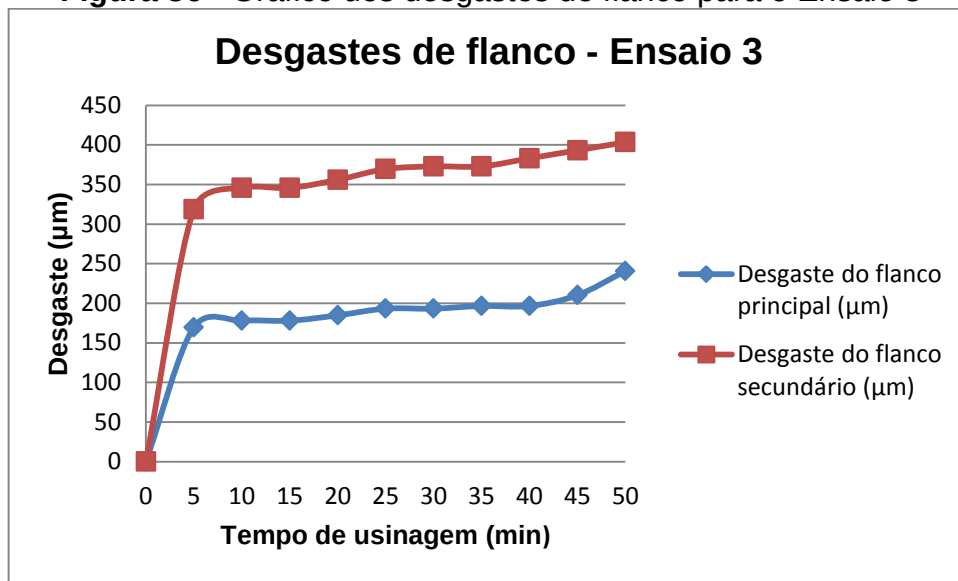
Tempo de usinagem (min)	Desgaste do flanco principal (μm)	Desgaste do flanco secundário (μm)
5	169,49	318,64
10	177,97	345,76
15	177,97	345,76
20	184,75	355,93
25	193,22	369,49
30	193,22	372,88
35	196,61	372,88
40	196,61	383,08
45	210,17	393,22
50	240,68	403,39

Fonte: Autor.

Analisando-se os valores expostos na tabela, é possível notar que neste ensaio os valores de desgaste do flanco secundário foram muito maiores do que no flanco principal, desde o início do processo de torneamento. Onde, os valores de desgaste na superfície de flanco secundária ultrapassaram o limite de desgaste de flanco médio imposto pela norma ISO 3685 (1993) como critério de fim de vida da ferramenta, que é de 300 μm , desde os primeiros 5 minutos de torneamento, chegando a 403,39 μm ao final dos 50 minutos de ensaio. Enquanto o valor máximo alcançado ao final do ensaio para o desgaste do flanco principal foi de 240,68 μm .

Hulsendeger (2017) já havia observado comportamento semelhante em seu trabalho, onde ao aplicar a maior velocidade de corte proposta, o inserto utilizado quase atingiu o valor máximo de desgaste aceitável, já no primeiro passe.

Na Figura 36 é possível observar o comportamento destes desgastes ao longo do tempo, através da representação gráfica.

Figura 36 - Gráfico dos desgastes de flanco para o Ensaio 3

Fonte: Autor.

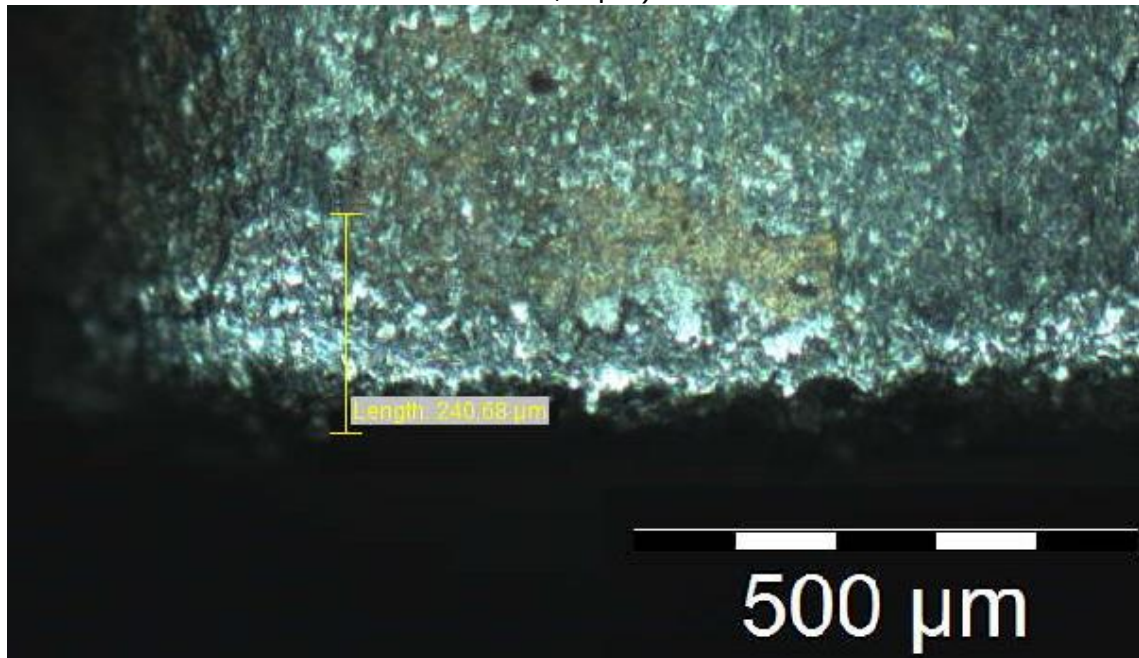
Analisando o comportamento dos desgastes de flanco para o Ensaio 3, é possível notar que, comparado aos demais, este foi o que atingiu valores de desgaste mais elevados em seu flanco secundário. Sendo o Ensaio 3 o de maior velocidade de corte entre os comparados até aqui, pode-se concluir que esse parâmetro influenciou diretamente no desgaste da superfície de flanco secundária, havendo uma relação diretamente proporcional entre essas variáveis, uma vez que a elevação da velocidade de corte ocasionou um consequente aumento expressivo do desgaste.

Pereira (2019) e Lima (2012) já haviam observado, anteriormente, que a velocidade de corte é o parâmetro mais influente no desgaste de flanco médio, afetando diretamente a vida da ferramenta de corte.

Veiga et al. (2013) afirma que o aumento da velocidade influencia na vida útil da ferramenta de corte por ser o principal parâmetro responsável pelo aumento da temperatura na região de geração do cavaco, acelerando o mecanismo de desgaste.

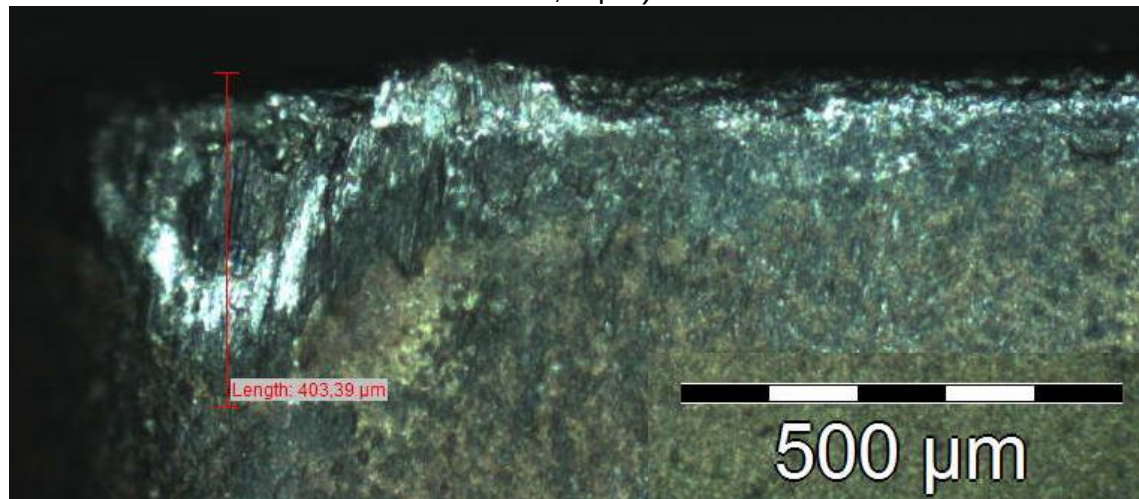
Nas Figuras 37 e 38 é possível observar o estado final das superfícies de flanco da ferramenta de corte após os 50min de usinagem.

Figura 37 – Estado final da superfície de flanco principal – Ensaio 3 (desgaste 240,68 μ m)



Fonte: Autor.

Figura 38 – Estado final da superfície de flanco secundária – Ensaio 3 (desgaste 403,39 μ m)



Fonte: Autor.

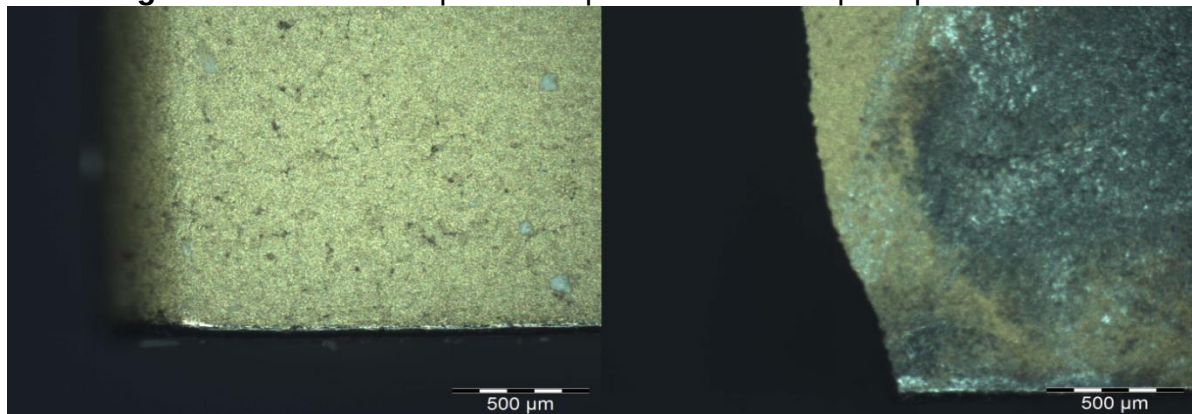
Analisando as Figuras 37 e 38, é possível comprovar, visualmente, o fato do desgaste na superfície de flanco secundária ter sido muito maior do que na superfície de flanco principal, apesar desta possuir maiores marcas de queima e maior adesão de partículas. Além disso, ocorreu, em ambas as superfícies o mecanismo de desgaste por abrasão mecânica. Sendo possível notar também, na superfície de flanco secundária, a presença de alguns sulcos verticais.

4.3.4. Ensaio 4 - Velocidade de corte 250 m/min e avanço 0,316 mm/ver

Uma vez que os valores, tanto de velocidade de corte, quanto de avanço, aplicados foram elevados, este ensaio apresentou um comportamento completamente diferente dos demais, durando apenas 1 minuto e 30 segundos. Tempo esse que foi suficiente para ocorrer fratura total da ferramenta, impossibilitando a continuidade do processo de torneamento. Devido a esse fato, não foi possível coletar os valores de desgaste ao longo do tempo, para criação do gráfico de desgaste.

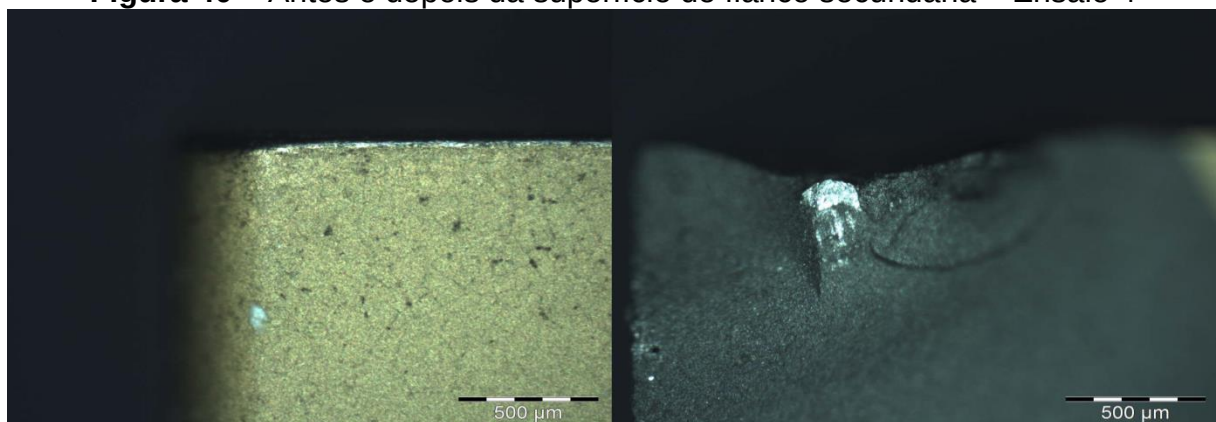
Nas Figuras 39, 40 e 41 é possível observar os estados das superfícies de flanco principal, flanco secundário e ponta da ferramenta, antes do início do ensaio e após 1 minuto e 30 segundos de torneamento.

Figura 39 – Antes e depois da superfície de flanco principal – Ensaio 4



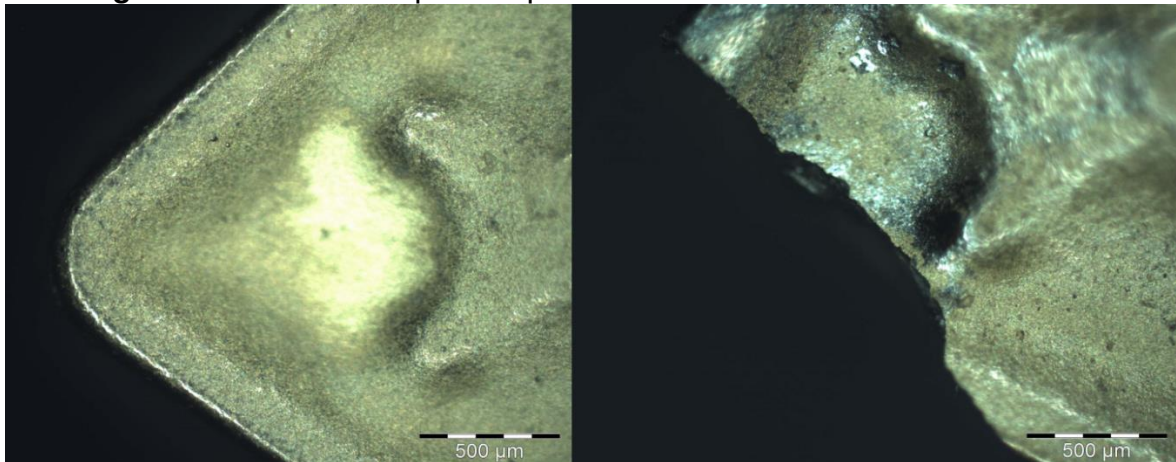
Fonte: Autor.

Figura 40 – Antes e depois da superfície de flanco secundária – Ensaio 4



Fonte: Autor.

Figura 41 – Antes e depois da ponta de ferramenta de corte – Ensaio 4



Fonte: Autor.

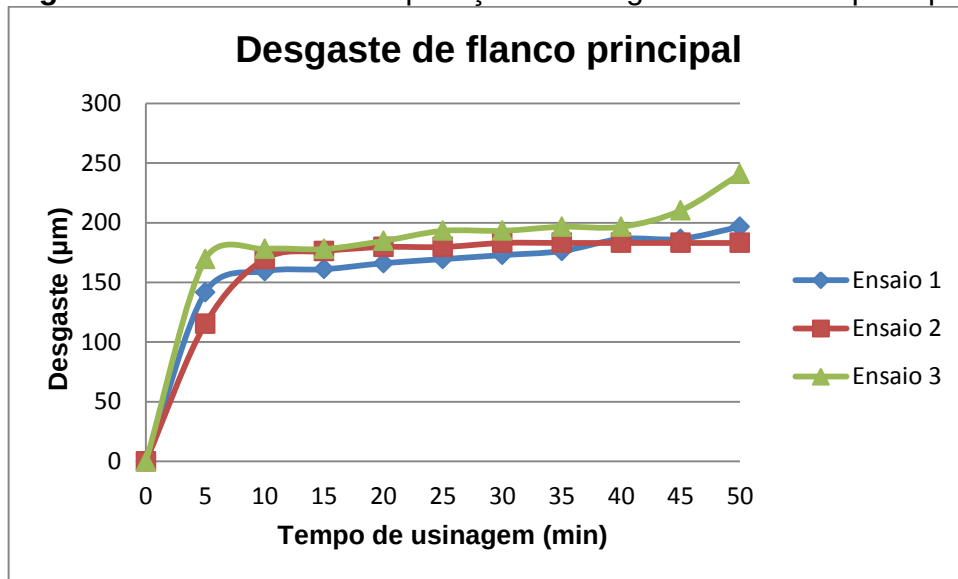
Analisando-se as figuras é possível notar a fratura ocorrida na ferramenta, onde houve a quebra e a consequente perda de uma parte desta, devido ao elevado esforço produzido na área de corte.

Ferraresi (2014) afirma que a ruptura da ponta ou da aresta cortante de uma ferramenta de corte origina-se pela ação de grandes forças de usinagem, e que isso se dá frequentemente no emprego de pastilhas de material cerâmico e de carbonetos duros, os quais são sensíveis à bruscas solicitações locais, onde quando há a combinação de altas velocidades e avanços, o trecho da ferramenta em contato com a peça enfraquece tanto que ocorre a quebra, exatamente como aconteceu no ensaio em questão.

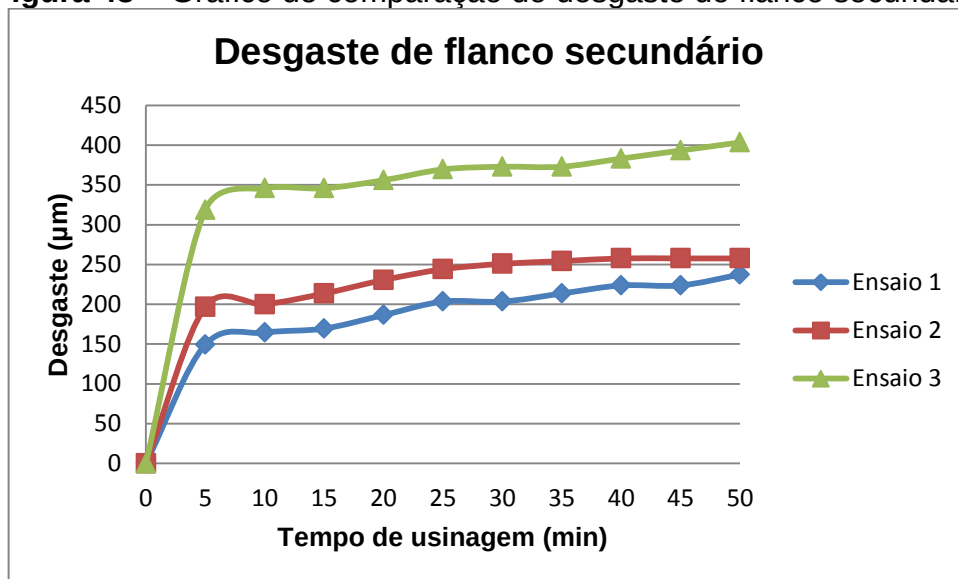
4.3.5. Comparação dos desgastes

Analisando-se os ensaios realizados, foi possível notar que o desgaste de flanco secundário foi sempre maior do que o desgaste de flanco principal. Isso se deve ao fato da angulação da ponta da ferramenta utilizada ser baixo, o que permitiu que a superfície de flanco secundária estivesse em contato com a peça por mais tempo do que a superfície de flanco principal, gerando também mais atrito e consequente maior temperatura nessa região.

Os gráficos presentes nas Figuras 42 e 43 representam uma comparação entre o comportamento do desgaste das superfícies do flanco principal e secundário, respectivamente, para os ensaios 1, 2 e 3. O ensaio de número 4 não está representado devido a impossibilidade de aquisição de dados.

Figura 42 – Gráfico de comparação do desgaste de flanco principal

Fonte: Autor.

Figura 43 – Gráfico de comparação do desgaste do flanco secundário

Fonte: Autor.

Em ambos os gráficos, é possível confirmar que o Ensaio 3 foi o que apresentou maior desgaste, tanto do flanco principal, quanto do flanco secundário, se comparado aos demais. Sendo a diferença entre os valores mais marcante no flanco secundário.

Se compararmos os ensaios com relação aos seus parâmetros aplicados, é possível notar que a velocidade de corte é o parâmetro que mais influencia no desgaste de flanco, uma vez que no Ensaio 3 foi aplicada uma velocidade de corte de 250m/min, enquanto nos ensaios 1 e 2 foi aplicada uma velocidade de

160m/min. Pereira (2019), Polly (2019) e Lima (2012) também já haviam comprovado, em seus trabalhos, o fato da velocidade de corte ser o fator mais influente no desgaste da ferramenta nos processos de usinagem.

Embora não cause uma diferença tão expressiva, o aumento do avanço também ocasionou um aumento do desgaste, se compararmos os ensaios 1 e 2, onde no 1 foi aplicada um avanço de 0,100mm/rev e no 2 um avanço de 0,316mm/rev.

Ferraresi (2014) afirma que a medida a ser tomada quando se deseja um decréscimo expressivo no desgaste da ferramenta de corte, é a diminuição da velocidade de corte, combinada com o aumento do avanço. Essa afirmação se confirma, se compararmos os resultados dos Ensaios 3 e 2, onde os valores obtidos para o desgaste de flanco secundário no Ensaio 2 (velocidade de corte 160m/min e avanço 0,316mm/rev) são bem menores do que no Ensaio 3 (velocidade de corte 250m/min e avanço 0,1mm/rev).

Se tomarmos o desgaste da superfície de flanco secundária como base, por ser a que mais sofreu a influência dos parâmetros, a situação mais desejável, com relação ao desgaste da ferramenta de corte, foi a do Ensaio 1, que atingiu o menor valor de desgaste ao final dos 50 minutos de ensaio, sendo o ensaio com menores valores aplicados de velocidade de corte e avanço entre os comparados.

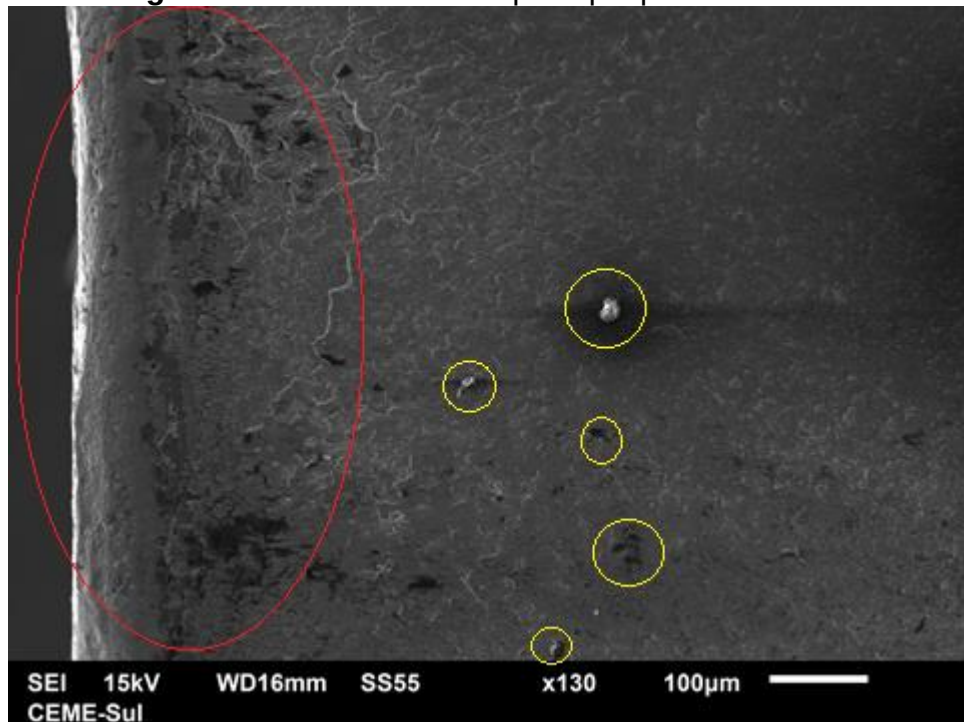
4.4. MEV

A fim de obter imagens com maior riqueza de detalhes, as ferramentas utilizadas foram analisadas através de um Microscópio Eletrônico de Varredura.

4.4.1. Análise com MEV - Ensaio 1

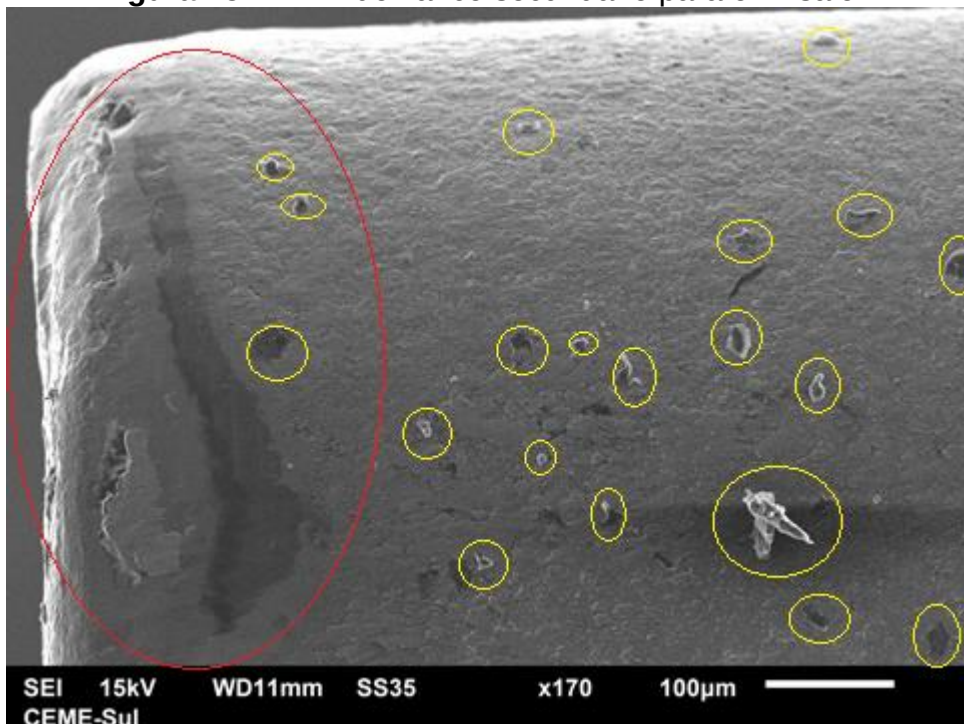
Na Figura 44, é possível analisar o desgaste na superfície de flanco principal da ferramenta utilizada no Ensaio 1 (160 m/min e 0,1mm/rev), e na Figura 45 o desgaste na superfície de flanco secundária para as mesmas condições.

Figura 44 – MEV do flanco principal para o Ensaio 1



Fonte: Autor.

Figura 45 – MEV do flanco secundário para o Ensaio 1



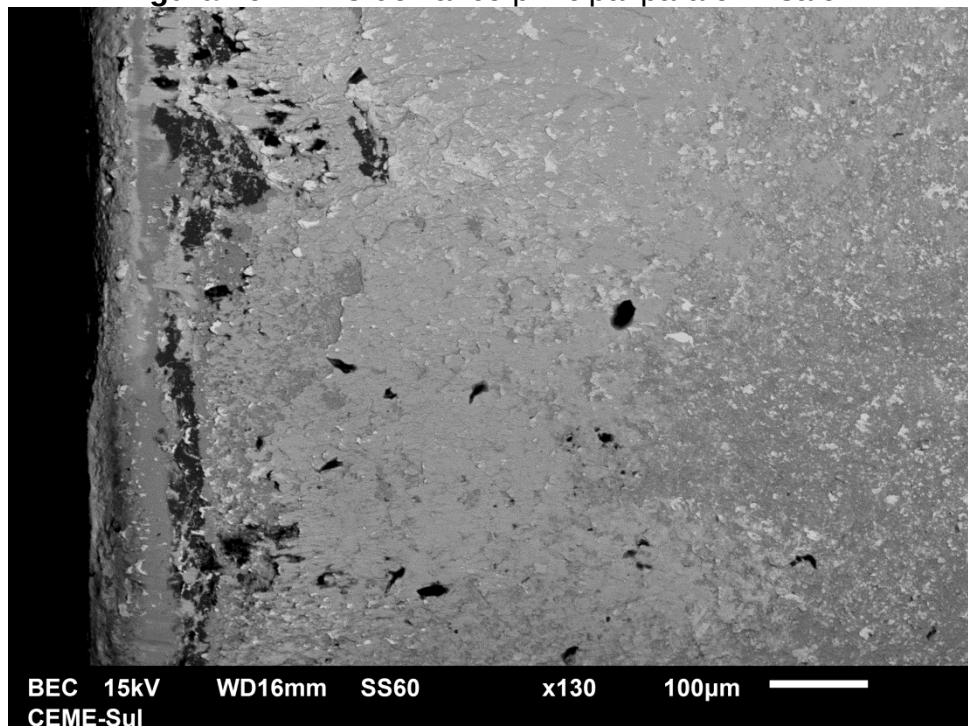
Fonte: Autor.

Analisando as Figuras 44 e 45, é possível perceber que o desgaste da ferramenta no flanco secundário atingiu maior profundidade do que no flanco

principal. Além disso, percebe-se que na superfície do flanco principal houve maior queima, enquanto na secundária, maior adesão de partículas.

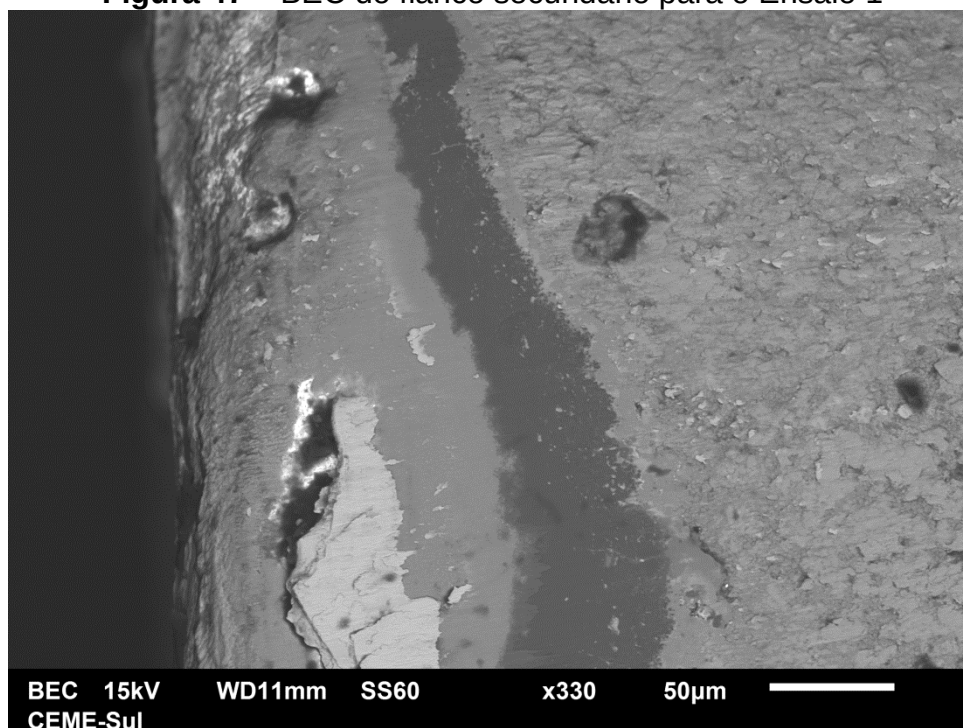
A fim de obter maiores detalhes com relação as camadas de cobertura que foram atingidas, utilizou-se um recurso do Microscópio Eletrônico de Varredura, chamado BEC, que diferencia por tonalidades os elementos químicos de acordo com seu número atômico. Os tons mais claros representam os elementos com maior número atômico e os tons mais escuros, por consequência, os elementos com número atômico mais baixo. Nas Figuras 46 e 47 é possível observar os desgastes das superfícies de flanco principal e secundário, respectivamente, com a utilização deste recurso.

Figura 46 – BEC do flanco principal para o Ensaio 1



Fonte: Autor.

Figura 47 – BEC do flanco secundário para o Ensaio 1



Fonte: Autor.

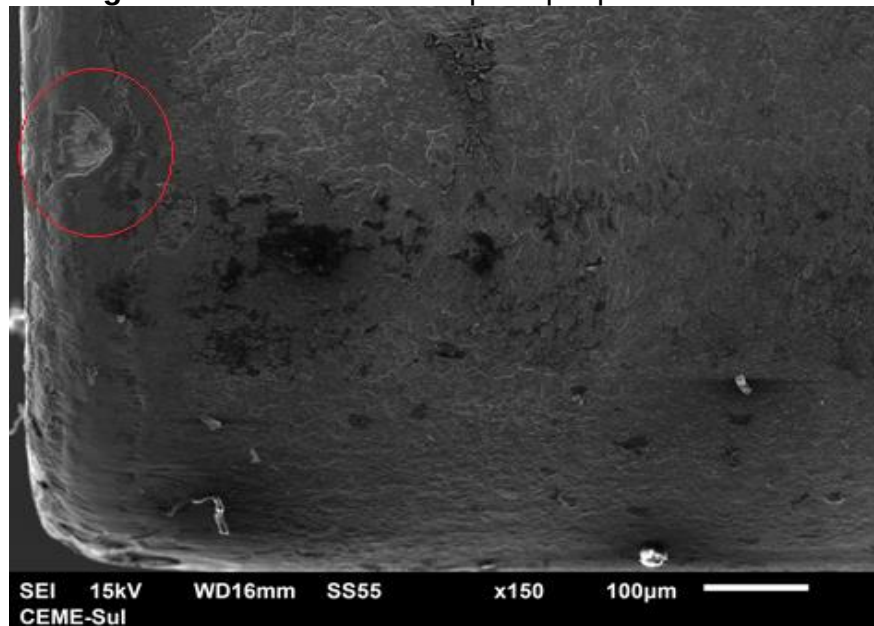
As pastilhas de metal duro utilizadas possuíam 3 camadas de cobertura, sendo a primeira de carbonitreto de titânio, a segunda de óxido de alumínio e a terceira, e última, de nitreto de titânio. Dessas camadas, a que apresenta menor número atômico é a camada de óxido de alumínio, que nas figuras está representada pela parte mais escura.

Observando-se as Figuras 46 e 47, é possível notar que, em ambas as superfícies, as camadas de nitreto de titânio e óxido de alumínio foram desgastadas, apresentando maior desgaste na superfície de flanco secundário, como já havia sido constatado. Os pontos mais claros, ao longo da camada de carbonitreto de titânio se referem à pequenas partículas desta que foram desgrudadas, expondo o metal duro, que por ter em sua composição o carboneto de tungstênio, apresenta maior número atômico e, por consequência, está representado em uma tonalidade mais clara que as demais.

4.4.1. Análise com MEV – Ensaio 2

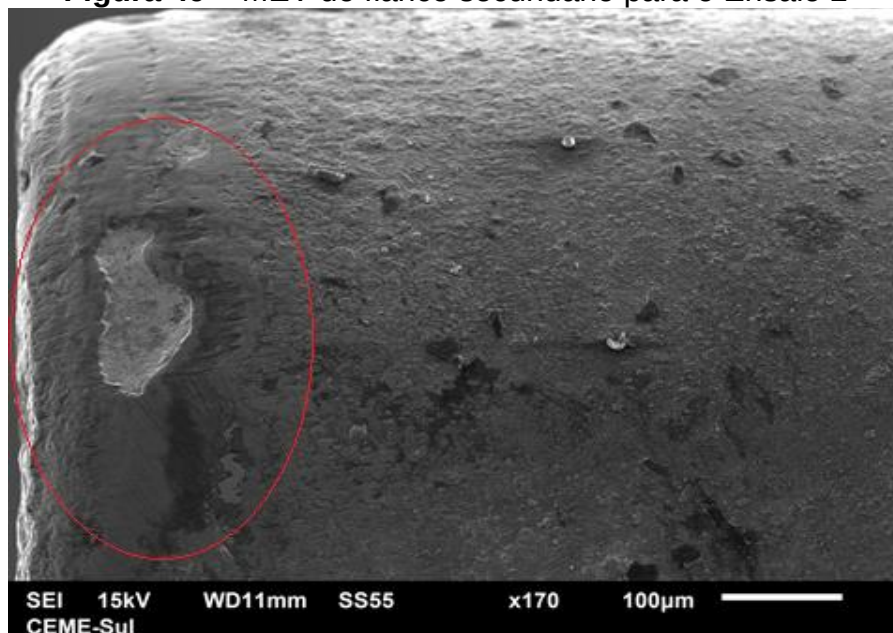
Nas Figuras 48 e 49, é possível observar as imagens de MEV referente aos flancos principal e secundário, respectivamente, para a ferramenta de corte utilizada no ensaio 2 (160m/min e 0,316mm/rev).

Figura 48 – MEV do flanco principal para o Ensaio 2



Fonte: Autor.

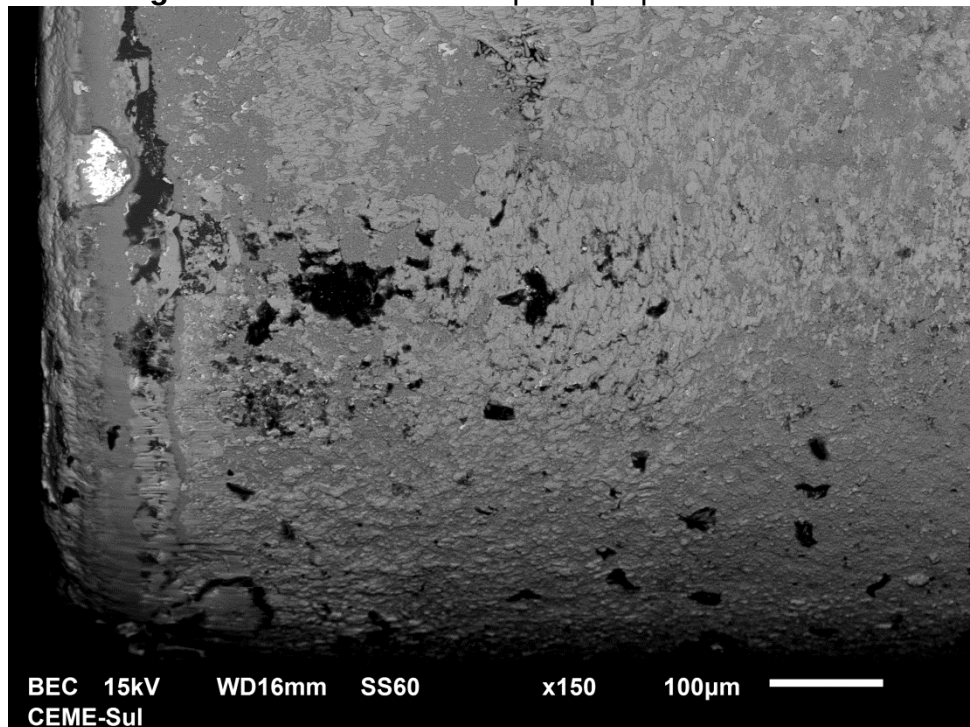
Figura 49 – MEV do flanco secundário para o Ensaio 2



Fonte: Autor.

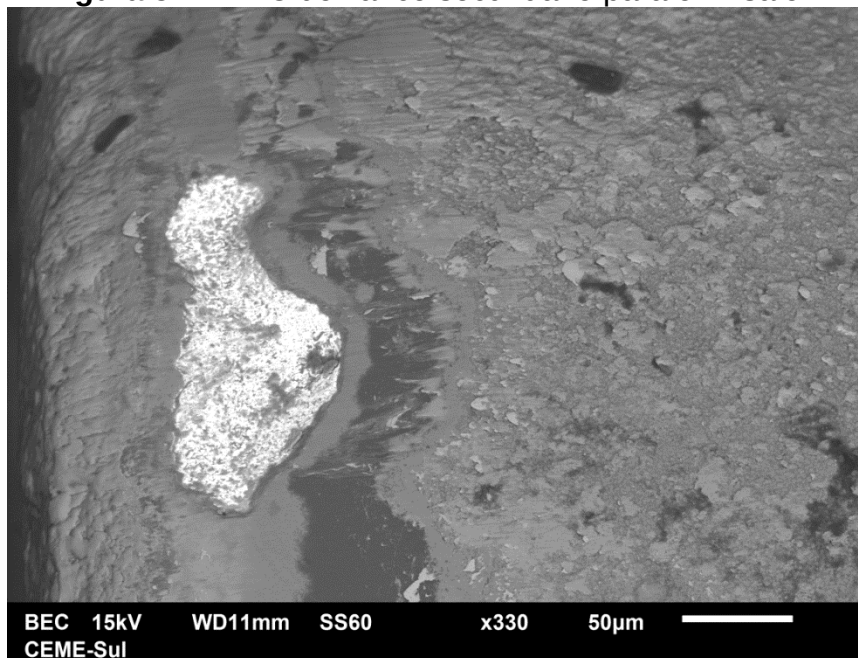
Ao observar as Figuras 48 e 49 é possível notar que, em ambas as superfícies, o desgaste apresentado para o Ensaio 2, atingiu uma maior profundidade do que no Ensaio 1, uma vez que, em algumas partes, a ferramenta chegou a perder todas as camadas de cobertura, deixando exposto o metal duro do seu núcleo. Esse fato pode ser melhor analisado nas Figuras 50 e 51, que seguem, onde o metal duro é representado pela coloração branca, que representa o material com maior número atômico em relação aos demais.

Figura 50 – BEC do flanco principal para o Ensaio 2



Fonte: Autor.

Figura 51 – BEC do flanco secundário para o Ensaio 2

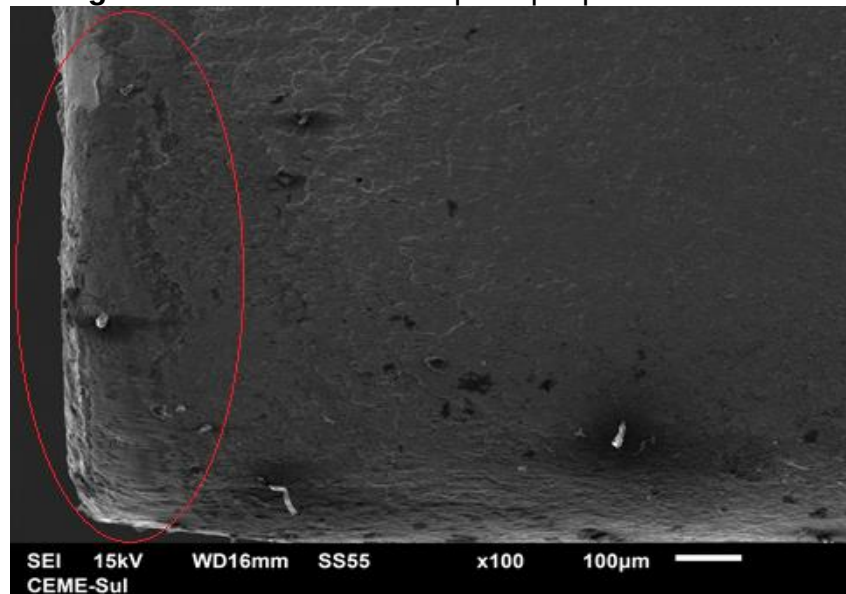


Fonte: Autor.

4.4.3. Análise com MEV – Ensaio 3

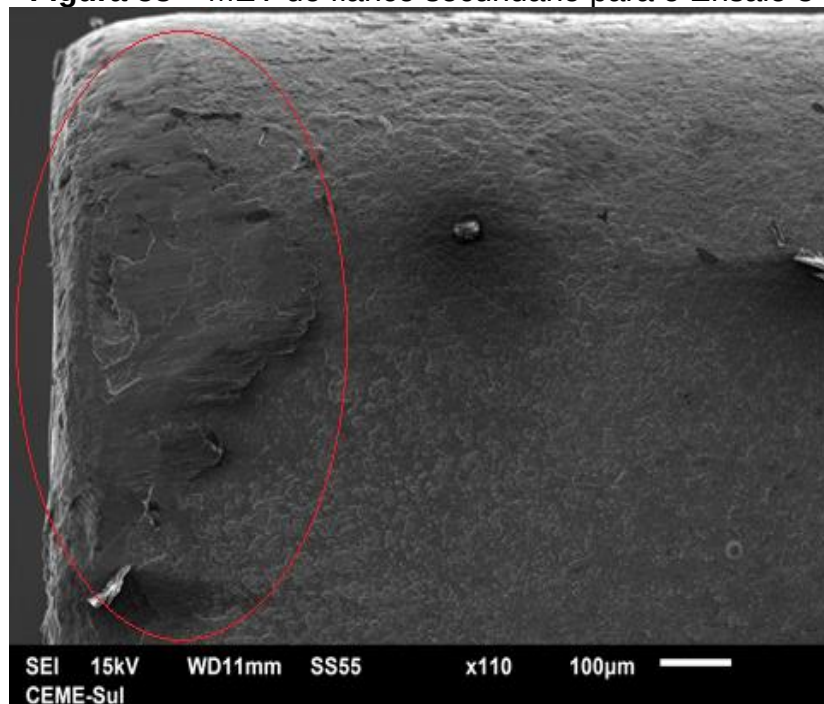
As Figuras 52 e 53 apresentam as imagens obtidas através do MEV para os desgastes de flanco principal e secundário, respectivamente, na pastilha utilizada para o Ensaio 3 (250m/min e 0,1mm/rev).

Figura 52 – MEV do flanco principal para o Ensaio 3



Fonte: Autor.

Figura 53 – MEV do flanco secundário para o Ensaio 3

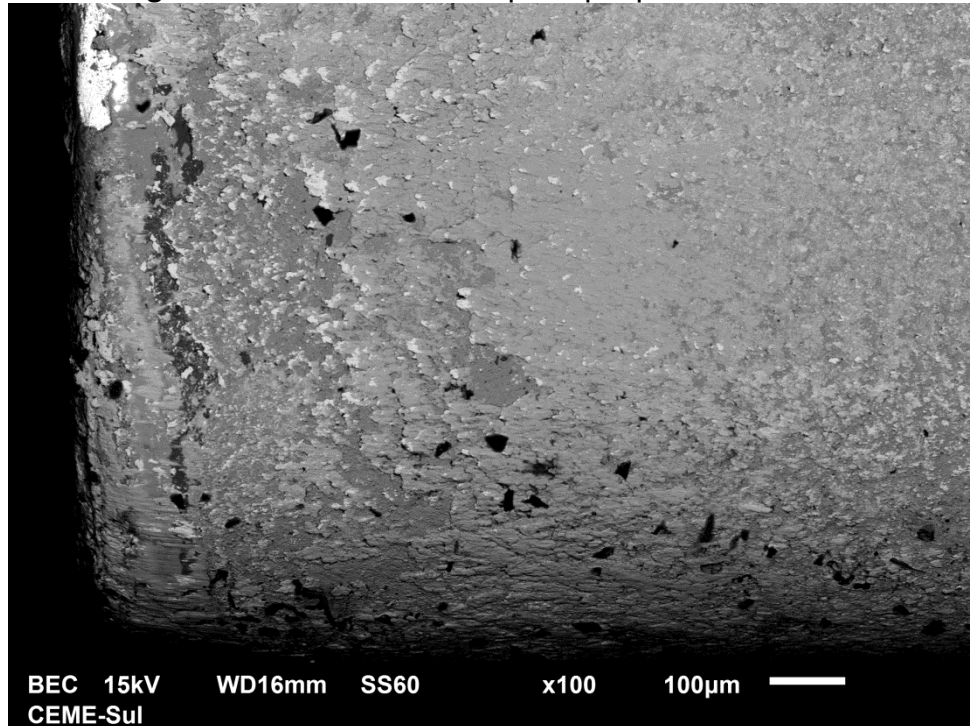


Fonte: Autor.

Fazendo-se uma comparação entre as Figuras 52 e 53, não se nota uma grande diferença em relação a profundidade do desgaste, como foi analisado nos demais ensaios, porém, é possível observar que, com relação ao comprimento, o desgaste da superfície de flanco secundária apresentou um alcance maior do que na principal. Nas Figuras 54 e 55, com o recurso do BEC, é possível analisar a situação

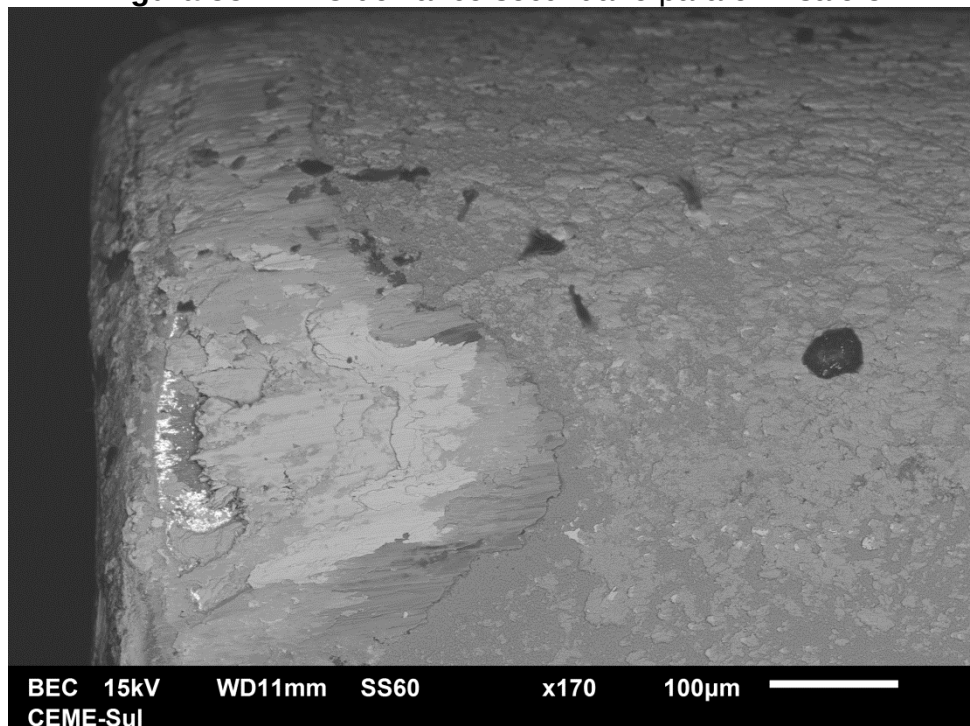
das camadas de cobertura para o flanco principal e secundário, respectivamente, para o Ensaio 3.

Figura 54 – BEC do flanco principal para o Ensaio 3.



Fonte: Autor.

Figura 55 – BEC do flanco secundário para o Ensaio 3



Fonte: Autor.

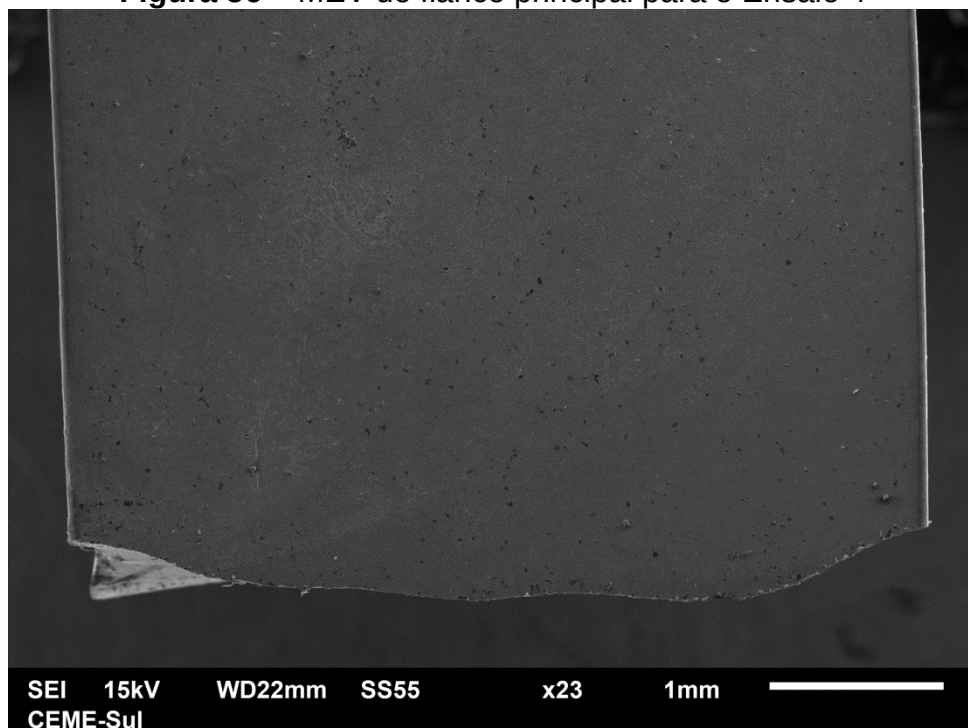
Na Figura 54 é possível observar que, em sua maior parte, houve um desgaste principalmente das camadas de nitreto de titânio e óxido de alumínio, estando o desgaste da cobertura de carbonitreto de titânio localizado apenas ao no lado contrário à ponta da ferramenta.

Analisando-se a Figura 55, nota-se que o desgaste na superfície de flanco secundária se deu em várias finas camadas de cobertura, apresentando uma pequena região de metal duro exposta.

4.4.4. Análise com MEV – Ensaio 4

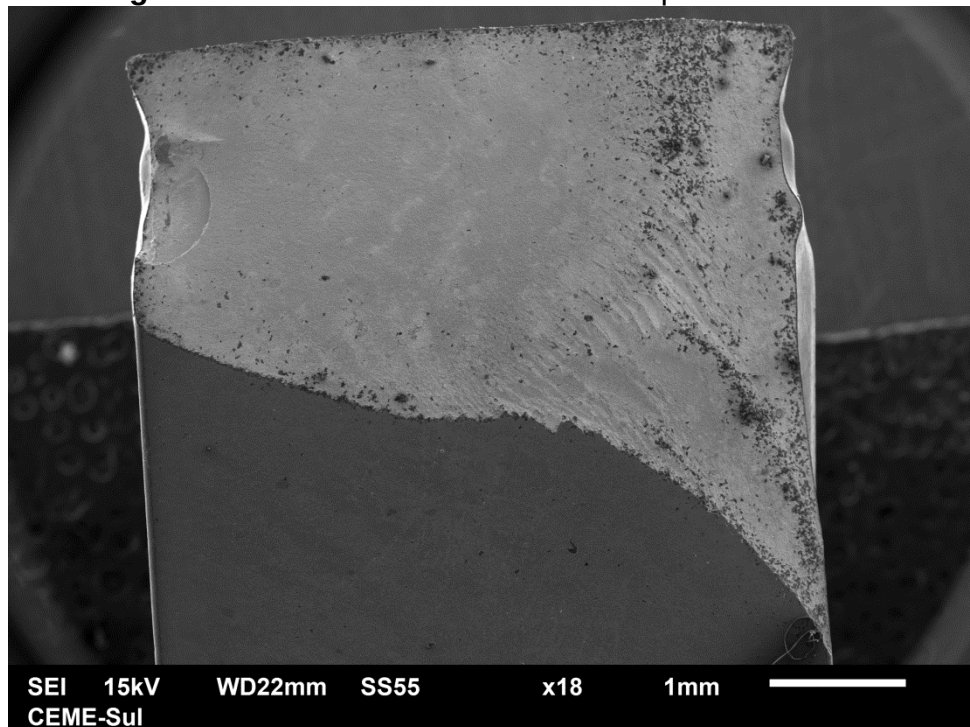
As imagens de MEV obtidas para as superfícies de flanco principal e secundária para a pastilha utilizada no Ensaio 4, encontram-se expostas nas Figuras 56 e 57, respectivamente.

Figura 56 – MEV do flanco principal para o Ensaio 4



Fonte: Autor.

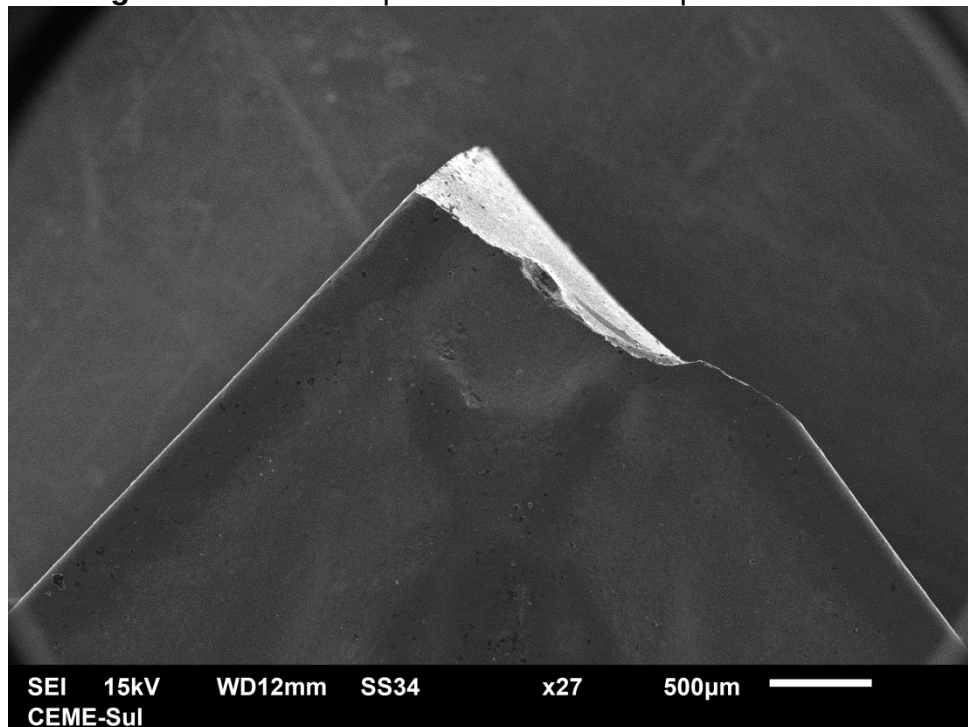
Figura 57 – MEV do flanco secundário para o Ensaio 4



Fonte: Autor.

Nas Figuras 56 e 57 é possível ver com clareza, através das imagens do MEV, como se deu a quebra da ponta da ferramenta de corte no Ensaio 4 e como ficou o perfil para cada superfície. Para este caso, nem se faz necessário o uso do BEC, uma vez que uma parte da ferramenta foi arrancada por completo, expondo completamente o núcleo de metal duro da pastilha. Para melhor visualização da quebra, neste caso, foi feita a análise com MEV também do perfil da ponta da ferramenta de corte, que pode ser visualizado na Figura 58.

Figura 58 – MEV da ponta da ferramenta para o Ensaio 4



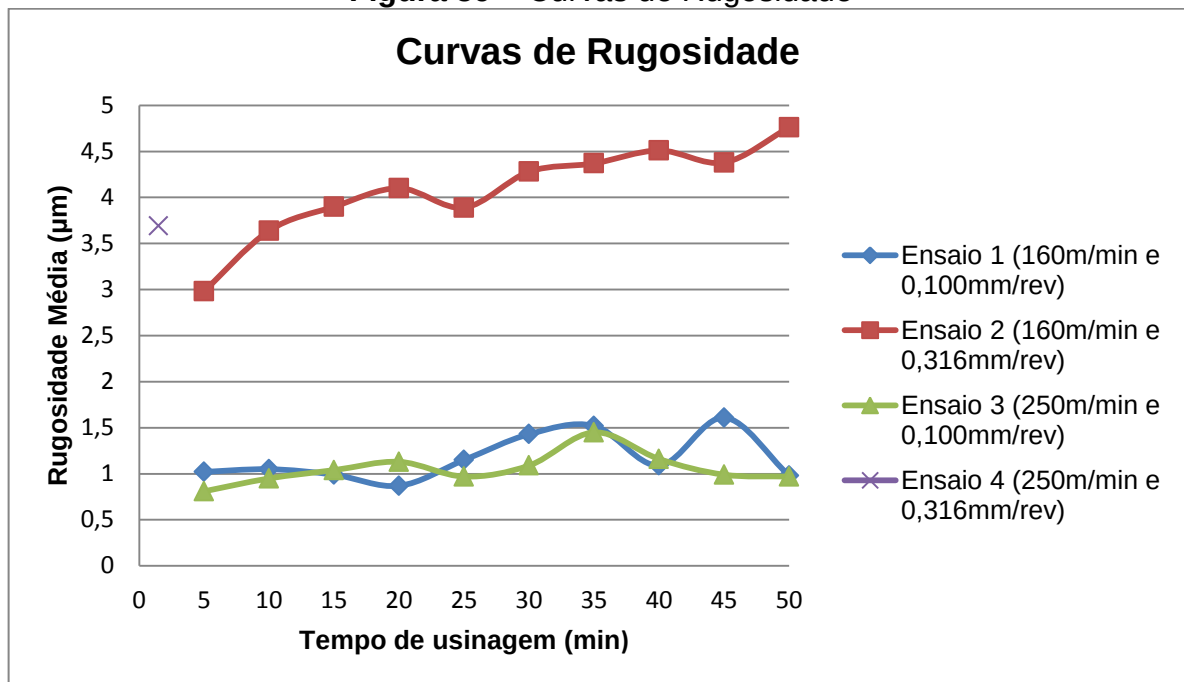
Fonte: Autor.

Analisando-se as figuras expostas, é possível ver que a superfície onde a área de quebra foi maior, foi a de flanco secundário, o que se deu, provavelmente, devido ao sentido de avanço da ferramenta na peça e consequente sentido dos esforços de corte.

4.5. Análise de rugosidade

Na Figura 59 é possível analisar o comportamento da rugosidade média (R_a) ao longo do tempo para os 4 ensaios realizados, através da representação das curvas de rugosidade. A rugosidade superficial dos corpos de prova, assim como o desgaste das ferramentas de corte, foi medida a cada 5 minutos de ensaio, com exceção do Ensaio 4 que, devido a fratura precoce da ferramenta, teve duração de apenas 1 minuto e 30 segundos, o que permitiu a coleta de apenas 1 dado para este ensaio. A rugosidade média (R_a) foi tomada como variável principal para a avaliação do acabamento superficial das peças utilizadas.

Figura 59 – Curvas de Rugosidade



Fonte: Autor.

Ferraresi (2014) afirma que o aumento do avanço em um processo de usinagem propicia uma piora no acabamento superficial da peça usinada. Esse fato se confirma na Figura 69, uma vez que os ensaios em que foi aplicado o maior valor de avanço, 2 e 4, apresentaram valores mais elevados de rugosidade média do que os demais.

Telles (2018) e Denkena et al (2015) também já haviam observado que aumentando-se o valor de avanço, obtém-se uma piora significativa na qualidade superficial, com um consequente aumento na rugosidade média do material usinado. Assim como Reis et al. (2019) e Barbosa (2019) constataram que o avanço trata-se do parâmetro mais influente sobre a rugosidade superficial em um processo de usinagem.

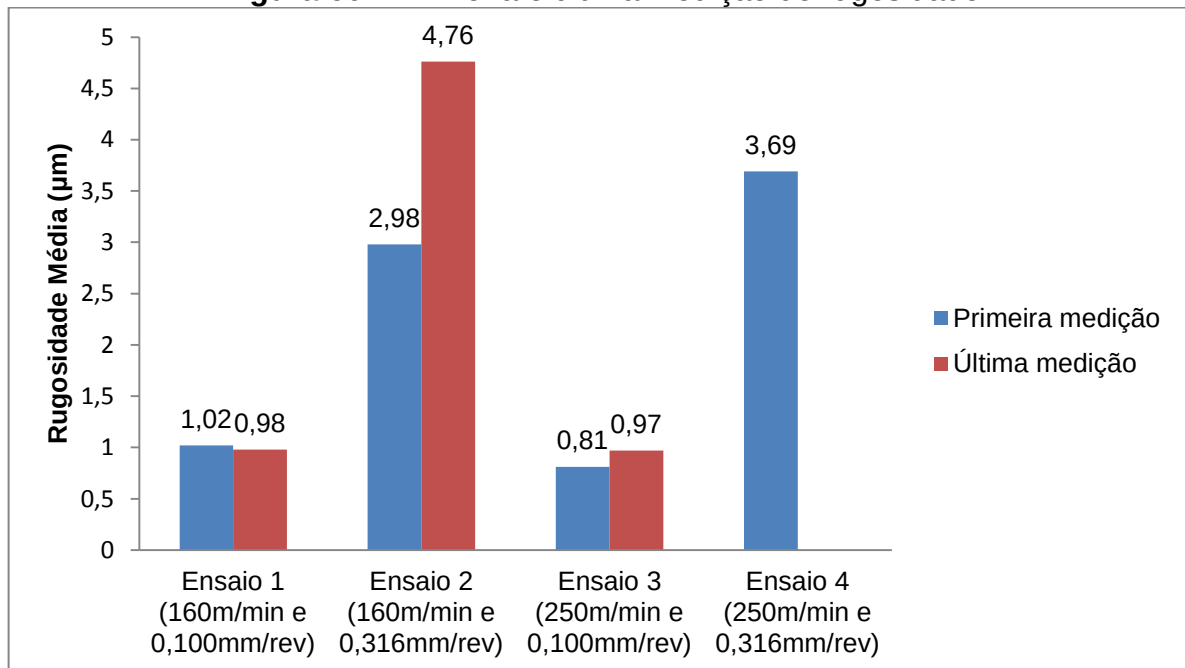
A qualidade superficial de uma peça exposta a um processo de torneamento costuma apresentar uma melhora no início, e depois uma piora considerável. Nos primeiros instantes de usinagem ocorre na superfície de saída, devido ao deslizamento do cavaco sobre a mesma, uma espécie de polimento e assentamento do cavaco, o que proporciona uma melhoria na qualidade superficial (FERRARESI, 2014). Esse comportamento pode ser notado na curva de rugosidade para o Ensaio 2, onde aos 25 minutos de ensaio apresentou uma redução do valor de rugosidade média, e posterior crescimento. Já com relação aos ensaios 1 e 3, o tempo de

torneamento analisado para esses parâmetros foi insuficiente para comprovação desse comportamento, não alcançando a piora considerável previamente esperada.

O comportamento oscilante das curvas de rugosidade para os ensaios 1 e 3 se deve à influência do cavaco na superfície da peça, uma vez que segundo Ferraresi (2014), processos de usinagem com pequenos e médios avanços possuem maior tendência a produzir cavacos contínuos, que devido a seu comprimento, podem enrolar-se na peça e causar piora na qualidade superficial.

Na Figura 60 podemos ver um comparativo entre os ensaios realizados, com relação ao primeiro e o último valor de rugosidade medido. Para os ensaios 1, 2 e 3 a primeira medição foi realizada aos 5 minutos de torneamento e a última ao fim dos 50 minutos. Já para o Ensaio 4 foi realizada uma única medida, aos 1,5 minutos de usinagem, devido a sua curta duração e falha precoce.

Figura 60 – Primeira e última medição de rugosidade



Fonte: Autor.

Observando a Figura 60, é possível notar que o ensaio que apresentou menores valores de rugosidade média superficial foi o ensaio 3, onde houve aplicação da maior velocidade de corte, e o menor avanço. Comportamento semelhante também foi observado por outros autores em seus trabalhos, Muhl (2019) e Kikukawa et al (2019), que constatarem que a rugosidade de uma peça

usinada tende a reduzir com o aumento da velocidade de corte, quando se utiliza baixos valores de avanço.

O aumento do avanço gera um aumento da atuação da força de corte, o que leva a uma deterioração do acabamento superficial e ao enfraquecimento da ferramenta. Enquanto o avanço se provou importante parâmetro para regular a rugosidade da peça, a velocidade de corte teve uma influência relativamente pequena.

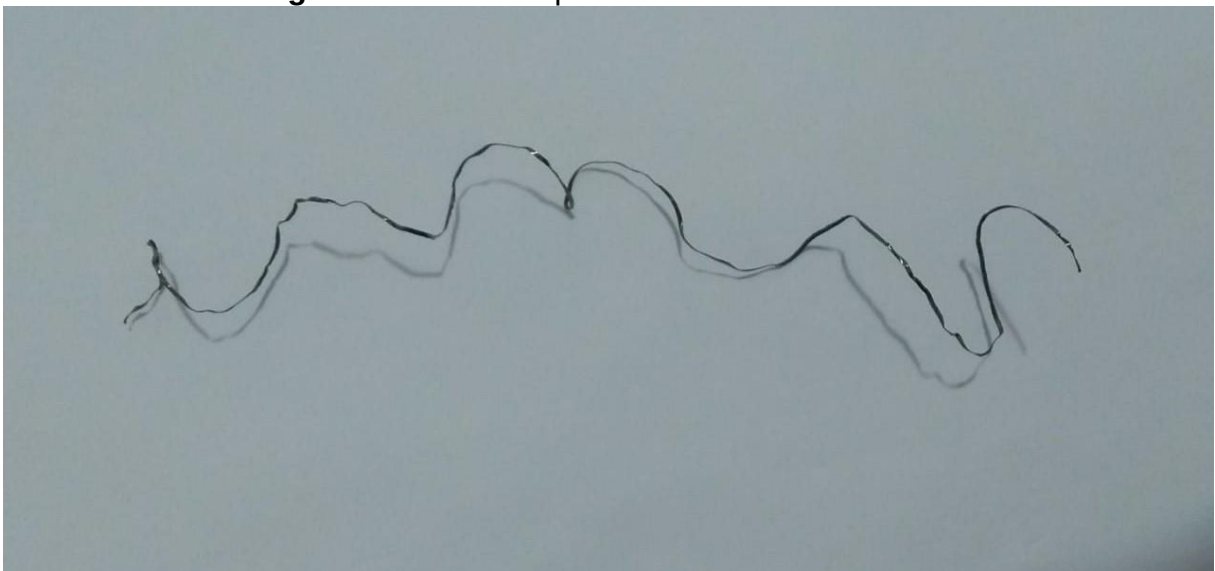
Aouici (2013) afirma que a rugosidade de uma superfície aumenta com o avanço devido a geração de sulcos helicoidais, resultado do movimento da ferramenta sobre a superfície da peça. Sulcos esses que tornam-se mais amplos e profundos, a medida que o avanço aumenta.

Ferraresi (2014), por sua vez, afirma que o aumento do avanço gera elevação da área da secção de corte, acarretando forças de corte maiores, as quais poderão originar trepidação na ferramenta e na máquina prejudicando o acabamento superficial.

4.6. Análise do cavaco

Na Figura 61 é possível analisar visualmente o formato do cavaco produzido para os ensaios de número 1 e 3, possuindo as mesmas características de formato e comprimento.

Figura 61 – Cavaco produzido nos Ensaios 1 e 3



Fonte: Autor.

Analisando a Figura 61 é possível notar que o cavaco produzido para os Ensaios 1 e 3 trata-se de um cavaco do tipo contínuo de formato fita emaranhado,

com comprimento de 180 mm, o que caracteriza um cavaco indesejável, devido ao fato de possuir a característica de enrolar-se na peça durante a usinagem, influenciando na qualidade superficial da peça e também oferecendo perigo para o operador ao soltar-se.

Na Figura 62 é possível analisar o tipo e o formato de cavaco obtido ao longo do Ensaio 2.

Figura 62 – Cavaco produzido no Ensaio 2



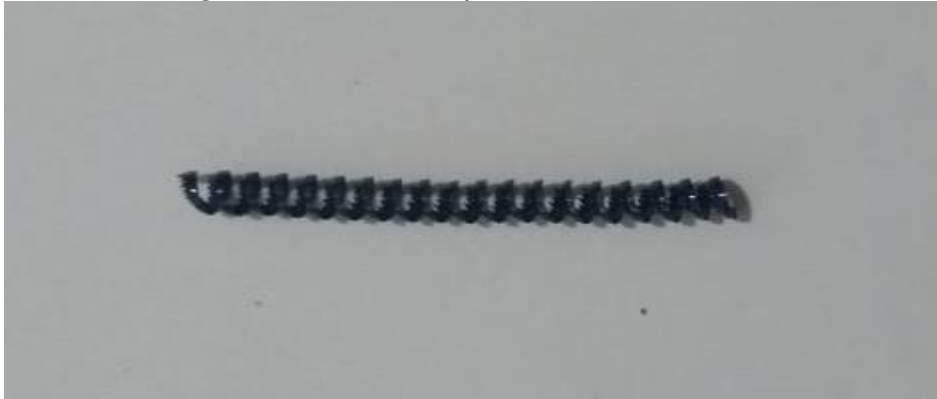
Fonte: Autor

Observando o cavaco exposto na Figura 61, é possível notar que é bem diferente do apresentado na Figura 62, embora caracterize também um cavaco contínuo, este tem o formato de hélice longa, possuindo um comprimento de 65mm. Além de diferir do cavaco dos ensaios 1 e 3 em formato e tamanho, esse também difere na cor, uma vez que apresenta coloração mais escura e azulada, enquanto o cavaco da Figura 61 é de cor prata e de coloração mais clara. Essa coloração mais escura do cavaco exposto na Figura 62 se deve ao fato do Ensaio 2 ter atingido temperaturas mais altas, como menciona Santana (2011) no seu trabalho.

Reis et. al. (2019) também comenta sobre a coloração do cavaco em seu trabalho, onde afirma que a coloração azul está relacionada a uma fina camada de óxido, que é formada poucos segundos após a constituição do cavaco, na presença de maiores temperaturas.

Na Figura 63 é possível analisar o cavaco produzido no Ensaio 4, que possui uma aparência muito semelhante ao obtido no Ensaio 2, porém com menor comprimento.

Figura 63 – Cavaco produzido no Ensaio 4



Fonte: Autor

O cavaco produzido no Ensaio 4 trata-se de um cavaco contínuo de formato hélice, assim como o do Ensaio 2, porém apresentando um comprimento menor, de 35mm.

Fazendo uma comparação entre as características dos cavacos produzidos nos ensaios analisados, é possível notar que o parâmetro que mais influenciou em seu formato foi o avanço de corte, assim como garante Ferraresi (2014), uma vez que os ensaios 1 e 3, apesar de realizados com velocidades de corte diferentes, apresentaram o mesmo comportamento do cavaco, devido ao fato de possuírem valor igual de avanço, 0,1mm/rev. Já os ensaios 2 e 4 apresentaram características diferentes dos 1 e 3 por serem submetidos a avanço maior, de 0,316mm/rev, o que influenciou, também, na temperatura de torneamento, deixando o cavaco com a coloração mais escura, o que caracteriza altas temperaturas no processo.

Comparando-se os ensaios 2 e 4 entre si, de acordo com o cavaco produzido, é possível concluir que no ensaio de maior velocidade, Ensaio 4, o cavaco apresentou menor comprimento, apesar de manter o mesmo tipo, formato e coloração que no Ensaio 2.

Entre os tipos de cavaco produzidos neste trabalho, o que oferece menos perigo para o operador e causa menor influência na qualidade superficial, é o resultante do Ensaio 4, de maior avanço e maior velocidade, que devido ao seu formato e comprimento desprende-se mais facilmente da peça.

5. CONCLUSÕES

Com a realização dos experimentos ao longo deste trabalho foi possível concluir que:

- Tanto a velocidade de corte quanto o avanço apresentaram influência no desgaste da ferramenta de corte. Embora a velocidade de corte tenha apresentado maior destaque, é importante sempre buscar uma combinação adequada desses parâmetros;
- A superfície de flanco secundária da ferramenta apresentou maior desgaste do que a superfície de flanco principal, sendo os principais mecanismos de desgaste analisados a abrasão, a adesão e o lascamento;
- A combinação de parâmetros que propiciou o menor desgaste de flanco secundário, e consequente maior vida da ferramenta, foi a de velocidade de corte de 160m/min e avanço de 0,1mm/rev;
- Com relação à integridade superficial das peças usinadas, o parâmetro que mais influenciou na rugosidade média foi o avanço de corte, sendo a melhor situação analisada para este caso a de maior velocidade, 250m/min, e menor avanço. 0,1mm/rev;
- Entre os parâmetros de corte analisados, o que causou maior influência no formato dos cavacos produzidos foi o avanço.

6. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

- Utilizar mais parâmetros de avanço e velocidade de corte, variando também a profundidade de corte;
- Realizar análise das forças de corte;
- Comparar desgastes de ferramentas com outros tipos de recobrimento;
- Comparar o desgaste da ferramenta com o SAE 4140 na usinagem de outros tipos de aço;
- Fazer uma análise de outros parâmetros de rugosidade, além da rugosidade média;
- Comparar a integridade superficial com e sem a utilização de fluido de corte.

7. REFERÊNCIAS

7.1. Referências Nominais

ABNT NBR ISO 3685. **Ensaio de vida da ferramenta de ponta única para torneamento**. 2017.

ABNT NBR ISO 4287. **Especificações geométricas do produto (GPS) - Rugosidade: Método do perfil - Termos, definições e parâmetros da rugosidade**. 2002.

ALMEIDA, C. M. **Avaliação do desgaste da ferramenta de metal duro revestida com TiN no fresamento do aço ABNT 4140 laminado a quente e temperado/revenido**. Dissertação de Mestrado. Pontífica Universidade Católica de Minas Gerais. Belo Horizonte, 2010.

ALVES, S. M.; OLIVEIRA, J. F. G. Novos fluidos de corte adequados ao desempenho mecânico da retificadora e ao meio ambiente. **Revista Máquinas e Metais**. São Paulo, p. 28-43, janeiro, 2006.

AMANCIO, D. A. **Produção e caracterização do Metal Duro – Carboneto de Tungstênio (WC) com adição de aço inoxidável AISI316L como substituinte do Cobalto**. Tese de Doutorado. Universidade Federal de Itajubá, Itajubá, MG, 2018.

AMORIM, H. J. **Estudo da relação entre velocidade de corte, desgaste de ferramenta, rugosidade e forças de usinagem em torneamento com ferramentas de metal duro**. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, RS, 2002.

AOUICI, H. Experimental investigation of cutting parameters influence on surface roughness and cutting forces in hard turning of X38CrMoV5-1 with CBN tool. **Sadhana**, v. 38, n.3, p.429-445, jun. 2013.

BARBOSA, L. W. G. **Influência dos parâmetros de usinagem na integridade superficial da liga biomédica de CoCr ASTM F75**. Dissertação de Mestrado. Universidade Estadual de Campinas, Campinas, SP, 2019.

CORRÊA, J. G.; SCHROETERB, R. B.; MACHADO, A. R. Tool life and wear mechanism analysis of carbide tools used in the machining of martensitic and supermartensitic stainless steels. **Tribology International**, v.105,102–117, 2017.

DAVOODI, B.; TAZEHKANDI, A. H. Experimental investigation and optimization of cutting parameters in dry and wet machining of aluminum alloy 5083 in order to remove cutting fluid. **Journal of Cleaner Production**, v. 68, p. 234-242, 2014.

DENKANA, B.; GROVE, T.; MAISS, O. Influence of the cutting edge radius on surface integrity in hard turning of roller bearing inner rings. **Production Engineering**, v. 9, n. 3, p.299-305, 6 maio 2015.

DINIZ, A.E; MARCONDES, F. C; COPPINI, N.L. **Tecnologia da Usinagem dos Materiais**. 9ª. Ed. São Paulo: Artliber, 270 p, 2014.

ESPINDOLA, E. S. C. **Aplicação de técnicas de usinagem ambientalmente amigáveis no processo de torneamento radial do aço SAE 1045**. Dissertação de mestrado. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto alegre, RS, 2016.

FAVORIT. **Características e aplicações de aços para construção mecânica**. Catálogo Técnico, 2006.

FERRARESI, D. **Fundamentos da Usinagem dos Metais**. 17ª Ed. São Paulo, Editora Edgard Blücher Ltda, 751 p, 2014.

FERREIRA, M. **Avaliação do desgaste da ferramenta de metal duro revestida com TiN no fresamento do aço ABNT4140 a seco e com fluido sintético 8% em água**. Dissertação de Mestrado. Pontífica Universidade Católica de Minas Gerais. Belo Horizonte, 2011.

GALVÃO, A. O.; VALCACER, S. M.; ANDRADE, S. S.; FELIPE, R. C.; MACHADO, T. G. **Análise do tratamento térmico de Recozimento aplicado ao Aço SAE 1045**. Centro Federal de Educação Tecnológica do Rio Grande do Norte, Departamento Acadêmico de Tecnologia Industrial, Natal, RN, 2015.

GGD METALS. **Aço 4140**. Catálogo. São Paulo, SP, 2015.

GONG, F.; ZHAO, J.; JIANG, Y.; TAO, H.; LI, Z.; ZANG, J. Fatigue failure of coated carbide tool and its influence on cutting performance in face milling SKD11 hardened

steel. **International Journal of Refractory Metals and Hard Materials**, v.64, 27–34, 2017.

GU, J.; BARBER, G.; TUNG, S.; GU, R. Tool life and wear mechanism of uncoated and coated milling inserts. **Wear**, v. 225-229, p. 273-284, 1999.

GUPTA, M. K. e SOOD, P. K. Surface roughness measurements in NFMQL assisted turning of titanium alloys: An optimization approach. **Friction**, vol. 5, p. 155-170, 2017.

HESSAINIA, Z.; BELBAH, A.; YALLESE, M. A.; MABROUK, T.; RIGAL, J. On the prediction of surface roughness in the hard turning based on cutting parameters and tool vibrations. **Measurement**, v. 46, n. 5, p.1671-1681, jun. 2013.

HÜLSENDEGER, G. V. C. **Desgastes e vida de ferramentas de metal-duro classes ISO-P e ISO-S durante o torneamento duro do aço SAE 4140 no corte a seco e com MQL**. Trabalho de Conclusão de Curso. Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2017.

KEBLOUTI, O. *et al.* Modeling and multi-objective optimization of surface roughness and productiv-ity in dry turning of AISI 52100 steel using (TiCN-TiN) coating cermet tools. **International Journal of Industrial Engineering Computations**, v.8, pp.71–84, 2017.

KHRAIS, S.K.; LIN, Y.J. Wear mechanisms and tool performance of TiAlN PVD coated inserts during machining of AISI 4140 steel. **Wear**, vol 262, p. 64-69, 2007.

KIKUKAWA, J. K.; HELENA, F. L.; SILVA, T. R.; LEITE, S. S. Análise do processo de torneamento em relação a rugosidade superficial do aço SAE 1010. **Revista Engenharia em Ação UniToledo**, Araçatuba, SP, v. 04, n. 02, p. 96-113, jul./dez. 2019.

KORKUT, I.; DONERTAS, M.A. The influence od feed rate and cutting speed on the cutting forces, surface roughness and tool-chip contact length during face milling. **Materials & Design**, vol 28, p. 308-312, 2007.

LAURO, C.H; BRANDÃO, L.C; BALDO, D; REIS, R.A; DAVIM, J.P. Monitoring and processing signal applied in machining processes - A review. **Measurement**, v. 58, p. 73–86, 2014.

LIMA, F. D. F. **Estudo do desgaste de ferramentas de metal duro e cerâmicas no torneamento do Inconel® 751 e Inconel® 718**. Tese de Doutorado. Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, MG, 2012.

MACHADO, A. R.; ABRÃO, A. M.; COELHO, R. T.; SILVA, M. B. **Teoria da Usinagem dos Materiais**. São Paulo: Edgar Blücher, 2009.

MACHADO, A.R.; SILVA, M.B. **Usinagem dos Materiais**. Universidade Federal de Uberlândia, 8ª edição, 2004.

MUHL, R.T. **Otimização dos Parâmetros de Usinagem de Acabamento Através da Rugosidade no Torneamento do aço ABNT 4340**. Dissertação de Mestrado. Universidade de Passo Fundo. Passo Fundo, RS, 2019.

NALBANT, M.; GOKKAYA, H. The effects of cutting tool geometry and processing parameters on the surface roughness of AISI 1030 steel. **Materials & Design**, vol 28, p. 717-721, 2007.

NEVES, T. B. **Definição de Parâmetros de Utilização para Ferramentas de Corte com Insertos PCD**. Dissertação de Mestrado. Instituto Politécnico de Leiria, Leiria, SP, 2017.

NAITZKE, D. A. C.; BARRIONUEVO, G.; NARDIN, L. V.; SILVA, R.; PEREIRA, R. L.; LEITE, S. S. Análise da rugosidade superficial do aço sae1020 no processo de torneamento. **Revista Engenharia em Ação UniToledo**, Araçatuba, SP, v. 04, n. 02, p. 81-95, jul./dez. 2019.

OLIVEIRA, A. J.; DINIZ, A. E. Tool life and tool wear in the semi-finish milling of inclined surfaces. **Journal of Materials Processing Technology**, vol 209, p. 5448-5455, 2009.

OLIVEIRA, J. F. G.; ALVES, S. M. Adequação ambiental dos processos usinagem utilizando Produção mais Limpa como estratégia de gestão ambiental. **Production**, v.17 n.1 São Paulo jan./abr. 2007.

PANJAN, J.; NAVINSEK, B.; CEKADA, M. A new experimental method for studying the cracking behaviour of PVD multilayer coating. **Surface and Coating Technology**, nº 174-175, 55-62, 2003.

PARRA, B. S.; GENNARI, R. C.; MELCHIADES, F. G.; BOSCHI, A. O. Rugosidade Superficial de Revestimentos Cerâmicos. **Revista Cerâmica industrial**, Março-Abril, 2006.

PEREIRA, V.P. **Análise da temperatura ótima de corte para o par: metal duro revestido vs. aço ABNT 1045**. Dissertação de mestrado. Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, MG, 2019.

PERVAIZ, S.; RASHID, A.; DEIAB, I.; NICOLESCU, C. M. Influence of Tool Materials on Machinability of Titanium- and Nickel-Based Alloys: A Review. **Materials and Manufacturing Processes**, vol. 29, p. 219-252, 2014.

PINTO, V. C. **Influência dos parâmetros de corte na integridade superficial do aço SAE 1045 após torneamento**. Dissertação de mestrado. Universidade Federal do Rio Grande do Norte, 2017.

POLLY, M. S. **Análise comparativa de ferramentas de metal-duro classe s e cerâmica mista no torneamento a seco e com MQL do aço SAE 4340 endurecido**. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, RS, 2019.

QEHAJA, N.; JAKUPI, K.; BUNJAKU, A.; BRUÇI, M.; OSMANI, H. Effect of Machining Parameters and Machining Time on Surface Roughness in Dry Turning Process. **Procedia Engineering**, v. 100, p.135-140, 2015.

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

RATNAM, M. Factors Affecting Surface Roughness in Finish Turning. **Comprehensive Materials Finishing**, Elsevier, p.1-25, 2017.

REIS, B.C.M.; PEREIRA, N.F.S.; SANTOS, A.J.; CÂMARA, M.A.; FARIA, P.E.; RODRIGUES, P.C.M.; RU-BIO, J.C.C. Influência do material da ferramenta de

corte sobre a usinabilidade do aço ABNT 4340 no torneamento. **Revista Matéria**, v.24, n.1, 2019.

ROSA, G. C.; SOUZA, A. J.; POSSAMAI, E. V.; AMORIM, H. J.; NEIS, P. D. Wear analysis of ultra-fine grain coated carbide tools in hard turning of AISI 420C stainless steel. **21st International Conference on Wear of Materials, Wear**, v.376-377, 172–177. 2017.

SAHOO, A. K.; SAHOO, B. Experimental investigations on machinability aspects in finish hard turning of AISI 4340 steel using uncoated and multilayer coated carbide inserts. **Measurement: Journal of the International Measurement Confederation**, v. 45, n. 8, p. 2153–2165, 2012.

SANDVIK COROMANT. **Ferramentas para Torneamento**. AB Sandvik Coromant, Catálogo, Brasil, 2002.

SANDVIK COROMANT. **Manual Técnico de Usinagem**. AB Sandvik Coromant, Brasil, 2005.

SANTANA, M. S. **Estudo de parâmetros de usinagem do aço sae 4140 no torneamento cnc**. Trabalho de Conclusão de Curso. Universidade Federal de Sergipe. São Cristóvão, SE, 2011.

SANTOS, S.; SALES, W. **Aspectos Tribológicos da usinagem dos materiais**. Ed. Artliber, 2014.

SENAI. **Rugosidade Superficial nas Operações de Torneamento**. Santa Bárbara do Oeste, São Paulo.

SHENG, J.; CHIU, Y. J.; LIN, B. J. Determination of a coupling equation for milling parameters based on optimal cutting temperature. **International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, London, 2017.

SILVA, C. ; OLIVEIRA, V.; FAGUNDES, A. B. ; BEUREN, F. H. ; PEREIRA, D. Melhoria da gestão sustentável na afiação de ferramentas em uma indústria metalúrgica através da produção mais limpa. **Revista Produção Industrial & Serviços** . v. 6, n. 2, 2019.

SOUSA, L. F.; SOUZA, J. V. C.; SANTOS, C.; SILVA, O. M. M.; MACHADO, J. P. B.; AVILA, R. F. Influência da Velocidade de Corte na Usinagem do Ferro Fundido Nodular Utilizando Ferramentas Cerâmicas de Alumina. **Cadernos UniFOA**, v. 7, n. 2, p. 45-51, dez 2012.

STOLL, A. Inovações na usinagem de grandes séries dentro de uma montadora. **Revista Máquinas e Metais**, São Paulo, n. 514, p. 42-57, nov 2008.

TEDESCO, M. E. **Variação dimensional e microestrutural do aço AISI 4140 em peças usinadas por torneamento**. Dissertação de mestrado. Universidade de Caxias do Sul, Programa de Pós-Graduação em Materiais, 2007.

TELLES, F. **Avaliação da rugosidade no torneamento de acabamento em titânio comercialmente puro grau 4 sob uma perspectiva de usinagem ambientalmente amigável**. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, RS, 2018.

TELES, J. M. **Torneamento de ferro fundido nodular ferritizado com nióbio utilizando ferramenta de metal duro**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Universidade Federal de Itajubá, Itajubá, 2007.

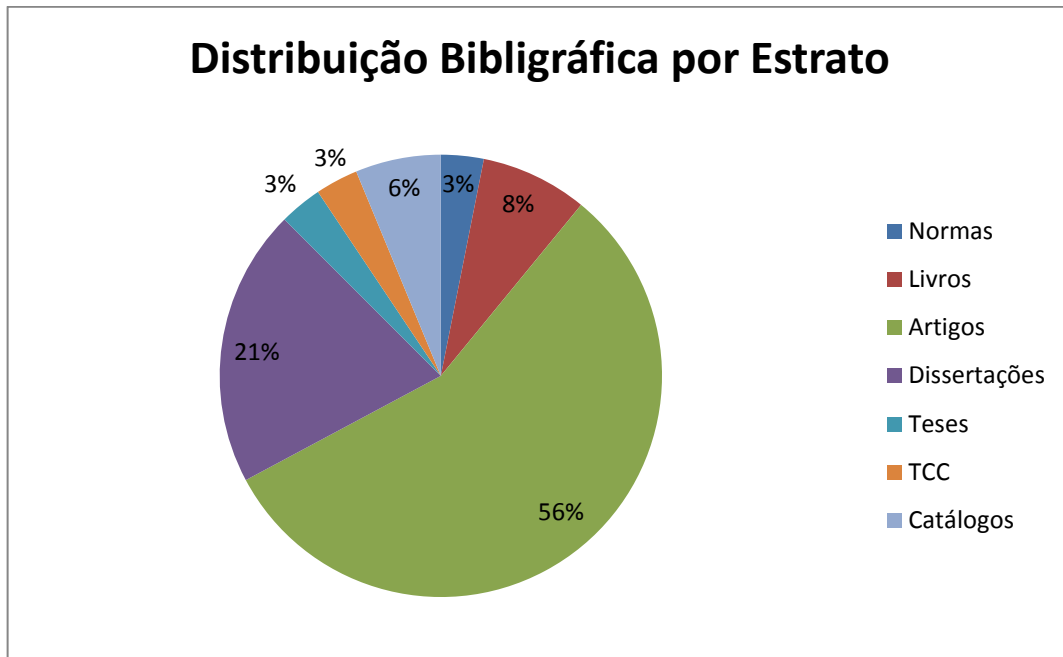
TORRES, C. S., SCHAEFFER, L. Sinterização do compósito metal duro WC-Co. **Revista Eletrônica de Materiais e Processos**, v.4.3. 58-63, 2009.

UEMURA, L. C.; PERES, F. B.; ZANGHETTIN, L. Energia Mecânica com Ênfase em Processos de Usinagem – Torneamento. **REGRAD - Revista Eletrônica de Graduação do UNIVEM**, v. 10, n. 01, p. 325 - 338, oct. 2017.

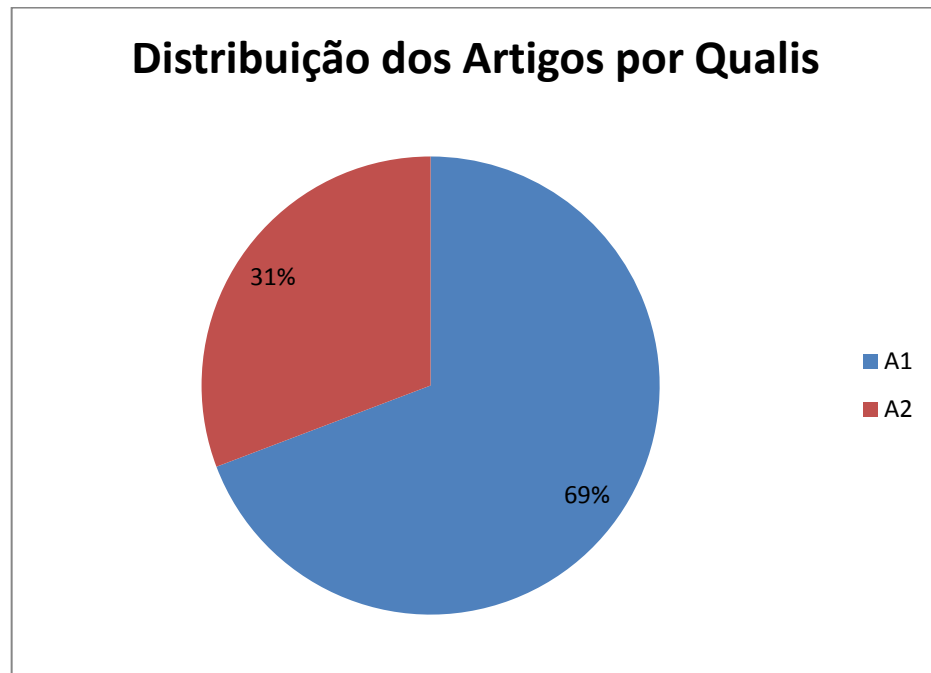
VEIGA, C., DAVIM, J. P. E LOUREIRO, A. J. R. Review on Machinability of Titanium Alloys: The Process Perspective. **Reviews on Advanced Materials Science**, vol. 34, p. 148- 164, 2013.

ZEILMANN, R. P.; VACARO, T.; BORDIN, F. M.; SONDA, V. Processos de usinagem e responsabilidade ambiental através da redução da utilização de fluidos de corte. **2º Congresso Internacional de Tecnologias para o Meio Ambiente. Bento Gonçalves**, RS, 2010.

7.2. Referências por Estrato



7.3. Referências por Qualis



7.4. Referências por Datas dos Artigos

