

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

**ESTUDO DA INFLUÊNCIA DOS TRATAMENTOS TÉRMICOS NA
USINABILIDADE DO AÇO AISI H13**
DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

RICARDO GABRIEL DA SILVA SANTOS

RIO GRANDE, RS

2023

RICARDO GABRIEL DA SILVA SANTOS

**ESTUDO DA INFLUÊNCIA DOS TRATAMENTOS TÉRMICOS NA
USINABILIDADE DO AÇO AISI H13**

Projeto de dissertação apresentado ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal do Rio Grande, como requisito parcial para obtenção do Título de Mestre em Engenharia de Mecânica.

Orientador: Fábio Augusto Dornelles do Amaral.

Co-Orientador: Jorge Luiz Braz Medeiros.

RIO GRANDE

2023

Ficha Catalográfica

S237e Santos, Ricardo Gabriel da Silva.

Estudo da influência dos tratamentos térmicos na usinabilidade do aço AISI H13 / Ricardo Gabriel da Silva Santos. – 2023.

96 f.

Dissertação (mestrado) – Universidade Federal do Rio Grande – FURG, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Rio Grande/RS, 2023.

Orientador: Dr. Fábio Augusto Dornelles do Amaral.

Coorientador: Dr. Jorge Luiz Braz Medeiros.

1. Desgaste da ferramenta 2. Tratamentos térmicos 3. Fresamento 4. Aço H13 I. Amaral, Fábio Augusto Dornelles do II. Medeiros, Jorge Luiz Braz III. Título.

CDU 621

Catálogo na Fonte: Bibliotecário Rúbia Gattelli CRB 10/1731

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE - FURG
ESCOLA DE ENGENHARIA
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica
PPMec



Ata nº **1/2023** da Defesa de Dissertação de Mestrado do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal do Rio Grande - FURG. Aos vinte e cinco dias do mês de janeiro de dois mil e vinte e três, foi instalada a Banca de Defesa de Mestrado do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, às nove horas, no Prédio do PPGEMec FURG, a que se submeteu o mestrando **Ricardo Gabriel da Silva Santos**, nacionalidade brasileira, dissertação ligada a Linha de Pesquisa Simulação e controle de processos de fabricação, com o seguinte título: **ESTUDO DA INFLUÊNCIA DOS TRATAMENTOS TÉRMICOS NA USINABILIDADE DO AÇO AISI H13**. Referendada pela Câmara Assessora do Curso, os seguintes Professores Doutores: Fábio Augusto Dornelles do Amaral, Jorge Luis Braz Medeiros e Pedro Henrique Costa Pereira da Cunha, sob a presidência do Professor Fábio Augusto Dornelles do Amaral. Analisando o trabalho, os Professores da Banca Examinadora o consideraram:

1. Fábio Augusto Dornelles do Amaral: Aprovado
2. Jorge Luis Braz Medeiros: Aprovado
3. Pedro Henrique Costa Pereira da Cunha: Aprovado

Foi concedido um prazo de 30 dias para o candidato efetuar as correções sugeridas pela Comissão Examinadora (anexo) e apresentar o trabalho em sua redação definitiva, sob pena de não expedição do Diploma. A ata foi lavrada e vai assinada pelos membros da Comissão.

Assinaturas:

1.

Documento assinado digitalmente
FABIO AUGUSTO DORNELLES DO AMARAL
Data: 25/01/2023 10:24:48-0300
Verifique em <https://verificador.iti.br>

CPF: 905.700.220-53

2.

Documento assinado digitalmente
JORGE LUIS BRAZ MEDEIROS
Data: 26/01/2023 00:04:27-0300
Verifique em <https://verificador.iti.br>

CPF: 588.871.210-87

3.

Documento assinado digitalmente
PEDRO HENRIQUE COSTA PEREIRA DA CUNHA
Data: 25/01/2023 10:40:33-0300
Verifique em <https://verificador.iti.br>

CPF: 985.887.370-00

Ricardo Gabriel da Silva Santos:

RICARDO GABRIEL DA SILVA SANTOS

**ESTUDO DA INFLUÊNCIA DOS TRATAMENTOS TÉRMICOS NA
USINABILIDADE DO AÇO AISI H13**

Esta Dissertação foi julgada adequada para obtenção do Título de “Mestre em Engenharia Mecânica”, e aprovada em sua forma final pelo programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica

BANCA EXAMINADORA

.....
Prof. Dr. Fábio Augusto Dornelles do Amaral

Universidade Federal do Rio Grande

Orientador

.....
Prof. Dr. Jorge Luis Braz Medeiros

Universidade Federal do Rio Grande

Coorientador

Membro interno

.....
Prof. Dr. Pedro Henrique Costa Pereira da Cunha

Membro externo

RIO GRANDE, 25 DE JANEIRO DE 2023

AGRADECIMENTOS

Primeiramente agradeço aos meus pais, por sempre terem me apoiado quando tomei a decisão de estudar em outro estado dando todo o suporte para o meu crescimento profissional. A todos da minha família, que acreditaram em mim e estiveram ao meu lado durante esta jornada.

Um agradecimento especial ao meu orientador, o professor Dr. Fabio Augusto Dornelles do Amaral, pela oportunidade, dedicação e constante compreensão durante a realização do estudo. Ao professor Jorge Luiz Braz Medeiros pela ajuda e assistência nas análises microestruturais das amostras.

Aos professores, coordenação e secretaria do Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica, pelo apoio e pelos ensinamentos.

Aos técnicos do laboratório de usinagem, do Centro de Microscopia Eletrônica do Sul (CEME-SUL) e do laboratório de metalografia da Furg pela atenção e pela ajuda nas análises realizadas.

Por último, não menos importante, um reconhecimento especial a empresa Aços Favorit Distribuidora Ltda, pela doação de uma barra de aço H13 usada na confecção das amostras que foram utilizadas durante a realização dos experimentos permitindo a continuação da pesquisa acadêmica.

RESUMO

Os processos de usinagem submetem as ferramentas de corte a efeitos mecânicos, térmicos, químicos e tribológicos, que afetam sua integridade gerando desgastes e avarias, o que pode reduzir a sua vida e influenciar no acabamento superficial das peças usinadas, podendo acarretar em elevação de custo operacional. Muitas vezes os aços ferramenta para trabalho a quente recebem tratamentos térmicos para melhoria de algumas características específicas como dureza ou tenacidade, o que também pode afetar o resultado final dos processos de usinagem realizados sobre esses materiais. Por esse motivo, esse trabalho estudou a influência dos tratamentos térmicos do aço H13 e dos parâmetros de corte na fresagem de faceamento avaliando a rugosidade superficial e o desgaste da ferramenta. Os resultados mostraram que o uso da maior velocidade de corte (300 mm/min) gerou uma rugosidade menor em ambos os casos sendo que a amostras que sofreu têmpera e duplo revenimento apresentou um valor de rugosidade de $0,1\mu m$, enquanto as amostras sem tratamento térmico e com recozimento tiveram valores próximos de $0,2\mu m$. No que diz respeito ao desgaste da ferramenta, a velocidade de corte também foi preponderante, sendo que a amostra temperada foi a que mais afetou os insertos utilizados, levando os ensaios a serem encerrados na metade do tempo em relação aos outros dois estados térmicos.

Palavras chaves: desgaste da ferramenta, tratamentos térmicos, fresamento, aço H13;

ABSTRACT

The machining processes submit the cutting tools to mechanical effects, thermal, chemical and tribological, which affect its integrity generating wear and damage, which can reduce its life and influence on the surface finish of machined parts, which may lead to elevation of operational cost. Often hot work tool steels receive heat treatment to improve of some specific features such as hardness or toughness, wich can also affect the final result of the machining processes carried out on these materials. For this reason, this work has studied the influence of the heat treatments on H13 steel and of the cutting parameters on facing machining evaluating the surface roughness and tool wear. The results show that the use of the highest cutting speed (300 mm/min) generated a lower roughness in both cases and the samples that suffered quenching and double tempering showed a roughness value of $0,1 \mu m$, while the samples without heat treatment and with annealing had values close to $0,2 \mu m$. Also with regard to tool wear, cutting speed also was preponderant, being that quenching sample was the that most affected tools used, leading the tests to be finished on half life of the time with relation the other two thermal states.

Keywords: Tool wear, heat treatment, milling, H13 steel;

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Informações sobre o aço H13	20
Figura 2 - O efeito da temperatura de recozimento na dureza	24
Figura 3 - Curva de dureza e taxa de tamanho de grão vs. temperatura de resfriamento	25
Figura 4 - Curvas das propriedades mecânicas do aço H13 vs temperatura de têmpera	25
Figura 5 - Rugosidade média (Ra).....	36
Figura 6 - Parâmetro de Rugosidade (Ry).....	36
Figura 7 - Parâmetro de Rugosidade (Rz).....	37
Figura 8 - Parâmetro de Rugosidade (Rq)	38
Figura 9 - Representação Genérica da Pastilha modelo 345R	40
Figura 10 - Representação da amostra do aço H13	42
Figura 11 - Fluxograma dos procedimentos experimentais a serem realizados.....	43
Figura 12 - Microestrutura do aço AISI H13 como recebido	46
Figura 13 - Microestrutura do aço AISI H13 após recozimento	47
Figura 14 - Microestrutura do aço AISI H13 após têmpera e duplo revenido	49
Figura 15 - Desgaste de flanco para a amostra 1 após 30 passes	50
Figura 16 - Desgaste de flanco para a amostra 1 após 30 passes	51
Figura 17 - Micrografia em MEV da amostra sem tratamento térmico com ampliação x40.....	52
Figura 18 - Micrografia em MEV da amostra sem tratamento térmico com ampliação x110.....	53
Figura 19 - Desgaste de flanco após 25 passes com resolução aumentada em 10x.....	54
Figura 20 - Desgaste de flanco após 25 passes com resolução aumentada em 20x.....	55
Figura 21 - Desgaste de flanco na ponta da ferramenta após 30 passes com resolução aumentada em 10x.....	56
Figura 22 - Desgaste abrasivo após 30 passes	57
Figura 23 - Micrografia em MEV da amostra sem tratamento térmico com ampliação x60.....	58
Figura 24 - Micrografia em MEV da amostra sem tratamento térmico com ampliação x220.....	58
Figura 25 - Desgaste de flanco após 15 passes com resolução aumentada em 10x.....	59
Figura 26 - Desgaste de flanco da ferramenta no final do ensaio após 30 passes com resolução aumentada em 10x	61
Figura 27 - Micrografia em MEV da amostra sem tratamento térmico com ampliação x90.....	62
Figura 28 - Micrografia em MEV da amostra sem tratamento térmico com ampliação x100.....	62
Figura 29 - Desgaste de flanco para a amostra 2 após 10 passes com resolução aumentada em 10x	63
Figura 30 - Desgaste de flanco para a amostra 2 após 15 passes com resolução aumentada em 5x ..	64
Figura 31 - Micrografia em MEV da amostra recozida com ampliação x65.....	65
Figura 32 - Micrografia em MEV da amostra recozida com ampliação x190.....	66
Figura 33 - Desgaste de flanco da amostra 1 após 15 passes com resolução aumentada em 10x	67
Figura 34 - Desgaste de flanco da amostra 1 após 30 passes com resolução aumentada em 10x	68
Figura 35 - Micrografia em MEV da amostra temperada com duplo revenimento com ampliação x30	69
Figura 36 - Micrografia em MEV da amostra temperada com duplo revenimento com ampliação x110	69
Figura 37 - Lascamentos da amostra 2 após 15 passes com resolução aumentada em 5x.....	70
Figura 38 - Desgaste de flanco com perda de cobertura da amostra 2 após 15 passes com resolução aumentada em 10x	71

Figura 39 - Micrografia em MEV da amostra temperada com duplo revenimento com ampliação x43	73
Figura 40 - Micrografia em MEV da amostra temperada com duplo revenimento com ampliação x190	73
Figura 41 - Rugosidade Média (Ra) para as amostras 1 e 2, ambas sem tratamento térmico	75
Figura 42 - Rugosidade Média Quadrática (Rq) para as amostras 1 e 2, ambas sem tratamento térmico	76
Figura 43 - Rugosidade Média (Ra) para as amostras 1 e 2, ambas com tratamento térmico de recozimento	77
Figura 44 - Rugosidade Média Quadrática (Rq) para as amostras 1 e 2, ambas com tratamento térmico de recozimento	78
Figura 45 - Rugosidade Média (Ra) para as amostras 1 e 2, ambas com tratamento térmico de têmpera e duplo revenido	79
Figura 46 - Rugosidade Média Quadrática (Rq) para as amostras 1 e 2, ambas com tratamento térmico de têmpera e duplo revenido	80

LISTA DE TABELAS

Tabelas 1 - Valores de dureza das amostras do aço ferramenta H13 tratadas sobre diferentes condições	33
Tabelas 2 - Composição química do aço AISI H13	40
Tabelas 3 - Especificações Técnicas da Pastilha modelo 345R.....	41
Tabelas 4 - Parâmetros de corte dos procedimentos experimentais	44
Tabelas 5 - Espectometria AISI H13.....	46

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AISI	American Iron and Steel Institute
CEME-sul	Centro de Microscopia Eletrônica do Sul
CNC	Comando Numérico Computacional
FURG	Universidade Federal Do Rio Grande
ISO	International Organization for Standardization
MEV	Microscópio Eletrônico de Varredura
NBR	Norma Brasileira
MO	Microscopia Óptica
SAE	Society of Automotive Engineers

LISTA DE SÍMBOLOS

Ra	Desvio aritmético médio da rugosidade no comprimento de avaliação.
Rq	Desvio médio quadrático da rugosidade no comprimento de avaliação.
Ap	Profundidade de corte
Vc	Velocidade de corte
F	Avanço
μm	Micrometros

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	16
2. OBJETIVOS	19
2.1 Objetivo Geral	19
2.2 Objetivos Específicos	19
3. ESTADO DA ARTE	20
3.1 Aço AISI H13 para trabalho a quente	20
3.2 Tratamentos térmicos	21
3.3 Efeitos dos tratamentos térmicos nas propriedades mecânicas do aço H13	23
3.4 Processos de usinagem	26
3.4.1 – Fresagem	27
3.4.2 – Materiais para ferramenta	28
3.4.3 – Parâmetros de corte	30
3.5 – Desgastes de ferramenta de corte	32
3.6 – Qualidade superficial	33
3.7 – Usinabilidade	38
4. MATERIAIS E MÉTODOS	40
4.1 Materiais	40
4.1.1 Aço AISI H13	40
4.1.2 Pastilha de metal duro	40
4.2 Equipamentos utilizados	41
4.3 Metodologia	43
5. RESULTADOS E DISCUSSÕES	46
5.1 Análise química e metalográfica do material	46
5.2 Tratamento térmico de recozimento	47
5.3 Tratamento térmico de têmpera e duplo revenido	48
5.3 Análise do desgaste da ferramenta de corte	49
5.3.1. Ensaio amostra 1 sem tratamento térmico – velocidade de corte 200 mm/min e avanço 0,1 mm/rot	50
5.3.2. Ensaio amostra 2 sem tratamento térmico – velocidade de corte 300 mm/min e avanço 0,1 mm/rot	53
5.3.3. Ensaio amostra 1 recozida – velocidade de corte 200 mm/min e avanço 0,1 mm/rot	59
5.3.4. Ensaio amostra 2 recozida – velocidade de corte 300 mm/min e avanço 0,1 mm/rot	63
5.3.5. Ensaio amostra 1 temperada com duplo revenimento – velocidade de corte 200 mm/min e avanço 0,1 mm/rot	66

5.3.6. Ensaio amostra 2 temperada com duplo revenimento – velocidade de corte 300 mm/min e avanço 0,1 mm/rev	70
5.4. Análise de rugosidade	74
5.4.1 Amostras 1 e 2, sem tratamento térmico – velocidades de cortes 200 mm/min e 300 mm/min, avanço 0,1 mm/rot e profundidade 0,1 mm.....	74
5.4.2 Amostras 1 e 2, com recozimento – velocidade de corte 200 mm/min e velocidade de corte 300 mm/min, avanço 0,1 mm/rot e profundidade 0,1 mm.	76
6. CONCLUSÕES	82
7. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	84
8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	85
8.1 Referências Nominais.....	85
8.2 Referências por Estrato	94
8.3 Referências por Qualis	95
8.4 Referências por Data dos Artigos.....	95

1. INTRODUÇÃO

O processo de fresamento desempenha um papel relevante na transformação de toda a produção do metal em ferramentas de trabalho e também emprega milhares de pessoas ao redor do mundo (TRENT, 2010). Logo, o crescimento na demanda pela pesquisa nessa área representa grandes desafios para indústrias que sempre focam na produtividade, qualidade, flexibilidade e compatibilidade com o meio ambiente.

Os processos de usinagens têm evoluído muito rapidamente provocando melhorias nos revestimentos e nas geometrias das bordas das ferramentas. Com isso, percebe-se que as pesquisas sobre a usinagem relativas as geometrias da ferramenta e a energia de corte específica têm sido realizadas desde 1950 com o intuito de atribuir resultados mais satisfatórios durante a aplicação da usinagem na fabricação de componentes mecânicos (RODRIGUES et al., 2007).

Nos últimos anos o uso de tratamentos térmicos convencionais como o recozimento e a têmpera mais revenido têm sido utilizados em componentes mecânicos para obter-se propriedades mecânicas melhores podendo diminuir as tensões residuais presentes nas peças em virtude do encruamento presente nos materiais decorrente da deformação plástica sofrida no processo de fabricação do mesmo. Tais procedimentos de aquecimento e resfriamento podem refinar os grãos e aumentar a resistência ao desgaste do material ficando evidente a importância da aplicação desses procedimentos (SINGH et al., 2020).

Hossain et al. (2019) determinaram que existe um interesse progressivo e significativo no desenvolvimento com baixo custo de aço alto carbono de baixa liga que tenha uma combinação de alta dureza, resistência mecânica, e ductilidade. Isso pode ser alcançado através da combinação de martensita e uma significativa quantidade de austenita retida que atua fornecendo uma grande tenacidade. Com

isso, para produzir boas combinações de resistência mecânica e tenacidade da estrutura martensítica, os tratamentos térmicos de têmpera convencional e revenido tem sido aplicado nos aços.

Edmonds et al. (2006) afirmaram que os tratamentos térmicos convencionais de têmpera e revenido tem sido aplicado há muito tempo em aços para produzir boas combinações de resistência mecânica e tenacidade da estrutura martensítica. Zhou et al. (2014) avaliaram a influência da temperatura de recozimento e da temperatura de têmpera na microestrutura e propriedades mecânicas em um aço carbono que foi submetido a duas etapas de tratamento térmico intercritico de recozimento e têmpera. A microestrutura do aço processado compreende ferrita, bainita ou martensita e austenita retida do tipo acicular. Foi concluído que na temperatura inferior de recozimento intercritico resultou em uma fração inferior de ferrita com o tamanho de grão mais fino e conseqüentemente maior resistência mecânica. Por outro lado, na temperatura intercritica de têmpera influenciou significativamente no teor de austenita retida e na precipitação.

Kumar et al. (2019) definiram que atualmente existem diversas ferramentas de corte que estão sendo utilizadas eficazmente durante o processo de usinagem dura, como por exemplo, as de carboneto, cerâmico, nitreto de boro cúbico (CBN) e o diamante policristalino, entretanto, a ferramenta de CBN é conhecida como a melhor escolha para a usinagem dura, por conta da sua boa condutividade térmica e dureza maior, quando comparada com as ferramentas que possuem carbonetos ou cerâmicos.

Zhili et al. (2015) afirmaram que o desempenho do desgaste das ferramentas de fresamento com diferentes revestimentos têm sido estudadas sob condições severas de usinagem do aço ferramenta H13, afirmar-se que a vida da ferramenta de

ferramenta revestidas podem ser melhoradas em até 100% devido a aplicação da bicamada de AlCrN-TiAlN como comparada ao revestimento de monocamada de AlTiN. Logo, conclui-se que para se alcançar uma melhora na vida da ferramenta sob condições de fresamento severas, o revestimento deverá possuir uma resistência a fratura por fadiga combinado com um suporte de carga mais forte.

De acordo com Arruda et al. (2019), os fabricantes de componentes mecânicos estão exigindo que as peças contenham uma superfície acabada de alta qualidade. Dessa forma, foi afirmado que os parâmetros de rugosidade superficial média (R_a), desvio médio quadrático (R_q), rugosidade superficial máxima (R_y), rugosidade superficial de profundidade média (R_z) são parâmetros essenciais no fresamento de acabamento para melhorar qualidade superficial dos produtos, uma vez que, com esses dados se torna possível determina o desgaste da peça.

Singh Walia et al. (2021) relataram que a qualidade superficial de uma amostra de aço H13 submetida ao processo de fresamento desempenha um papel fundamental na manutenção da sua integridade geral, ou seja, a rugosidade é uma avaliação de qualidade importante da superfície de um material, que tem considerável influência no desempenho mecânico do mesmo.

O presente trabalho busca estudar o efeito dos tratamentos térmicos e da variação dos parâmetros de cortes na usinabilidade relacionada com o processo de fresagem do aço H13, avaliando sua influência na qualidade superficial e no desgaste das ferramentas.

2. OBJETIVOS

2.1 Objetivo Geral

Avaliar a influência dos tratamentos térmicos nas características de usinabilidade do aço AISI H13 para trabalho a quente em diversas condições microestruturais.

2.2 Objetivos Específicos

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

- Avaliar a influência das diferentes microestruturas do aço H13 na rugosidade superficial durante o processo de fresagem;
- Determinar os mecanismos de desgaste presentes na ferramenta oriundos dos ensaios de fresagens em todos os estados térmicos das amostras;
- Estudar o efeito dos tratamentos térmicos das amostras do aço H13 no desgaste das ferramentas de corte;
- Investigar a relevância da variação da velocidade de corte na rugosidade superficial e desgaste da ferramenta durante a fresagem do aço H13 nas diferentes amostras.

3. ESTADO DA ARTE

3.1 Aço AISI H13 para trabalho a quente

O aço H13 é amplamente utilizado em matrizes de forjamento a quente, matrizes de extrusão a quente e matrizes de fundição sob pressão de metal não ferroso. As formas de aplicação desse metal são definidas pelas propriedades do material, como tenacidade, dureza, desempenho de fadiga térmica e resistência ao desgaste.

Conforme afirmam PERSSON; HOGMARK; BERGSTROM, (2005), os aços AISI H11, H13, H20, H21 e H22 são frequentemente usados para fabricar produtos que requerem boa resistência e dureza, sendo uma das escolhas mais comuns para materiais de moldes e matrizes.

A Figura 1 ilustra as principais características que o aço AISI H13 garante na sua utilização em moldes e matrizes para trabalho a quente.

Figura 1 - Informações sobre o aço H13

Características importantes
Boa temperabilidade
Boa resistência ao amolecimento pelo calor
Estrutura uniforme
Ausência de defeitos internos
Boa usinabilidade
Boa tenacidade e resistência a trincas
Resistência ao desgaste
Fácil polimento

Fonte: Steel A. Handbook for Materials Research and Engineering

Sebastian et al. (2017) relataram que os aços ferramentas para trabalho a quente são amplamente usados para ferramentas de forjamento e fundição, devido a forma complexa de tais ferramentas, não apenas a dureza, mas também a resistência a fratura dos materiais é fundamental para a aplicação. Eles concluíram que o reforço por partícula dura é uma forma adequada para melhorar a dureza e a resistência ao desgaste do aço ferramenta fresado mecanicamente, devido aos efeitos combinados

de endurecimento por dispersão e endurecimento por tensão pela deformação plástica severa durante o fresamento mecânico.

Xundong Yang et al. (2020) analisaram que o revestimento baseado em cobalto pela deposição a laser poderia melhorar a resistência a fadiga térmica de matrizes para trabalho a quente, mas o efeito da tecnologia nas propriedades precisou ser mais estudado. Eles investigaram a influência da microestrutura e a transformação no tempo de vida do revestimento baseado em cobalto da matriz de aço AISI H13 para trabalho a quente. Eles concluíram que a oxidação ocorreu inicialmente no teste da fadiga térmica, e a microfissura não apareceu até que a tensão residual térmica separou o carboneto ou a fase ε da matriz.

Riming Wu et al. (2021) verificaram que matrizes de aço AISI H13 com substituição de tungstênio por vanádio foram produzidas através de indução a vácuo, fundição e forjamento, seguido de resfriamento a 1050°C e têmpera a 600°C. Foi concluído que através do tratamento térmico de têmpera com duração de 10-40h a 600°C, o apresentou endurecimento superior do aço AISI H13 com tungstênio comparado com o aço AISI H13 comum. O aumento de dureza 46 HRC, assim como a resistência ao escoamento foram detectados pela precipitação de carbonetos M_6C com tamanhos na média de 10 nm a 400 nm.

3.2 Tratamentos térmicos

Na indústria metalmeccânica existem diversos tratamentos térmicos que os aços podem ser submetidos para que eles possam atingir determinadas características a fim de um objetivo em específico. A aplicação desses tratamentos térmicos é de suma importância, pois eles atribuem novas características físicas e mecânicas aos aços.

Prashnth et al. (2013) realizaram o tratamento térmico de recozimento em amostras de aço carbono e descobriram que o efeito na microestrutura e nas

propriedades mecânicas provocaram uma melhoria alterando seus característicos mecânicos, tornando o material mais uniforme mecanicamente e reduziu a presença de tensões residuais presentes.

Segundo Callister et al. (2016), o tratamento térmico de têmpera consiste em aquecer o aço até uma temperatura acima da linha crítica até que ocorra a completa transformação da ferrita em austenita e logo após o aço sofre um rápido resfriamento obtendo uma microestrutura martensítica atribuindo uma dureza muito elevada ao aço, mas devido a esse rápido resfriamento, o aço fica exposto a uma grande quantidade de tensões residuais ficando extremamente frágil e por isso se faz o tratamento térmico de revenimento após a têmpera para eliminar os inconvenientes.

Toshihiro et al. (2013) avaliaram que o crescimento de grão ocorre em temperaturas elevadas para reduzir a área total dos contornos de grão com uma alta energia. A taxa de crescimento de grão ocorre normalmente devagar junto com o tempo de recozimento, tornando difícil a obtenção de grãos maiores que um milímetro de tamanho.

Kang et al (2012) analisaram o efeito do tratamento térmico intercrítico na evolução microestrutural e no comportamento da fratura de impacto de Charpy de um aço baixa liga de alta tração. O mecanismo de dureza foi esclarecido pela análise das características microestruturais e pelas formas de propagação das trincas. Eles concluíram que os resultados mostraram que uma microestrutura composta da fase ferrítica separada por carbonetos globulares e martensita de forma irregular foi obtida ao adicionar o resfriamento intercrítico ao tratamento térmico convencional de recozimento e têmpera. Além disso, foi obtido 3,6% de austenita retida na microestrutura.

3.3 Efeitos dos tratamentos térmicos nas propriedades mecânicas do aço H13

Segundo Uhlmann et al. (2017), devido ao constante aumento de carregamento e redução de peso necessário, componentes funcionais tiveram que ser tratados termicamente para se ter uma melhora das propriedades mecânicas de um material de dureza de 50 HRC ou maior. No passado, a usinabilidade de aços tratados termicamente era somente possível com processos de afiação, por conta da atual melhorada nas propriedades térmicas e mecânicas de materiais de corte e revestidos, assim como, na usinagem de ferramenta dura que é possível usar o processo de torneamento intenso, fresamento e perfuração, em que se usina com uma ponta de corte geometricamente determinada substituindo previamente o processo de afiação.

Bahrami et al. (2004) estudaram os efeitos de tratamento térmico de recozimento e têmpera na resistência ao desgaste do aço ferramenta AISI H13, realizando testes usando uma máquina que tem a capacidade de carregamento direto de pino cilíndrico em contato vertical com as superfícies das amostras. A fim de compreender os mecanismos de desgaste, os rastros de detritos foram estudados por microscopia eletrônica de varredura e métodos de raios-X. Além disso, a profundidade da zona endurecida por deformação abaixo faixas de desgaste e comportamento de atrito do aço ferramenta AISI H13 foram avaliados. Os resultados experimentais mostram que sob carga de 29,4 N, os espécimes no estado revenido têm a maior resistência ao desgaste e os cavacos são uma mistura de óxido e pós metálicos semelhantes a placas. No nível de carga de 98 N, as amostras temperadas por 30 a 60 min a 600 °C obtiveram a maior resistência ao desgaste e o modo de desgaste foi oxidativo.

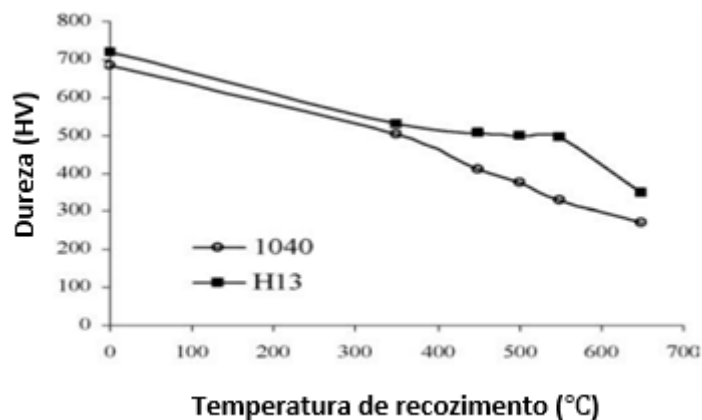
Wang et al. (2020) relataram que, quando uma amostra de aço H13 passa por tratamento térmico de têmpera à 1040°C e revenimento à 570°C, foi obtida uma

microestrutura uniforme com boa dureza, tenacidade e resistência. O aumento da fase Cr_{23}C_6 reduz a dureza, enquanto reduzir a densidade de discordância melhora a tenacidade dos aços H13 após têmpera e revenido.

Segundo Wang et al. (2007), a segregação formada no aço H13 é aumentada após o processo de recozimento e forjamento. Uma grande quantidade de carboneto secundários são precipitados na área de segregação após o processo de recozimento. Os carbonetos primários são particularmente dissolvidos no forjamento e recozimento do H13.

Segundo Tekmen et al. (2005), na figura 2 mostrada abaixo, fica evidente que os valores de dureza de amostras do aço H13 e do aço 1040 são quase iguais e diminui com o aumento da temperatura de recozimento acima de 450°C . Entretanto, na faixa de temperaturas de 450°C a 550°C , a diminuição na dureza da amostra do aço H13 não é tão pronunciada quando comparada com a amostra do aço 1040. A diferença máxima de dureza é obtida após o recozimento em 550°C .

Figura 2 - O efeito da temperatura de recozimento na dureza

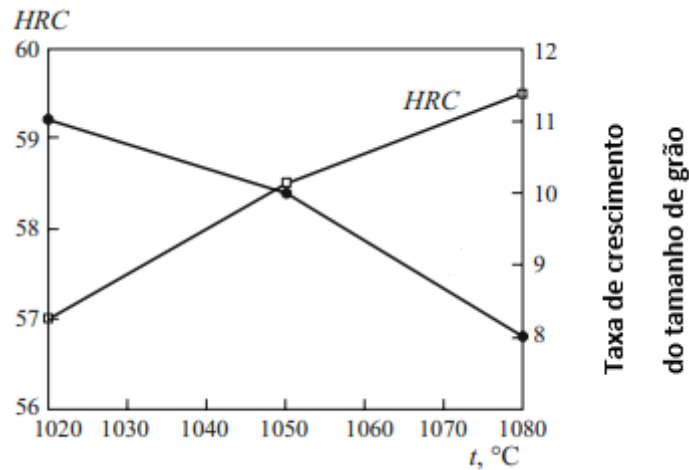


Fonte: Tekmen et al, (2005).

Segundo Xinmin et al. (2010), conforme a figura 3, quando o aço H13 for tratado em diferentes temperaturas de resfriamento, têmpera e têmpera dupla, a amostra apresentara diferentes propriedades mecânicas de ductilidade, plasticidade, dureza,

e resistência ao impacto. Esse fato se caracterizou por conta da microestrutura, tamanho de grão, e tamanho do carboneto após os tratamentos térmicos.

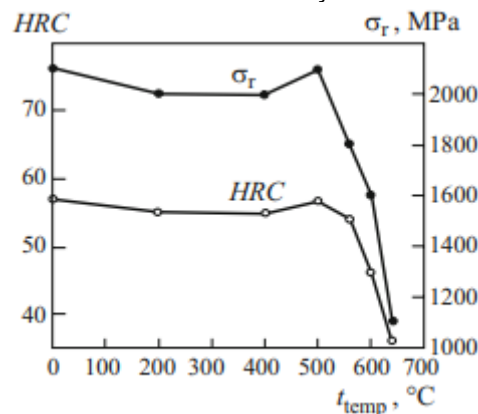
Figura 3 - Curva de dureza e taxa de tamanho de grão vs. temperatura de resfriamento



Fonte: Yan et al, (2010).

A figura 4 mostra os resultados de tensão de ruptura e valor de dureza obtidos em diferentes temperaturas de têmpera, com o intuito de enfatizar a importância da temperatura nas propriedades mecânicas no final do processo.

Figura 4 - Curvas das propriedades mecânicas do aço H13 vs temperatura de têmpera



Fonte: Yan et al, (2010).

B. Reggiani et al (2017) relatou que os aços ferramentas para trabalho a quente são usados para produzirem moldes e matrizes para processos marcados não só apenas pelo alto carregamento mecânico, mas também pelas altas temperaturas de operação, por exemplo, forjamento de matrizes, punções, mandris e matrizes de extrusão. Os altos carregamento mecânicos são relacionados ao nível de pressão

liberado nas ferramentas pelo material de formação, e, além disso, eles são ciclos naturais já que ambos representam componentes forjados ou extrudados, para a ferramenta, um único ciclo de carregamento. Foi concluído que durante os três estágios de amolecimento oriundos do recozimento no AISI H11 estava de acordo com o que foi relatado na literatura e anteriormente provada pelos autores para o similar aço ferramenta para trabalho a quente AISI H11 e que são razoáveis devido a microestrutura instável com uma alta densidade de discordância e para o ciclo de amolecimento sobre o valor não nulo que envolve progressivo aumento da deformação plástica sem saturação.

3.4 Processos de usinagem

Recentemente, a usinagem em alta velocidade tem recebido grande atenção possuindo alta exatidão e precisão durante o processo de usinagem e de acordo com Mohanraj et al (2019), a melhoria mais importante na indústria de corte de metal é a utilização continua de ferramentas de corte e o uso de sistema de monitoramento da condição da ferramenta, uma vez que no processo de corte de metal, a condição da ferramenta tem de ser administrada seja pelos operadores ou por sistemas de monitoramento de condição online para prevenir danos para a ferramenta ou para peça de trabalho.

Um procedimento de usinagem para a fabricação de componentes mecânicos é a fresagem de CNC em peças que possuem superfícies curvas na fabricação de moldes e matrizes usando o aço H13, esse procedimento tem ajudado os fabricantes a produzirem esses produtos com mais facilidade, uma vez que após serem definidos os parâmetros de usinagem pela máquina de fresagem, a usinagem ocorre como programado com a peça fabricada dentro dos limites de tolerâncias padronizados em norma (MAGALHÃES et al., 2018).

Segundo Sreejith (1999), a usinagem a seco é ecologicamente desejável e será considerada como uma necessidade para manufatura em empresas no futuro próximo. As indústrias serão obrigadas a considerar usinagem a seco para aplicar leis de proteção ambientais para segurança ocupacional e regulação de saúde.

3.4.1 – Fresagem

Segundo Diniz et al (2014), a fresagem é um processo de usinagem mecânica realizada por fresadoras e ferramentas especiais chamadas fresas. A fresagem consiste na retirada do excesso de metal ou sobremetal da superfície de uma peça, com a finalidade de atribuir a ela uma forma e acabamentos desejados. Na fresagem, a remoção do sobremetal da peça é feita pela combinação de dois movimentos realizados ao mesmo tempo. Um dos movimentos é o de rotação da ferramenta, a fresa. O outro consiste no movimento da mesa da máquina, onde é fixada a peça a ser usinada.

Bakar et al (2020), relataram que o raio arredondado da ponta da ferramenta tem uma influência significativa na vida da ferramenta e consequentemente no desempenho da usinabilidade. Com isso, foi feita uma análise para verificar os efeitos do raio arredondado da ponta ferramenta, parâmetros de usinabilidade na rugosidade superficial e desgaste da ferramenta durante a fresagem do aço ferramenta AISI H13 52 HRC, na condição de usinagem a seco e criogênica. Concluiu-se que uma baixa taxa de rotação, profundidade de corte e raio da ponta da ferramenta na usinagem a seco e criogênica deram uma qualidade superficial no valor de $0,158 \mu m$ e $0,146 \mu m$, respectivamente. Logo a usinabilidade criogênica contribuiu significativamente para a melhora da superfície usinada e para a vida da ferramenta quando comparada com usinagem a seco.

Segundo Xiaobin et al (2011) fresamento em alta velocidade foi amplamente usado na manufatura de componentes aeronáuticos e automotivos de alumínio tais como superfícies geradas com geometria de alta precisão. Os materiais de ferramenta e as ferramentas de usinagem rígida avançaram para ser aplicado no fresamento rígido, o qual já pode ser uma alternativa para o processo de afiação para alguma extensão. Eles descobriram que o uso de uma alta velocidade de corte, baixa taxa de alimentação, e baixa profundidade de corte conduzem para uma boa superfície acabada na usinagem do aço AISI H13 endurecido semi-acabado e acabado.

3.4.2 – Materiais para ferramenta

Os processos de usinagem convencionais consistem em remover uma pequena quantidade de material denominado como cavaco por meio do uso de uma ferramenta de corte que poder uma única aresta de corte ou múltiplas arestas de cortes.

Segundo Machado & Silva (2004), as principais propriedades desejáveis em um material para ferramenta de corte são:

- Alta dureza
- Tenacidade suficiente para evitar falha por fatura
- Alta resistência ao desgaste abrasivo
- Alta resistência a compressão
- Alta resistência ao cisalhamento
- Boas propriedades mecânicas e térmicas em temperaturas elevadas
- Alta resistência ao choque térmico
- Alta resistência ao impacto
- Ser inerte quimicamente

Segundo Machado & Silva (2009), o primeiro grande impulso na área dos materiais para ferramentas de corte aconteceu com a descoberta do aço rápido, o segundo com metal duro, pois foi possível aumentar as velocidades de corte em dez vezes (de 35 m/min para 250 m/min a 300 m/min). O metal duro é fabricado pelo processo de metalurgia do pó que possui uma excelente combinação de resistência ao desgaste, resistência mecânica e tenacidade.

Segundo Ferraresi (2014), não existe uma classificação geral para ferramentas, entretanto, em vista da sua ordem cronológica de seu desenvolvimento e com base nos seus característicos químicos, eles podem ser classificados como; aços-carbono sem elementos de liga ou com baixos teores de elementos de liga, aços rápidos, ligas fundidas, metal duro, e materiais cerâmicos. Os materiais mais usados são os aços rápidos e o metal duro, embora as ligas fundidas se encontrem aplicadas em setores onde se procura um material mais duro que o aço rápido e menos frágil ou mais tenaz que o metal duro.

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.

Liu et al (2019), definiram que as ferramentas de metal duro que possuem revestimento rico em alumínio AlTiN ou que possui revestimento de nano compósito de TiAlSiN para o fresamento de ligas de Ti-6Al-4V obtiveram uma alta eficiência e aumentaram a vida da ferramenta no fresamento realizado nas velocidades de corte de 150 m/min e 200 m/min. Foi concluído que os revestimentos aplicados em

ferramentas de metal duro são de suma importância na usinabilidade do material podendo-se atingir resultados melhores sem causar danos severos na ferramenta.

Wang et al (2014), realizaram experimentos sobre o fresamento em alta velocidade do aço ferramenta H13 com insertos de metal duro que foram conduzidos sobre diferentes parâmetros de corte para definir as mudanças de microdureza da superfície usinada. Com isso, definiu-se que a microdureza da superfície usinada é muito maior que na subsuperfície indicando que as superfícies dos materiais experimentaram encruamento severo induzido pela deformação plástica durante o processo de fresamento.

Cui et al (2018), avaliaram o impacto que as condições de corte possuem na superfície acabada do aço H13 durante o processo de fresamento considerando o desempenho de uma ferramenta de metal duro revestida, sendo usado um avanço de 0,2 mm/dente com velocidade de corte de 150 m/min durante o fresamento. Concluiu-se que diversos impactos mecânicos e térmicos surgem devido a intermitência no processo de corte de aços de alta dureza e uma forma de diminuir esse fato é com a aplicação de ligas de revestimento que contribuem para a redução desses impactos.

3.4.3 – Parâmetros de corte

O processo de fresamento é uma operação de usinagem amplamente usada para a produção de componentes mecânicos. A obtenção da superfície acabada requerida é um assunto de suma importância que é amplamente discutido nessa operação de usinagem, uma vez que a velocidade de corte, avanço e profundidade de corte são muito importantes na obtenção da superfície acabada dentro dos padrões estabelecidos pelos fabricantes (OWAIS QADRI et al., 2020).

O processo de corte do metal é responsável pela formação de cavaco, consumindo quase toda a sua energia para isso. Com isso, a geometria do cavaco

depende do acabamento de superfície, da temperatura de corte, da vida da ferramenta e das forças de cortes (PAVEL et al., 2008).

A formação de cavaco é um fator chave durante o processo de fresamento, uma vez que pode afetar a estabilidade de corte e a integridade da superfície usinada. O mecanismo de formação de cavaco no fresamento do aço AISI H13 está principalmente atribuído ao cisalhamento adiabático acompanhado de uma formação de rachadura cíclica, a qual facilita o nível de segmentação (BINXUN et al., 2018).

Além disso, diversas pesquisas recentes sobre o fresamento em alta velocidade tem sido conduzido para a obtenção de maior eficiência e precisão durante a realização do fresamento em alta velocidade. Zhao et al. (2011), realizaram um fresamento com uma velocidade de corte de 1,4 m/min que pode ser considerada como crítica resultando em um carregamento mecânico relativamente baixo, uma boa superfície acabada, e uma fresagem eficiente. Foi concluído que quando a velocidade de corte é inferior a 1,4 m/min, a ordem de contribuição dos parâmetros de corte para a rugosidade superficial R_a é a profundidade axial de corte e a velocidade de corte.

Segundo Muhammad Riza et al. (2016), o calor produzido na interface do cavaco da ferramenta durante operações de fresamento em altas velocidades ficou conhecido como um fator que afeta a vida da ferramenta e a geometria ou a propriedades das peças. Foi investigado o comportamento da temperatura de corte do aço AISI H13 (48 HRC) sobre circunstâncias de alta velocidade durante a usinagem. O processo de fresamento foi feito em velocidades de cortes de 150, 200 e 250 m/min e a taxa de alimentação foi de 0,05, 0,1 e 0,15 mm/dente e com uma profundidade de corte de 0,1, 0,15 e 0,2 mm. Concluiu-se que pelo aumento da velocidade de corte, a temperatura de corte é menor que a menor velocidade de corte,

entretanto, pela redução da taxa de alimentação, isso acabou conduzindo para uma baixa temperatura de corte.

Cui et al. (2012), realizaram experimentos de fresamento em faces de altas velocidades de corte do aço AISI H13 (46-47 HRC) com ferramentas de nitreto de boro cubico que foram conduzidas para identificar as características das forças de cortes, formação de cavaco, e desgaste da ferramenta em uma ampla taxa de velocidade de corte (200-1200 m/min). Foi relatado que na velocidade de corte de 800 m/min, no qual pode ser considerada como um valor crítico, carregamento mecânico relativamente baixo, nível de formação de cavaco relativamente baixo, e vida da ferramenta relativamente longo pode ser obtido nesse mesmo tempo. Concluiu-se que ambas as forças de cortes e o nível de formação de cavaco primeiramente diminuiu e depois aumentou com a velocidade de corte, enquanto a vida da ferramenta demonstrou um comportamento oposto.

3.5 – Desgastes de ferramenta de corte

A verificação do desgaste da ferramenta é crucial durante a usinagem de materiais de difícil usinabilidade para amenizar custos e melhorar a eficiência do processo utilizando métodos baseados no mecanismo de desgaste da ferramenta, na taxa de desgaste de ferramenta, e verificando a vida da ferramenta. Com isso, informações mais detalhadas da ferramenta podem ser previstas com o intuito de verificar o estado da ferramenta após a aplicação do processo de usinagem (HU et al., 2019).

Um grande desafio durante a usinagem de materiais de difícil usinabilidade está na obtenção da vida da ferramenta, da qualidade superficial, e de tensões residuais razoáveis. Com base nessas condições, um resfriamento ou a aplicação de um lubrificante é muito importante para reduzir o desgaste da ferramenta e os efeitos de

queima de superfície acelerado devido a geração de calor decorrente do atrito entre a ferramenta e a amostra (KHALIQ et al., 2020).

O desgaste da ferramenta é uma consideração importante para máquinas ferramentas de controle numérico computadorizado (CNC), pois isso afeta diretamente na precisão da usinagem. A usinagem de precisão em massa estimulada pelo alto nível de produtividade e por produtos de alta qualidade baratos são competitivos na indústria de manufatura, com a aplicação do sistema de controle numérico computadorizado (CNC), os parâmetros de usinagem podem ser temporariamente ajustados para estenderem a vida da ferramenta e preservar a qualidade do produto durante a produção em massa (LIAO et al., 2019).

3.6 – Qualidade superficial

Segundo Demir et al. (2017), as condições dos tratamentos térmicos e a velocidade de corte afetam a rugosidade superficial das amostras. Entretanto, em seu estudo as forças cortes não foram afetadas pela microestrutura do aço e pela velocidade de corte, exceto para as amostras resfriadas a água. As diferentes propriedades de usinabilidade do aço ferramenta H13 são explicadas pelas diferenças microestruturais oriundas de diversos tratamentos térmicos.

Tabelas 1 - Valores de dureza das amostras do aço ferramenta H13 tratadas sobre diferentes condições

Amostras	Dureza (HV)
Como recebido	203 +/- 4
Temperado a água	409 +/- 8
Temperado e revenido por 1 hora	391 +/- 3
Temperado e revenido por 2 horas	380 +/-3
têmpera dupla e revenido por 1 hora	376 +/- 2
Têmpera dupla e revenido por 2 horas	373 +/-2

Fonte: Halil et al, (2017).

Conforme está ilustrado na tabela acima, quando diversas amostras do aço H13 são submetidas a diferentes processos de têmpera, é obtido diferentes valores de dureza, o qual essa característica está relacionada com a taxa de resfriamento, tempo de aquecimento e com o mecanismo de resfriamento adotado.

Cui et al. (2011), relataram que diversas pesquisas anteriormente da usinabilidade em alta velocidade foi conduzida para buscar alta eficiência e precisão de usinabilidade. Foi realizado um estudo sobre as características das forças de cortes, rugosidades superficiais, e formação de cavaco obtido em alta e ultra velocidade na face de fresamento do aço AISI H13 (46-47HRC). Foi descoberto que a ultra velocidade de corte de 1400 m/min, pode ser considerada como um valor crítico, no qual o carregamento mecânico é relativamente baixo, excelente superfície acabada, e alta eficiência de usinabilidade eram esperados para acontecer ao mesmo tempo. Quando a velocidade de corte adaptada está abaixo de 1400 m/min, a contribuição pedida dos parâmetros de corte para rugosidade superficial está axialmente na profundidade de corte.

Cui et al. (2014), estudaram o resultado do fresamento em alta velocidade do aço endurecido AISI H13 com relação ao desempenho de corte de ferramentas revestidas de carbonetos. Foi feita uma análise das características da morfologia do cavaco, vida da ferramenta, mecanismos de desgastes das ferramentas, e rugosidade superficial e então os resultados obtidos em diferentes condições de cortes foram comparados. Concluiu-se que quando o fresamento foi aplicado com uma velocidade de corte alta/baixa, a forma do cavaco foi alterada gradualmente, a interação entre a ferramenta de corte e peça conduziram para a formação do cavaco.

Gerson L. et al (2009), realizaram uma pesquisa que tinha como objetivo avaliar quantitativamente e qualitativamente o comportamento da qualidade superficial de um

aço usado na produção de matrizes e moldes. O estudo foi realizado no endurecido aço ferramenta AISI H13 inclinado em um ângulo de 60°. A rugosidade da superfície fresada foi medida e verificada por microscopia de escaneamento eletrônico a fim de comparar as estratégias e as texturas superficiais obtidas. Quatro formas de estratégias de corte foram empregadas nesse experimento. Com isso, foi concluído que na estratégia vertical para cima, a superfície mostra uma excelente rugosidade e uma irregularidade com relação a deformação plástica e as outras estratégias mostraram rugosidade inferior e regularidade similar.

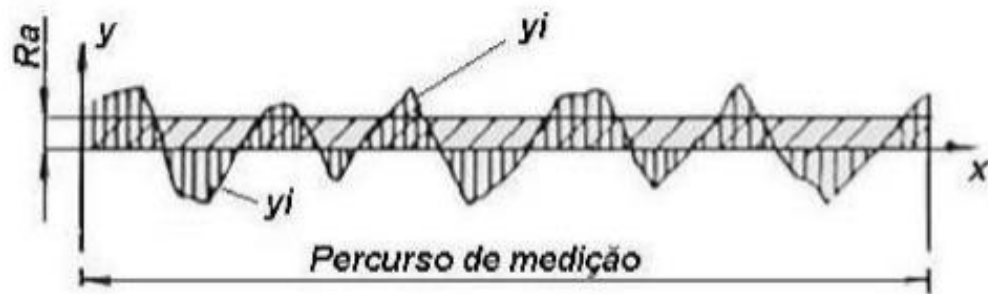
Segundo Ratnam (2017), a rugosidade de uma superfície usinada é considerada como uma das principais características de um produto, uma vez que influencia diretamente na vida em fadiga, no coeficiente de atrito, na resistência ao desgaste e, conseqüentemente, na confiabilidade do produto durante o serviço.

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 (Ra). Esse parâmetro de rugosidade consiste na média aritmética dos valores absolutos das ordenadas de afastamento (Equação 1) em relação a linha média Figura 5.

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

onde l_m é o percurso da medição.

Figura 5 - Rugosidade média (Ra)

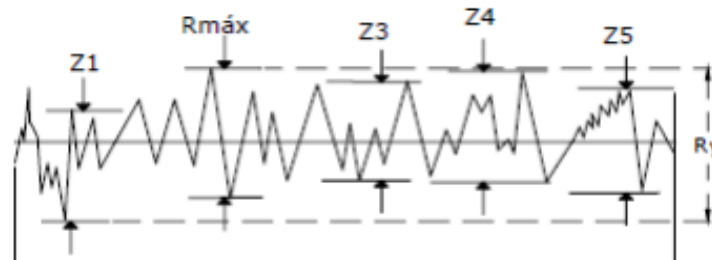


Fonte: Amorim, 2002.

O valor de Ra é geralmente expresso em μm no sistema métrico e μin no sistema inglês, com os rugosímetros possuindo, usualmente, 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 6 corresponde à diferença encontrada entre o ponto mais alto e o ponto mais baixo ao longo do perfil de rugosidade traçado.

Figura 6 - Parâmetro de Rugosidade (Ry)

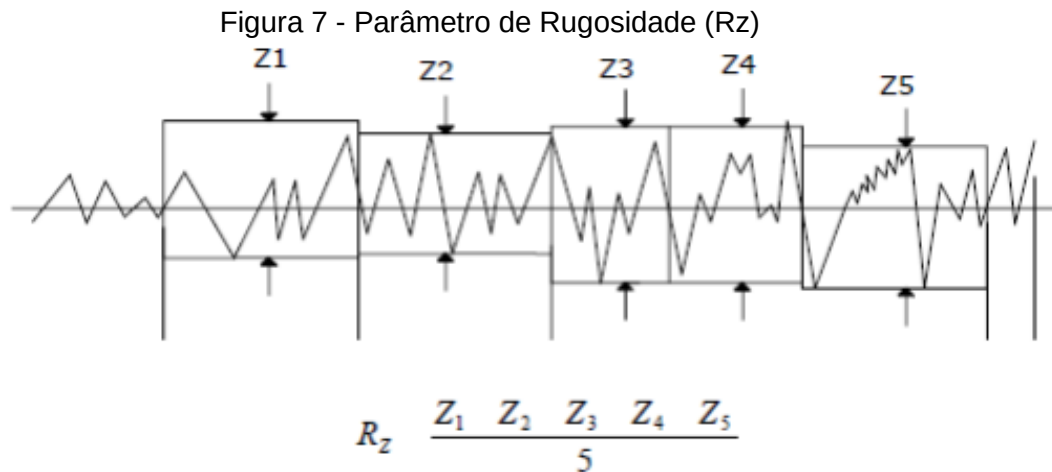


Fonte: Senai (Modificado).

A rugosidade Ry não será aplicada no presente trabalho por conta que nem todos os equipamentos fornecem o parâmetro e para avaliá-lo através de gráfico é preciso ter certeza de que o perfil registrado é um perfil de rugosidade, e caso seja o perfil efetivo (sem filtragem), deve ser feita uma filtragem gráfica. Além disso, pode ser coletada uma imagem errônea da superfície, pois avalia-se erros que muitas vezes

não representam a superfície como um todo, como por exemplo, um risco causado após a usinagem e que não caracteriza o processo.

O R_z Figura 7 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).

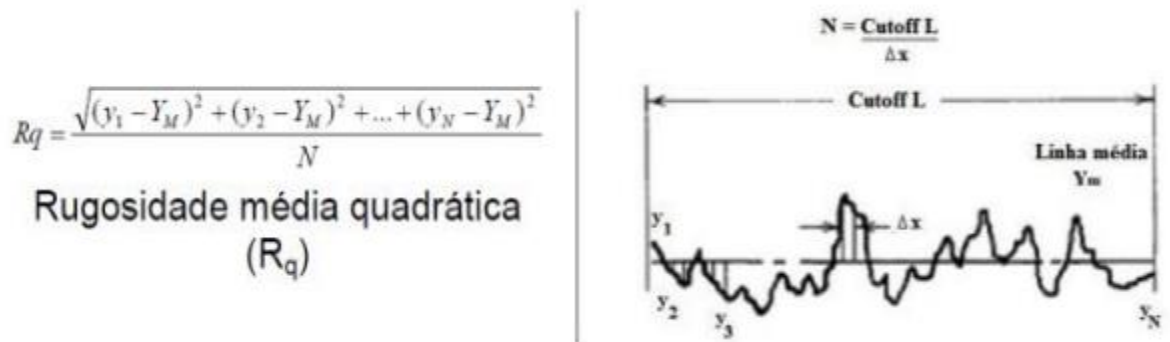


Fonte: Senai (modificado)

A rugosidade R_z também não será aplicada no presente trabalho porque em algumas aplicações essa consideração parcial dos pontos isolados não é aconselhável, pois um ponto isolado acentuado será considerado somente em 20% mediante a divisão de 1/5. Assim como o R_{max} , não possibilita nenhuma informação sobre a forma do perfil, bem como da distância entre as ranhuras e nem todos os equipamentos fornecem este parâmetro.

Além desses anteriormente mencionados, existe também o parâmetro R_q Figura 8, denominado rugosidade média quadrática, que representa o desvio padrão do perfil de rugosidade.

Figura 8 - Parâmetro de Rugosidade (Rq)



Fonte: ABNT NBR ISO 4287:2002

A rugosidade influência 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 fresamento, a rugosidade é afetada por vários fatores, como avanço, velocidade de corte, dureza do material, profundidade de corte, força de corte e condições de corte (MUHL, 2019).

3.7 – Usinabilidade

Kashyap et al. (2020) definiram que a usinabilidade de um material está altamente influenciada pela qualidade superficial e pela taxa de remoção de material durante o processo de usinagem, com base nisso, em qualquer processo de usinagem, é de suma importância ter um estudo minucioso sobre como os parâmetros dos processos afetam a qualidade de usinabilidade.

Demir et al. (2017) relataram que um dos fatores que afetam a vida útil e a confiabilidade de aços ferramenta é a microestrutura e a composição química de carbonetos não dissolvidos durante a austenitização. Concluindo-se que o tipo e a fração de volume de carbonetos determina a saturação da matriz com carbono e elementos de liga, portanto, boas propriedades mecânicas são obtidas como um

resultado de separação de dispersão de carbonetos durante a têmpera, impactando a usinabilidade do material.

Adesta et al. (2018) definiram que a usinabilidade do aço ferramenta AISI H13 é uma questão proeminente já que o material tem as características de alta endurecibilidade, excelente resistência ao desgaste, e alta tenacidade. Foi concluído que uma forma de melhorar a vida de corte de um aço ferramenta AISI H13 durante o fresamento é realizar a fresagem alternado o percurso e as condições de corte que são propostas. Com isso, é esperado que exista diferenças significativas para cada aplicação de estratégia de percurso e para cada fator de condição de corte com relação a força de corte e a força de corte.

4. 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).

4.1 Materiais

4.1.1 Aço AISI H13

O aço AISI H13 foi obtido por meio de uma doação realizada pela empresa Favorit. Sua composição química fornecida pela empresa Favorit está exposta na tabela 2.

Tabelas 2 - Composição química do aço AISI H13

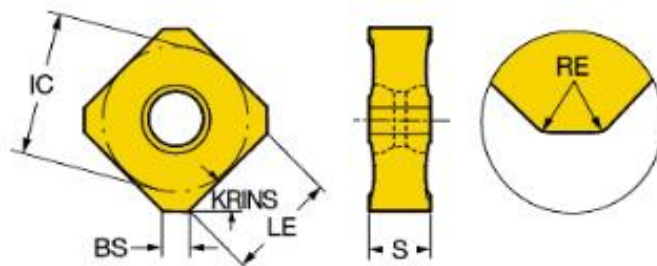
C	Mn	P	S	Si	Cr	Mo	V
0,32 - 0,45	0,20 - 0,50	0,03	0,03	0,80 - 1,20	4,75 - 5,50	1,10 - 1,75	0,80 - 1,20

Fonte: Favorit, 2021.

4.1.2 Pastilha de metal duro

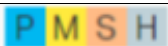
As pastilhas de metal duro CoroMill 345 utilizadas neste trabalho são especificadas para a operação de fresamento, modelo 345R – 1305M – PM 1130, da marca Sandvik, cujas especificações podem ser vistas na figura 9 e tabela 3.

Figura 9 - Representação Genérica da Pastilha modelo 345R



Fonte: Sandvik.

Tabelas 3 - Especificações Técnicas da Pastilha modelo 345R

Classificação de materiais nível 1 (TMC1ISO)	
Tipo de operação (CTPT)	Medium
Código de montagem da pastilha (IFS)	3
Diâmetro do furo de fixação (D1)	4,8 mm
Formato e tamanho da pastilha (CUTINTSIZESHAPE)	CoroMill 345-1305
Número de arestas de corte (CEDC)	8
Diâmetro do círculo inscrito (IC)	13 mm
Código do formato da pastilha (SC)	S
Comprimento efetivo da aresta de corte (LE)	8,8 mm
Profundidade de corte máxima (APMX)	6 mm
Comprimento da aresta alisadora (BS)	2 mm
Raio da aresta alisadora (BSR)	107 mm
Raio de canto (RE)	0,8 mm
Ângulo da aresta de corte principal (KRINS)	45 deg
Ângulo de saída da pastilha (GAN)	24 deg
Sentido (HAND)	R
Classe (Grade)	1130
Substrato (Substrate)	HC
Cobertura (COATING)	PVD AlTiCrN
Espessura da pastilha (S)	5,05 mm
Peso do item (WT)	0,01 kg
Release date (ValFrom20)	2018-02-23
ID de liberação do pacote (RELEASEPACK)	18.1
Valores iniciais:	
 fz 0.3 mm(0.16-0.4) vc 195 m/min(235-170)	

Fonte: Sandivik.

4.2 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 e de têmpera e duplo revenido das amostras do H13 foram realizadas em um forno a vácuo da marca EDG 3000.

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 56 Shimadzu.

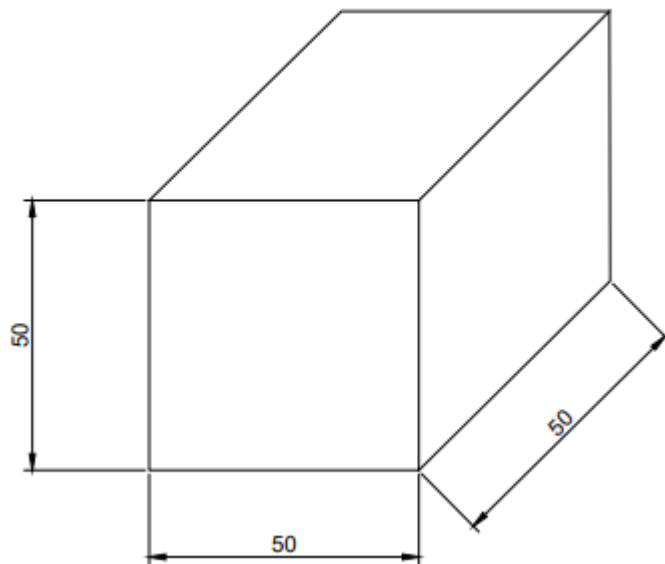
Para as análises de rugosidade das peças usinadas foi utilizado um rugosímetro portátil Surftest SJ 201P, da marca Mitutoyo.

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

Os ensaios de fresagem aplicados para a realização do faceamento das amostras foram realizados em uma fresadora universal Marógépgyára Esztergom do tipo MS 400-02.

Na Figura 10 está representado a amostra usada durante a realização do experimento.

Figura 10 - Representação da amostra do aço H13

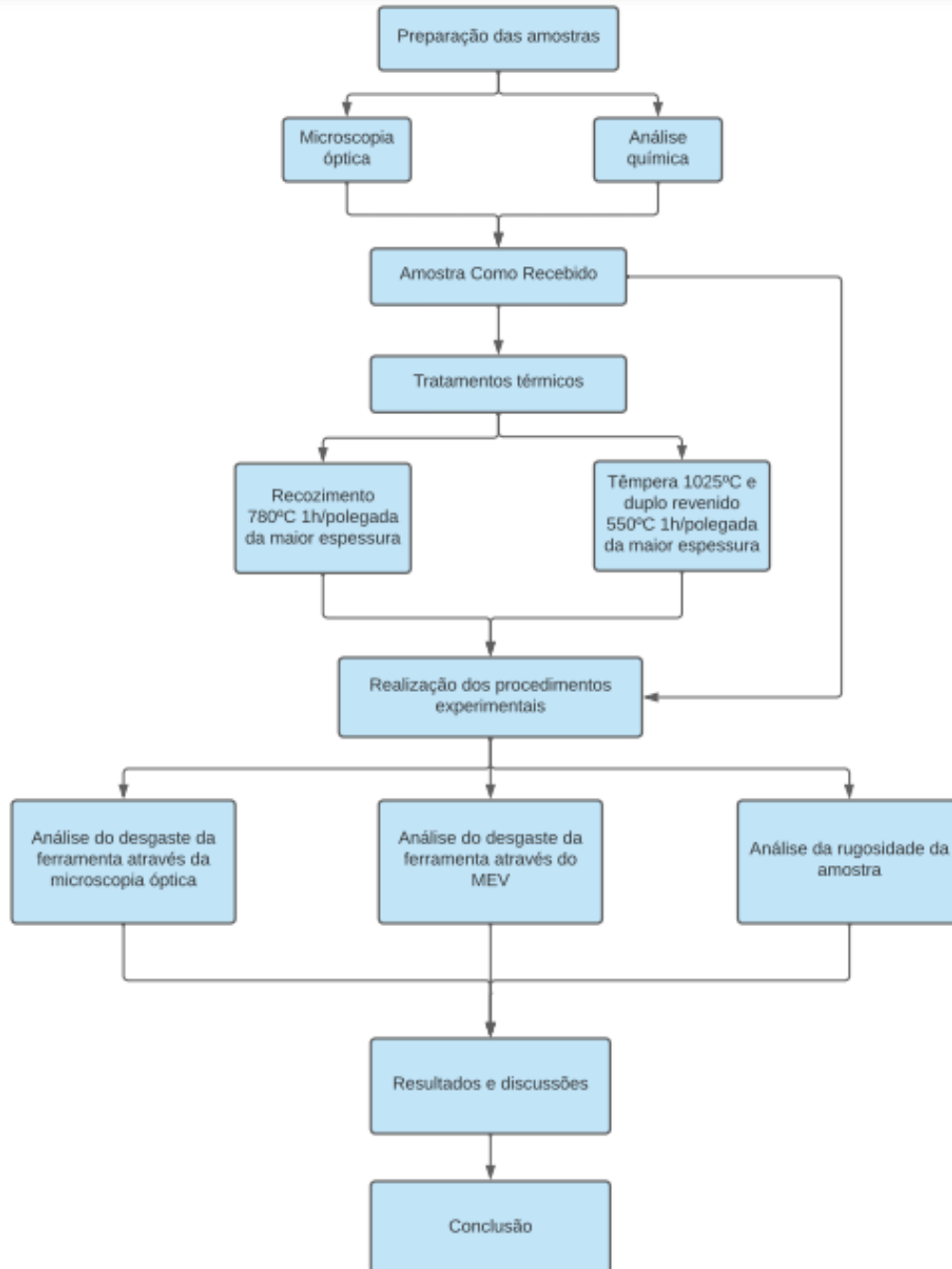


Fonte: Autor.

4.3 Metodologia

A figura 11 apresenta o fluxograma dos procedimentos experimentais que foram realizados.

Figura 11 - Fluxograma dos procedimentos experimentais a serem realizados



Fonte: autor.

Inicialmente foram confeccionadas três amostras do aço AISI H13 para realização de análise química e microestrutural. Após essa etapa, foram confeccionadas as amostras com geometria de 50 mm x 50 mm x 50 mm e realizados os tratamentos térmicos de recozimento a 780°C e têmpera em 1025°C com duplo revenido a 550°C, ambos com tempo de duração de (1h/ polegada da maior espessura). Importante frisar que 1/3 das amostras não sofreram tratamentos térmicos e serão usinadas conforme recebidas. Após os processos de tratamentos térmicos, as amostras foram submetidas ao processo de faceamento por meio do fresamento de ambas com o mesmo avanço, mas com velocidades de cortes diferentes, sendo utilizado como parâmetro de escolha a tabela de velocidade definida pelo fabricante da ferramenta adotando-se uma velocidade dentro do limite recomendado e outra fora desse limite para que uma comparação dos resultados seja feita ao longo do projeto e depois foram feitos os processos de MEV e microscopia óptica com a finalidade de analisar quais foram os efeitos que os tratamentos térmicos causaram na usinabilidade dos corpos de provas e por fim, uma análise no desgaste da ferramenta foi realizado para se ter com clareza quais foram os impactos que os processos de recozimento e têmpera causaram na usinabilidade do aço AISI H13.

Os parâmetros de corte aplicados estão apresentados na Tabela 4.

Tabelas 4 - Parâmetros de corte dos procedimentos experimentais

Parâmetros de corte	
v_c (mm/min)	200
	300
a_z (mm/z)	0,02
	0,02
a (mm/rot)	0,1
	0,1
Profundidade de corte (mm)	0,1
	0,1

Fonte: Autor.

Os processos de fresamentos dos corpos de prova foram realizados a seco, ou seja, sem aplicação de fluído de corte. Para cada ensaio os corpos de provas foram divididos em 3 grupos: no estado como recebido, recozido e temperado com duplo revenido.

O acabamento superficial da peça usinada foi avaliado com a utilização de um rugosímetro, fazendo medições em triplicata de 4 pontos diferentes da amostra e tomando a sua média. Foram medidas a rugosidade média (R_a), o desvio médio quadrático (R_q).

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 5 passes até atingir o final dos experimentos.

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 os mecanismos de desgastes.

5. RESULTADOS E DISCUSSÕES

5.1 Análise química e metalográfica do material

O resultado da análise da composição química do aço AISI H13, feita por meio da espectrometria, apresentou valores dentro dos limites esperados, de acordo com a literatura (FAVORIT, 2021) e pode ser analisado na Tabela 5.

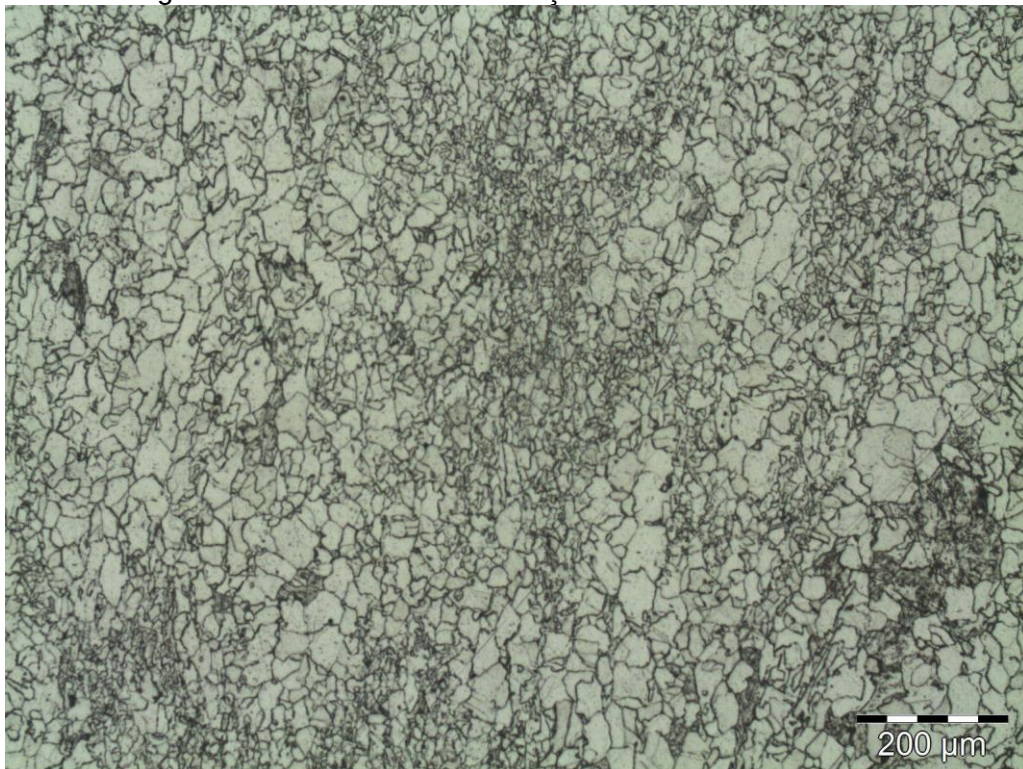
Tabelas 5 - Espectrometria AISI H13

C	Mn	P	S	Si	Cr	Mo	V
0,4546	0,4226	0,0132	0,005	0,8416	5,1833	1,3433	1,1066

Fonte: Autor.

Na figura 12 é possível ver a microestrutura do aço AISI H13 em seu estado como recebido, anterior a sua submissão ao tratamento térmico de recozimento e de têmpera interrompida seguido de duplo revenido.

Figura 12 - Microestrutura do aço AISI H13 como recebido



Fonte: Autor.

Com base na análise microestrutural da Figura 12, conclui-se que os elementos presentes no aço H13 como recebido foram carbonetos globulares distribuídos na

matriz ferrítica que atribui ao material uma boa resistência mecânica acompanhada de uma elevada resistência ao desgaste. Além das análises química e microestrutural, o material foi submetido também a um ensaio de microdureza que resultou uma dureza de 253 HV.

5.2 Tratamento térmico de recozimento

O recozimento foi realizado aquecendo-se as amostras a temperatura de 780°C e mantendo-as no forno por 1 hora e 30 minutos, o que corresponde a 1 hora para cada polegada da maior espessura, conforme exige a literatura. Após isso, os corpos de prova foram resfriados lentamente ao forno.

Na figura 13 é possível ver a microestrutura do aço AISI H13 após o tratamento térmico de recozimento.

Figura 13 - Microestrutura do aço AISI H13 após recozimento



Fonte: Autor.

Com base na análise microestrutural da Figura 13, foi possível determinar que os constituintes presentes na amostra recozida são carbonetos distribuídos na matriz ferrítica conferindo ao material excelentes propriedades mecânica como resistência

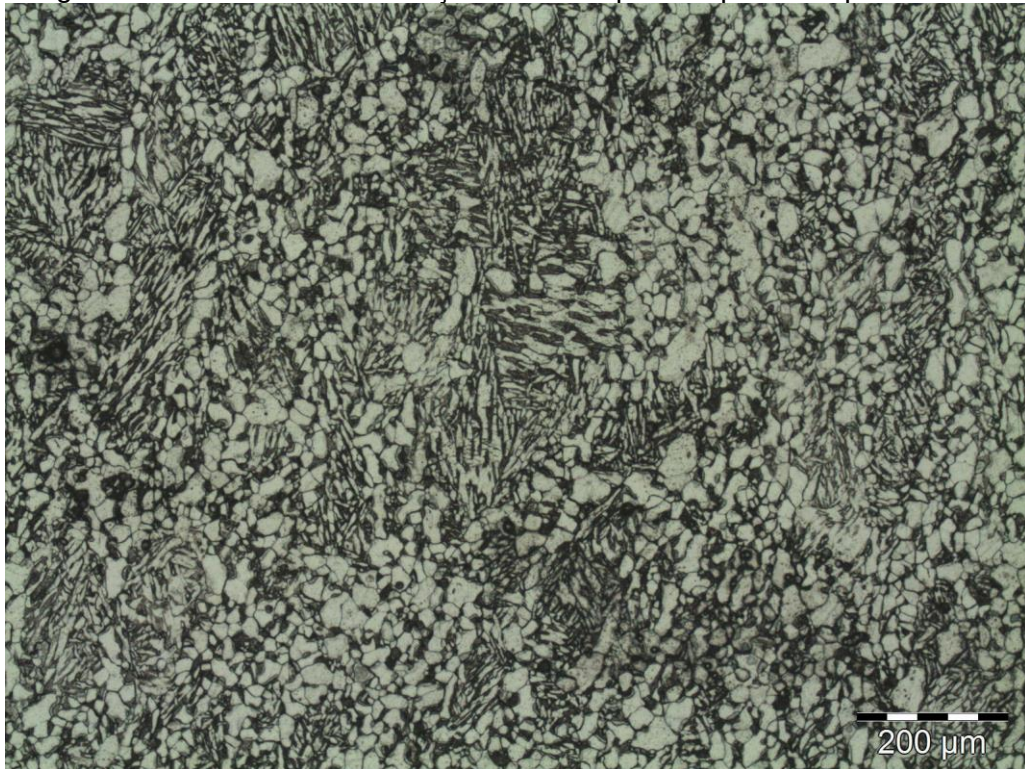
mecânica e dureza elevada. O resultado do ensaio de microdureza realizado no aço após o tratamento térmico de recozimento pleno foi de 220,7 HV. Isso significa que o tratamento térmico foi eficaz, uma vez que, a dureza diminuiu com relação a amostra no seu estado como recebido.

5.3 Tratamento térmico de têmpera e duplo revenido

A têmpera foi realizada aquecendo-se as amostras a temperatura de austenitização de 1025 °C e mantendo-as no forno por 1 hora e 20 minutos, o que corresponde a 1 hora por polegada da maior espessura, conforme exige a literatura. Após isso, os corpos de prova foram colocados em contato com um polímero para serem resfriados até uma temperatura de aproximadamente 80 °C, tomando-se um certo cuidado para que as amostras não cheguem a uma temperatura menor que os 80 °C, pois as amostras poderiam trincar devido a sua excessiva dureza obtida pela têmpera. Após as amostras resfriarem até 80°C, elas foram submetidas ao primeiro revenimento a uma temperatura de 565 °C e mantendo-as no forno por 2 horas e depois resfriando-se as amostras no forno até a temperatura ambiente. Depois desse procedimento, as amostras passaram pelo segundo revenimento a uma temperatura de 600 °C, mantendo-as no forno por 2 horas e depois resfriando-se as amostras no forno até a temperatura ambiente.

Na figura 14 é possível ver a microestrutura do aço AISI H13 após o tratamento térmico de têmpera e revenido.

Figura 14 - Microestrutura do aço AISI H13 após têmpera e duplo revenido



Fonte: Autor.

Com base na análise microestrutural da Figura 14, foi possível determinar que todos os constituintes presentes na amostra após o tratamento térmico de têmpera e duplo revenido são uma estrutura refinada com martensita e carbonetos globulares que atribui ao material uma dureza muito alta quando comparada com a amostra recozida ou com a como recebido atribuindo ao material uma boa resistência mecânica junto com uma elevada resistência ao desgaste. O resultado do ensaio de microdureza realizado no aço após o tratamento térmico de têmpera e duplo revenido foi de 410,5 HV. Isso significa que o tratamento térmico foi eficaz, uma vez que, a dureza aumentou com relação a amostra no seu estado como recebido.

5.3 Análise do desgaste da ferramenta de corte

Os ensaios de usinagem foram realizados definindo-se dois parâmetros de cortes distintos para a velocidade de corte e avanço, como sendo um dentro da faixa estabelecida pelo fabricante e outro fora da faixa estabelecida pelo fabricante.

O tipo de desgaste da ferramenta de corte que surgiu durante os ensaios foram o desgaste de flanco e o desgaste abrasivo, que se relaciona ao raio de ponta da ferramenta, que possui um valor abaixo de 0,4 mm, gerando maior instabilidade no gume quando exposto a altas temperaturas e abrasão mecânica (FERRARESI, 2014).

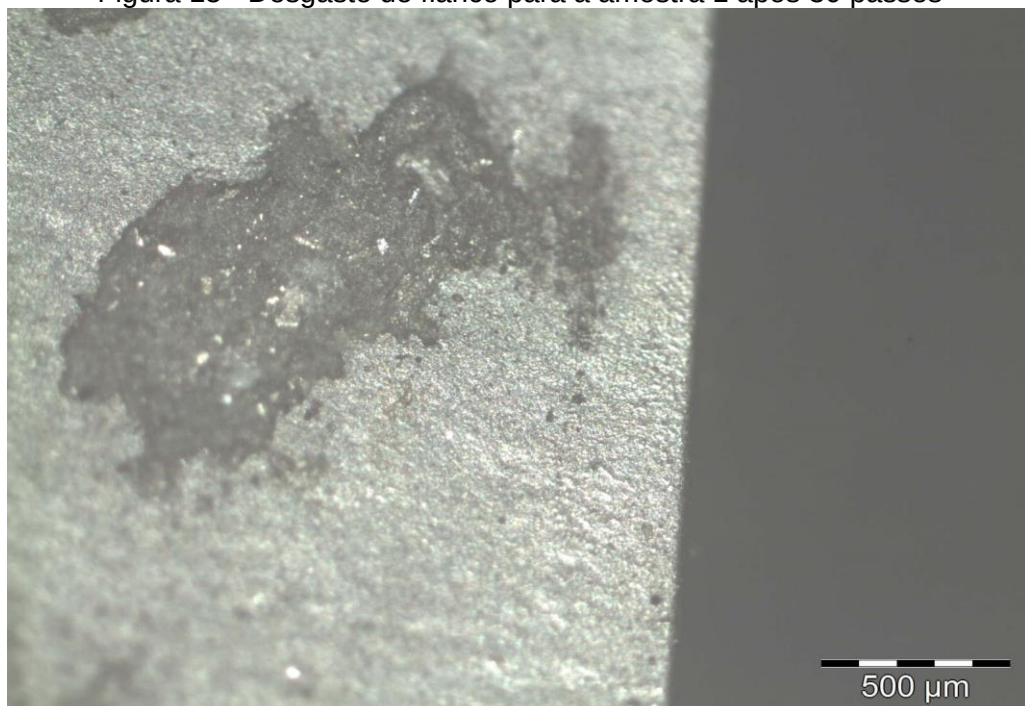
SANTOS; S. C. e SALES (2007) citam que o fim de vida de uma ferramenta de corte é definido pelo grau de desgaste previamente estabelecido. Este desgaste dependerá de vários fatores, como:

- Altas temperaturas na interface do cavaco-ferramenta;
- Aumento nas dimensões da rebarba;
- Receio de quebra da cunha cortante.

5.3.1. Ensaio amostra 1 sem tratamento térmico – velocidade de corte 200 mm/min e avanço 0,1 mm/rot

Na Figura 15 está representado o desgaste que a ferramenta sofreu depois de 30 passes realizados durante o processo de fresamento.

Figura 15 - Desgaste de flanco para a amostra 1 após 30 passes



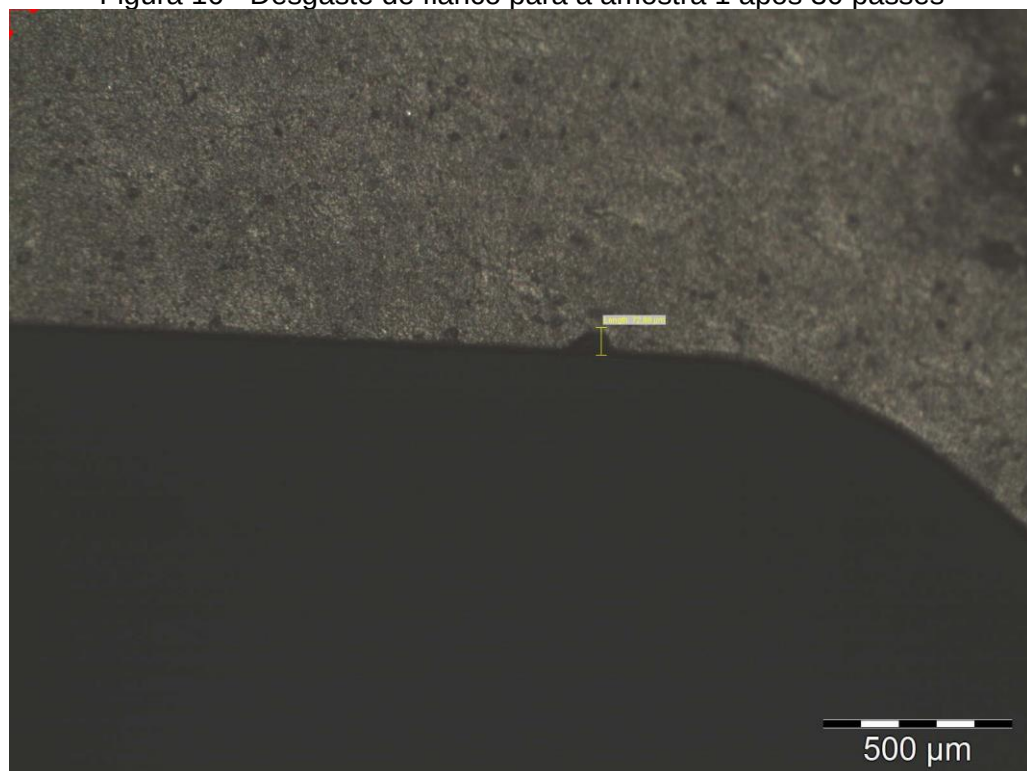
Fonte: autor.

Zhang et al. (2018) concluíram que uma ferramenta de metal duro possuindo uma camada protetiva contra o aumento de temperatura durante o processo de fresamento resultou em uma forte capacidade contra o desgaste abrasivo e surgimento de trincas.

Pode-se verificar na análise da Figura 15 a presença do desgaste de flanco abrasivo influenciado pela abrasão mecânica com a peça, apresentando maior presença de partículas aderidas e sinais de temperaturas mais elevadas, com aparente queima em ambas as superfícies.

Na Figura 16 está representado um desgaste de flanco que a ferramenta sofreu depois de 30 passes realizados durante o processo de fresamento.

Figura 16 - Desgaste de flanco para a amostra 1 após 30 passes



Fonte: autor.

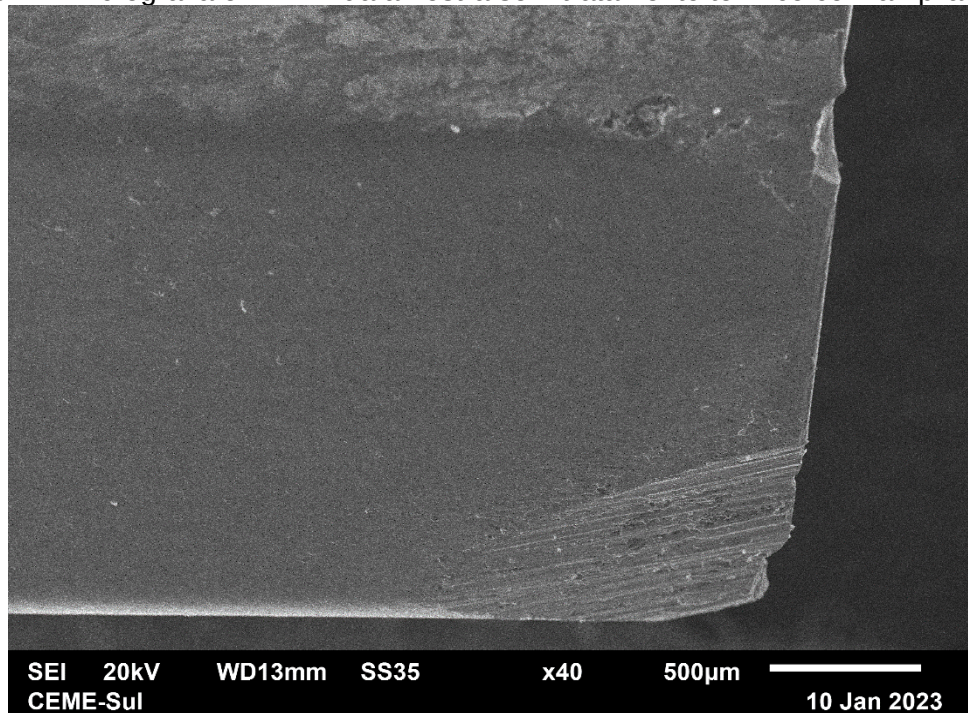
Odedeyi et al. (2017), afirmaram que o desgaste de flanco é um desenvolvimento de uma ranhura que ocorre normalmente na face e no flanco da ferramenta na profundidade de corte. Isso ocorre por causa da superfície de trabalho

ser mais dura e mais abrasiva que o material interno devido ao endurecimento do trabalho de usinagem anterior. Durante o experimento, foi utilizado uma velocidade de corte de 200 mm/min que resultou um desgaste de flanco de 0,24 mm, com um avanço de 0,02 mm/rev.

Com base na análise da Figura 16, é possível verificar depois de 30 passes um desgaste de flanco com uma profundidade de $72,88 \mu\text{m}$, possuindo um desgaste de flanco menos severo. Esse menor desgaste de flanco pode estar relacionado com a cobertura da ferramenta, que por possuir PVD AlTiCrN e isso diminui a condutibilidade térmica na ferramenta aumentando a integridade da ferramenta.

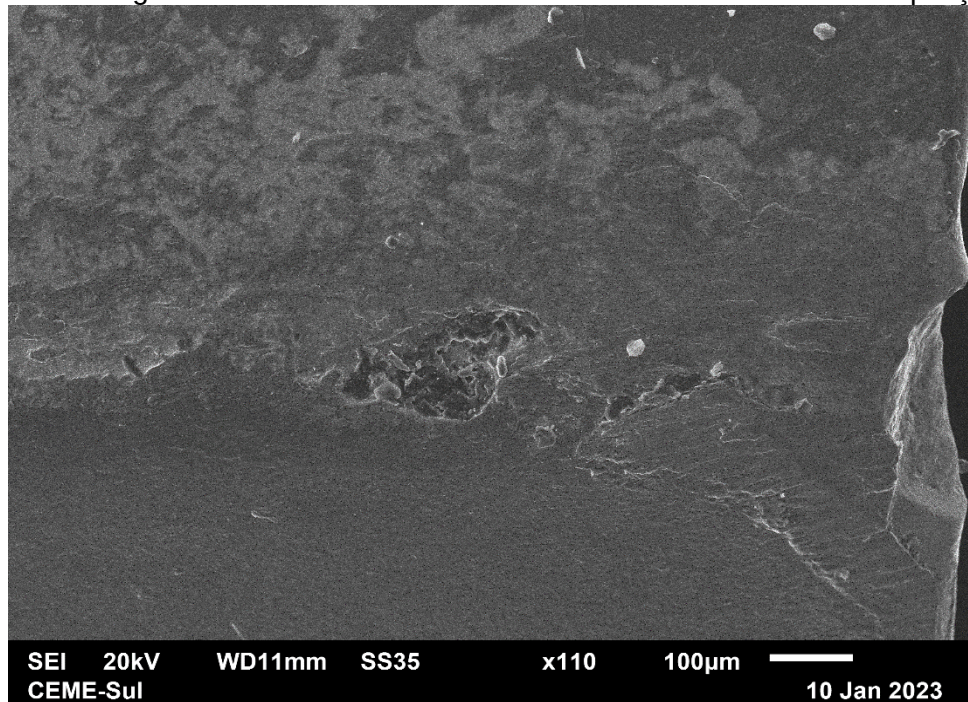
Nas Figuras 17 e 18 estão representados os desgastes que a ferramenta sofreu no final do ensaio por meio da microscopia eletrônica de varredura.

Figura 17 - Micrografia em MEV da amostra sem tratamento térmico com ampliação x40



Fonte: autor.

Figura 18 - Micrografia em MEV da amostra sem tratamento térmico com ampliação x110



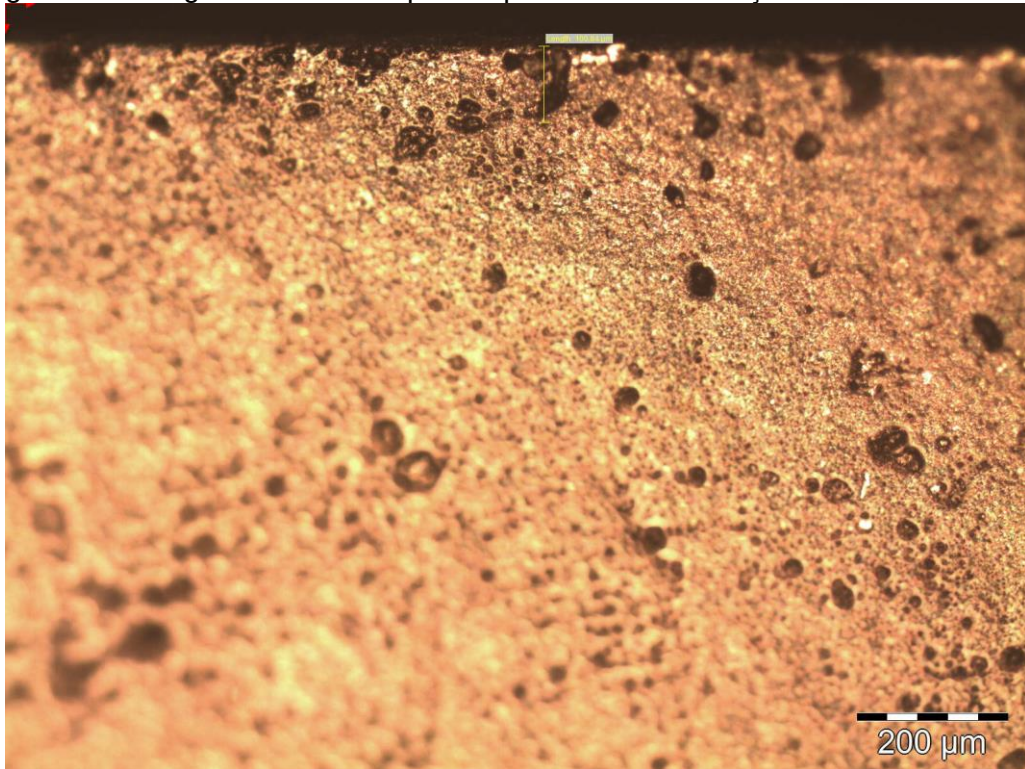
Fonte: autor.

Com base na análise das Figura 17 e 18 é possível analisar o estado da ferramenta no final do ensaio apresentando o desgaste de flanco e o lascamento que a amostra sofreu durante o ensaio ultrapassando o limite de resistência do material da ferramenta em regiões específicas devido a vibrações ou por conta das variações da temperatura durante a operação de usinagem aumentando o gradiente térmico entre a ferramenta e a amostra elevando o desgaste da ferramenta.

5.3.2. Ensaio amostra 2 sem tratamento térmico – velocidade de corte 300 mm/min e avanço 0,1 mm/rot

Na Figura 19 está representado o desgaste que a ferramenta sofreu depois de 25 passes com uma magnificação de 10x, sofridos durante o processo de fresamento.

Figura 19 - Desgaste de flanco após 25 passes com resolução aumentada em 10x



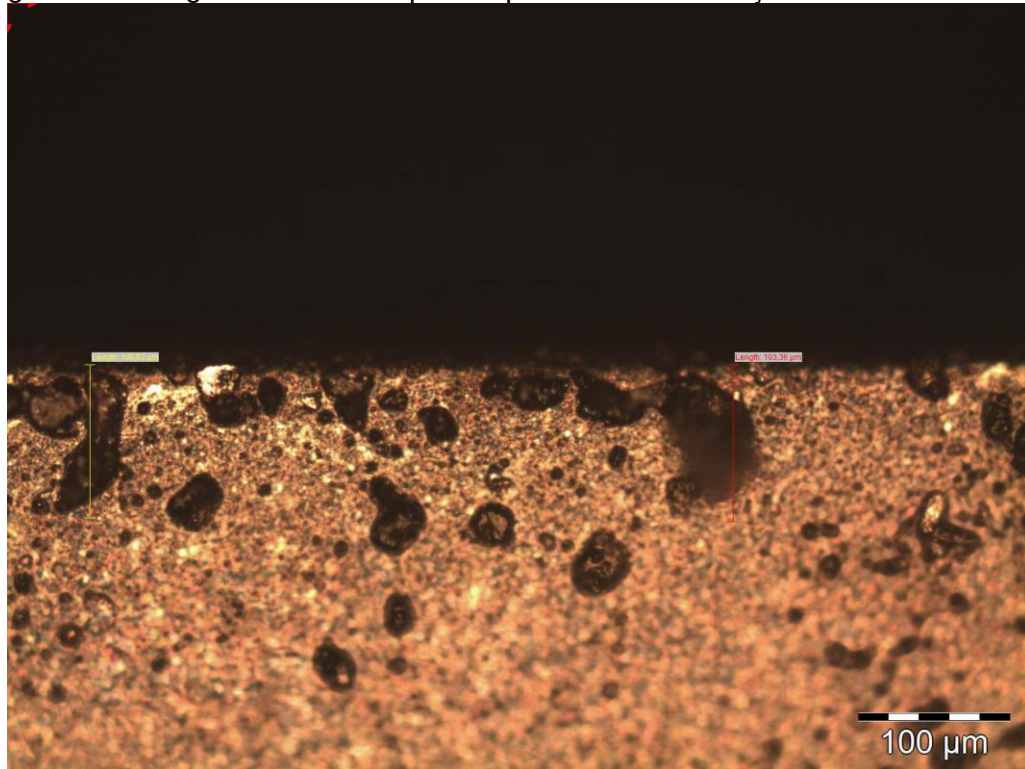
Fonte: autor.

Lu et al. (2017) concluíram que o desgaste da ferramenta tem um impacto muito importante relacionado com a variação da velocidade de corte durante o processo de fresamento, resultando em um desgaste de flanco severo, mas que pode ser reduzido mediante o emprego de uma camada protetiva de Al, com a finalidade de aumentar a vida útil da ferramenta.

Com base da análise da Figura 19, observa-se um desgaste de flanco com uma profundidade de $100,84 \mu m$. Logo, a ferramenta atendeu o padrão esperado, uma vez que, a camada protetiva de Al presente na ferramenta possui uma resistência térmica alta.

Na Figura 20 está representado o desgaste que a ferramenta sofreu depois de 25 passes com uma magnificação de 20x, sofridos durante o processo de fresamento.

Figura 20 - Desgaste de flanco após 25 passes com resolução aumentada em 20x



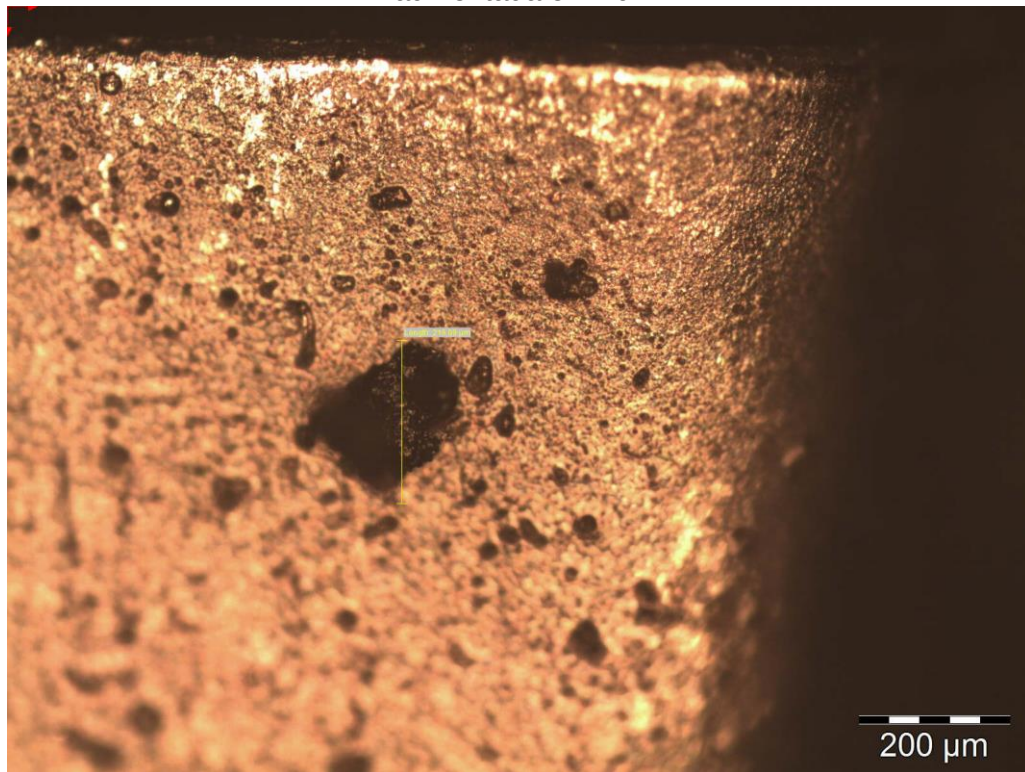
Fonte: autor.

Razak et al. (2016) afirmaram que com o aumento da velocidade de corte durante o fresamento, uma tendência para um aumento do desgaste da ferramenta também aumentaria, na medida que se fossem realizados os passes de fresamento. Para amenizar esse fator, foi aplicado um revestimento protetivo de Al que resultou em um desgaste de flanco após sucessivos passes, resultando em uma melhora da vida útil da ferramenta.

Com base da análise da Figura 20, observa-se dois desgastes de flanco presentes na ferramenta, um com uma largura de $100,83 \mu m$ e outro com uma largura de $103,39 \mu m$. Conclui-se que foram necessários diversos passes para o surgimento do desgaste de flanco na ferramenta, tornando o resultado dentro do esperado.

Na Figura 21 está representado o desgaste que a ponta da ferramenta sofreu depois de 30 passes com uma resolução aumentada em 10x, sofridos durante o processo de fresamento.

Figura 21 - Desgaste de flanco na ponta da ferramenta após 30 passes com resolução aumentada em 10x



Fonte: autor.

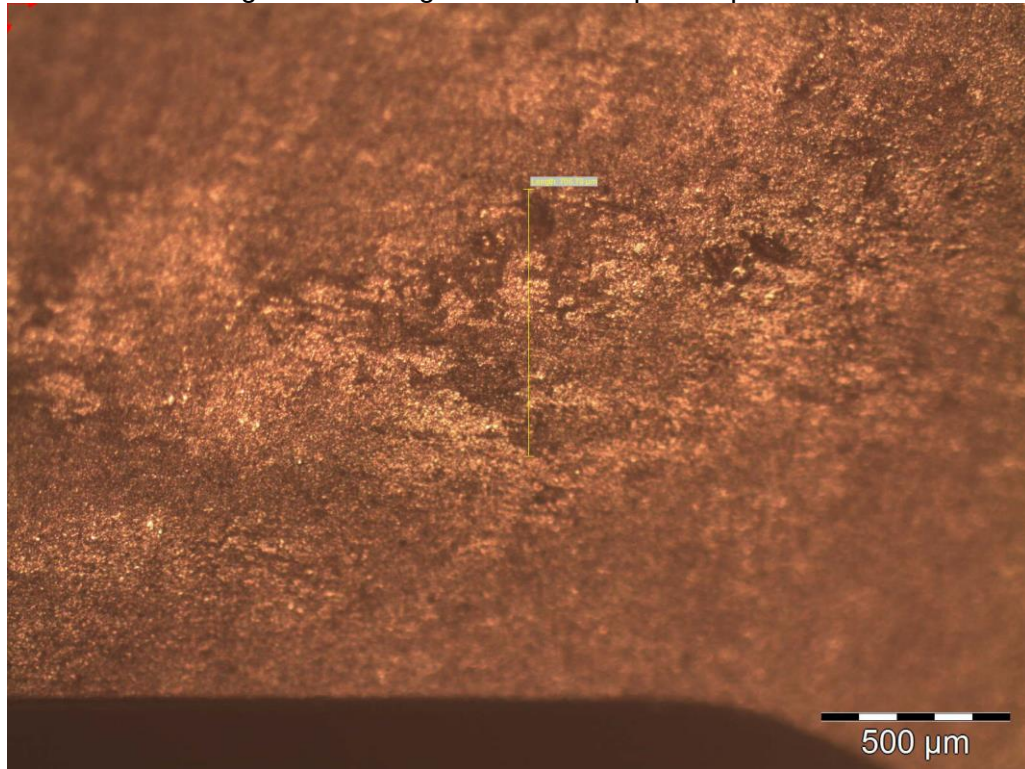
Najiha et al. (2016) afirmaram que o desgaste de flanco da ferramenta tem uma grande influência na velocidade de corte, e o aumento do desgaste da ferramenta resulta em um aumento substancial na velocidade de corte.

Ghani et al. (2004) definiram que combinações de baixa velocidade de corte, taxa de avanço e profundidade de corte, as ferramentas de metal duro sem revestimento apresentam desgaste mais uniforme e gradual na face de flanco do que aquelas com as mesmas condições de fresamento de ferramentas de metal duro revestidas com alumínio.

Com base da análise da Figura 21, observa-se um desgaste de flanco com uma largura de $216,09 \mu m$. Assim, com o aumento da velocidade de corte, percebe-se uma progressão do desgaste de flanco oriunda das altas solicitações mecânicas aplicadas durante o fresamento.

Na Figura 22 está representado o desgaste abrasivo que a ferramenta sofreu no final do ensaio com uma resolução aumentada em 20x, sofridos durante o processo de fresamento.

Figura 22 - Desgaste abrasivo após 30 passes



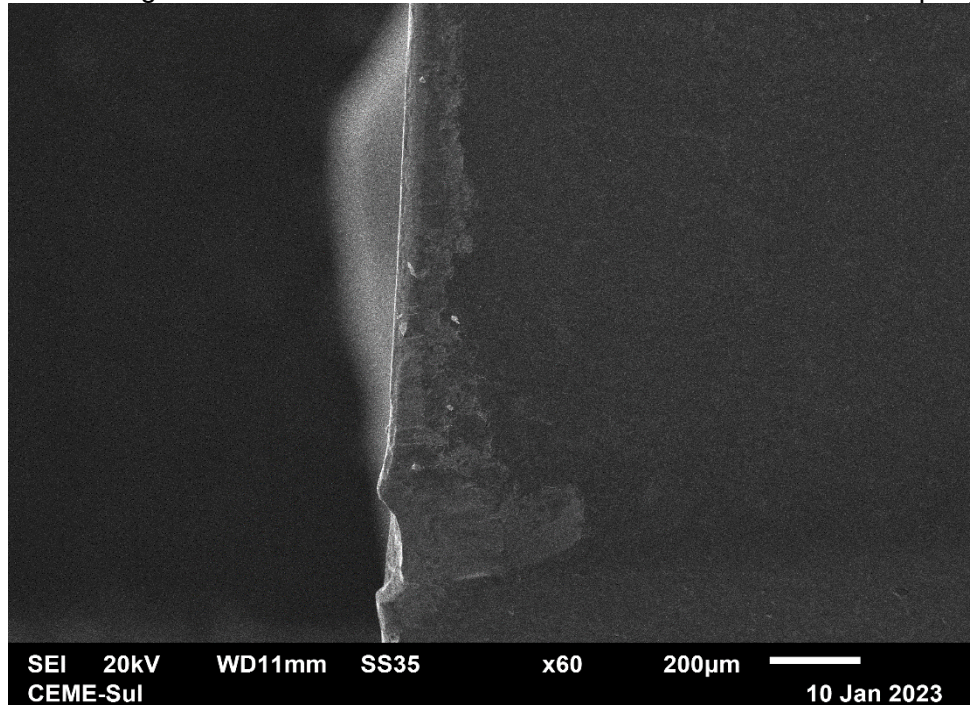
Fonte: autor.

Deng et al. (2020) definiram que os mecanismos de desgaste da ferramenta de metal duro que possui uma camada protetiva de Al em certos estágios de fresamentos posteriores são desgastes abrasivos e adesivos devido a combinação da matriz de alumínio. Foi concluído que o desgaste da ferramenta é acelerado quando um percentual em peso de partículas reforçadas excede um ponto crítico.

Com base da análise da Figura 22, observa-se um desgaste abrasivo com uma largura de $706,78 \mu m$. Portanto, o desgaste abrasivo presente na ferramenta possui um valor significativo, caracterizado pela sua aceleração relacionada com as partículas reforçadas de Al que compõem a ferramenta.

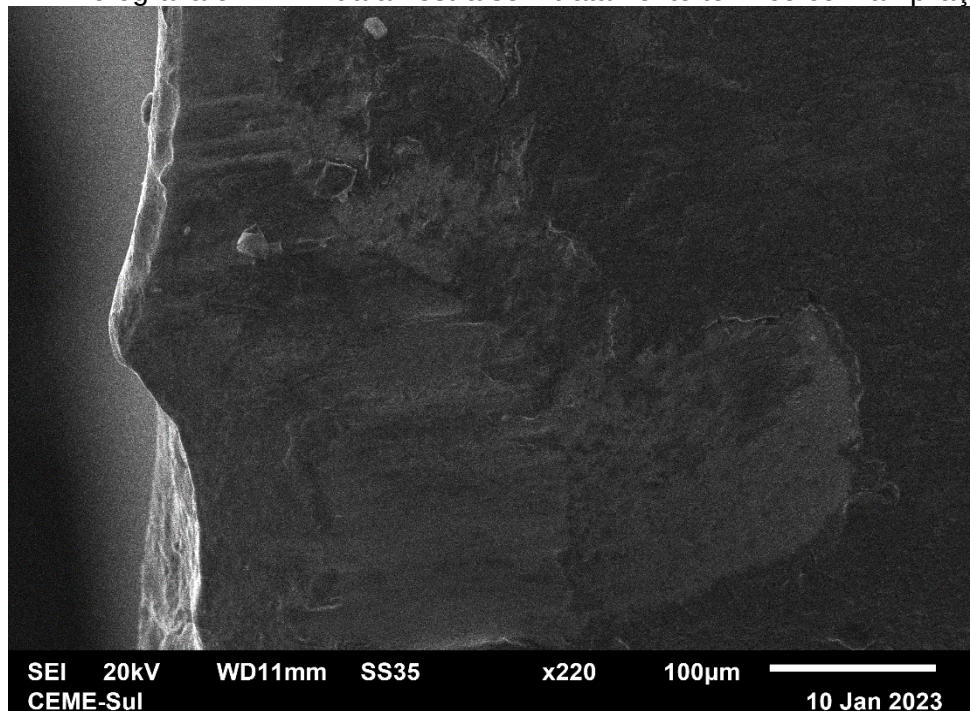
Nas Figuras 23 e 24 estão representados os desgastes que a ferramenta sofreu no final do ensaio por meio da microscopia eletrônica de varredura.

Figura 23 - Micrografia em MEV da amostra sem tratamento térmico com ampliação x60



Fonte: autor.

Figura 24 - Micrografia em MEV da amostra sem tratamento térmico com ampliação x220



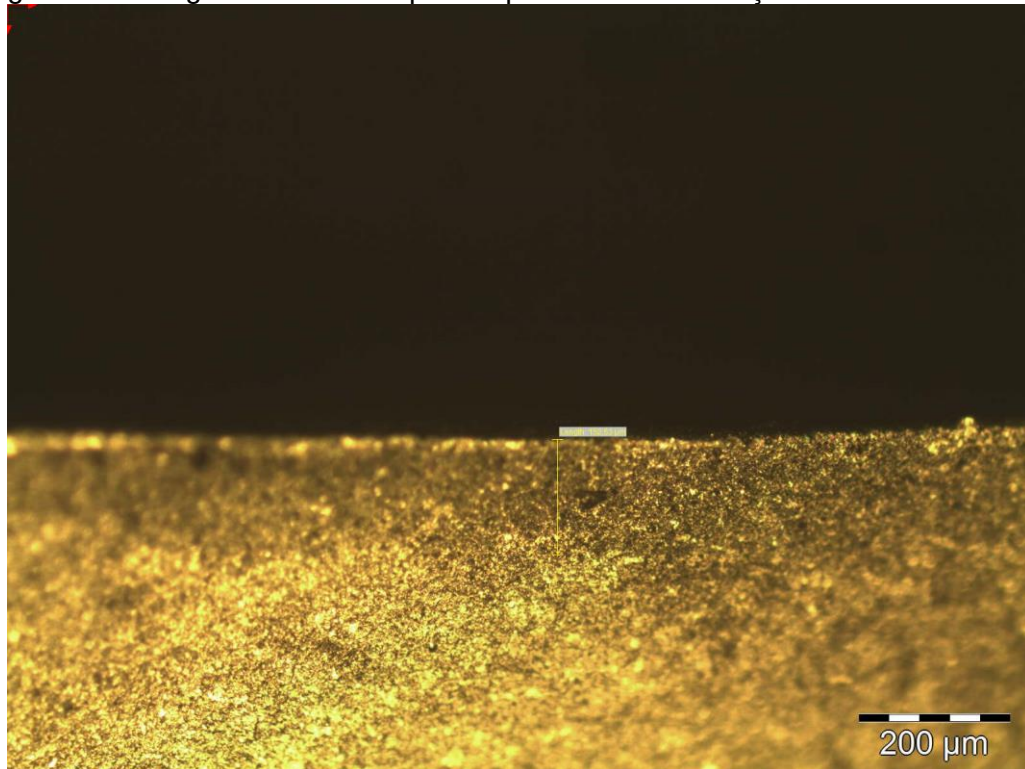
Fonte: Autor.

Com base na análise das Figuras 23 e 24 é possível verificar o desgaste de flanco e o lascamento que a amostra sofreu durante o fresamento com uma velocidade de corte maior que o da amostra 1 que provocou avarias ainda maiores na amostra 2, uma vez que, elevando-se a velocidade de corte, o desgaste da ferramenta aumenta por conta do maior atrito entre a amostra e a ferramenta que acaba aumentando o gradiente térmico existente no procedimento de corte causando o surgimento de deformações durante a aplicação do processo de usinagem.

5.3.3. Ensaio amostra 1 recozida – velocidade de corte 200 mm/min e avanço 0,1 mm/rot

Na Figura 25 está representado o desgaste de flanco que a ferramenta sofreu depois de 15 passes com uma resolução aumentada em 10x, sofridos durante o processo de fresamento.

Figura 25 - Desgaste de flanco após 15 passes com resolução aumentada em 10x



Fonte: autor.

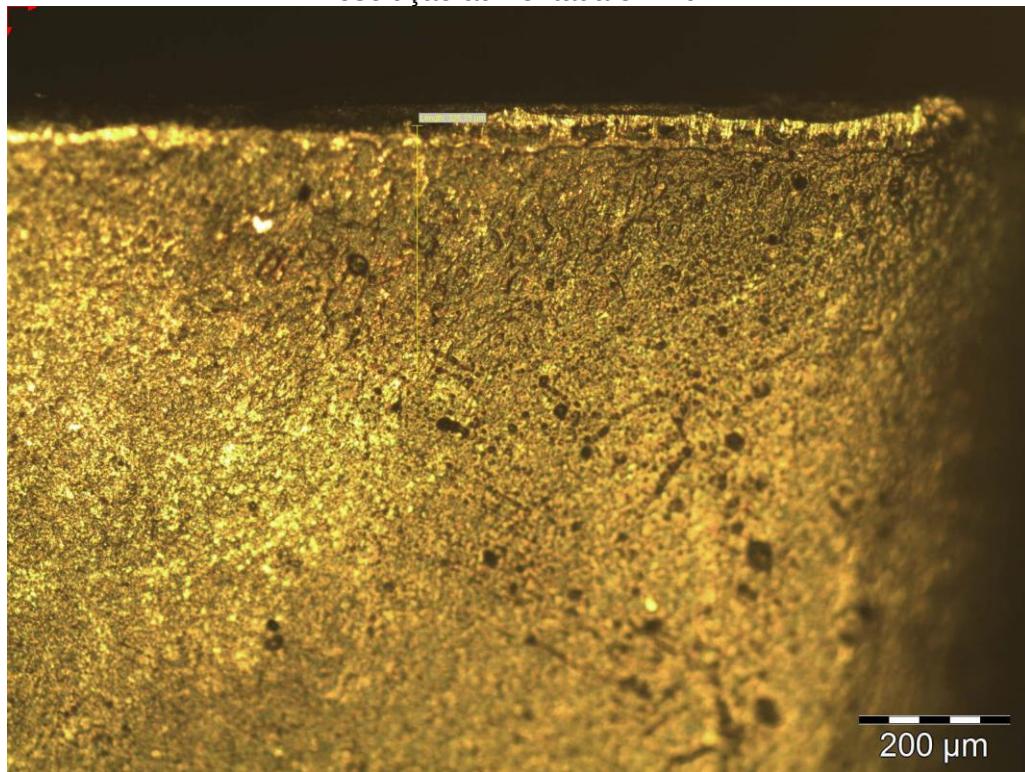
Kr Rajbongshi et al. (2018) avaliaram que a resposta do desgaste de flanco e a rugosidade superficial são estudadas pela comparação do desempenho de ferramentas revestidas com ferramentas não revestidas. Concluindo-se que em todos os casos, os desgastes de flanco das ferramentas revestidas são menores comparadas com as ferramentas sem revestimentos. Portanto, apresentando um desgaste de flanco inicial baixo.

Mohammad Ebrahimi et al. (2021) avaliaram o desgaste de flanco que uma ferramenta de metal duro revestida sofreu mediante ao emprego dos seguintes parâmetros de usinagem $V_c = 62 \text{ m/min}$ e $f = 0,175 \text{ mm/rev}$, obtendo-se um desgaste de flanco com uma profundidade de $114 \text{ }\mu\text{m}$. Foi concluído que a temperatura durante o processo de usinagem e o resfriamento da ferramenta tem influência direta no desgaste da ferramenta, reduzindo ou aumentando o seu desgaste.

Com base na análise da Figura 25 realizada após 15 passes, obteve-se um desgaste de flanco de $152,53 \text{ }\mu\text{m}$, resultando em um desgaste de flanco maior que o da amostra sem tratamento térmico, por conta da adesão que ocorreu durante o fresamento que contribuiu para o surgimento de avarias ao longo da ferramenta.

Na Figura 26 está representado o desgaste de flanco que a ferramenta sofreu no final do ensaio, depois de 30 passes com uma magnificação de 10x, ocorrido durante o processo de fresamento.

Figura 26 - Desgaste de flanco da ferramenta no final do ensaio após 30 passes com resolução aumentada em 10x



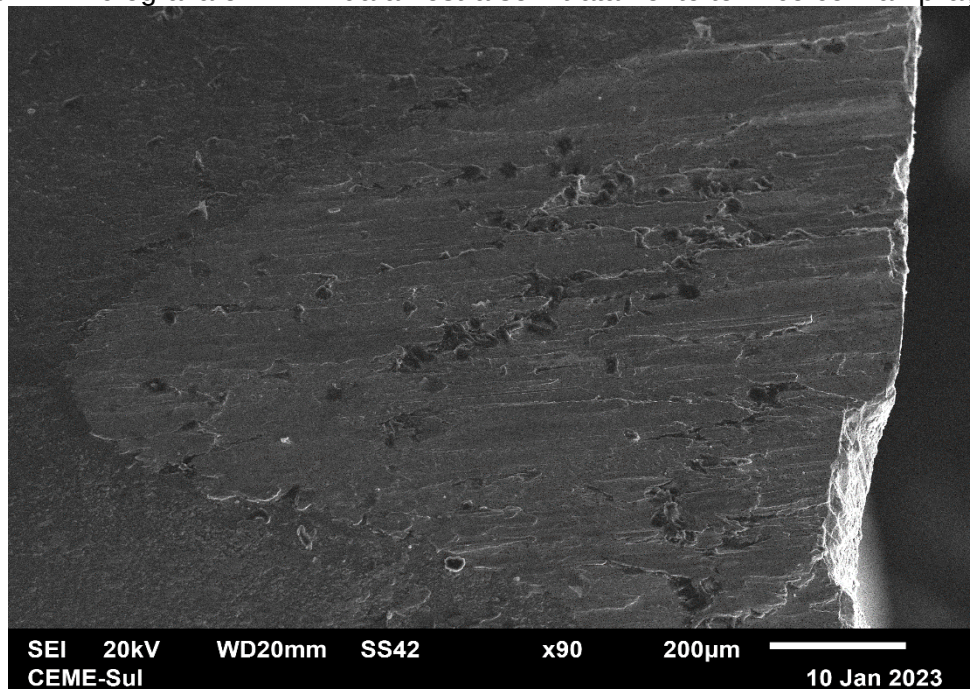
Fonte: autor.

Sun et al. (2013) realizaram um estudo da relação entre a velocidade de corte e o desgaste de flanco de uma ferramenta de metal duro, o qual mostrou que para dadas condições de corte, geometrias da ferramenta, e o material da ferramenta, o efeito do desgaste de flanco pode ser facilmente previsto. Obteve-se como resultado durante o ensaio de fresamento, um desgaste de flanco com uma profundidade de $302,15 \mu m$ que foi caracterizado como sendo muito severo e por conta disso, o ensaio foi finalizado.

Com base na análise da figura Figura 26 é possível detectar a presença de desgaste de flanco severo com uma profundidade de $326,25 \mu m$ que ocorreu por conta da adesão que surgiu no contato entre a ferramenta e a amostra originando também desgastes abrasivos oriundos do atrito gerado durante o fresamento.

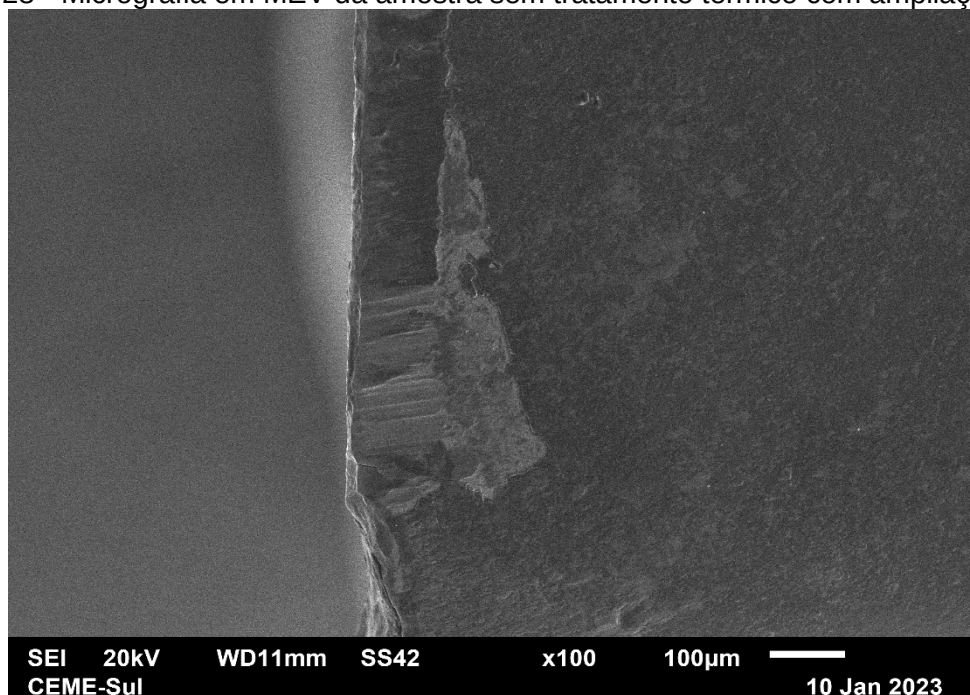
Nas Figuras 27 e 28 estão representados os desgastes que a ferramenta teve no final do ensaio por meio da microscopia eletrônica de varredura.

Figura 27 - Micrografia em MEV da amostra sem tratamento térmico com ampliação x90



Fonte: autor.

Figura 28 - Micrografia em MEV da amostra sem tratamento térmico com ampliação x100



Fonte: autor.

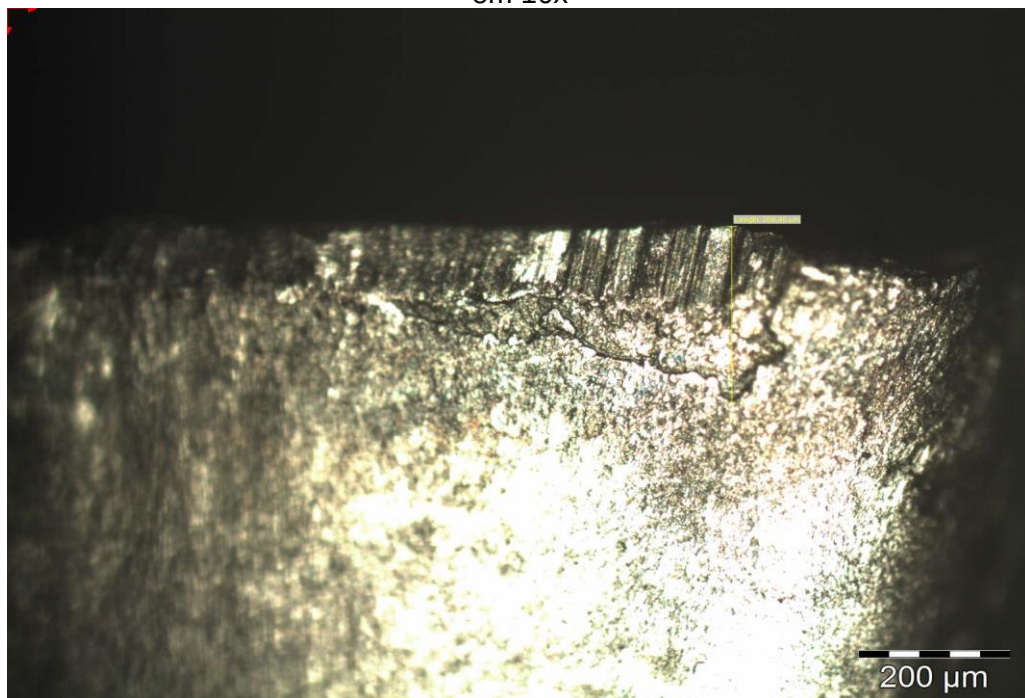
Com base na análise das Figuras 27 e 28 nota-se a presença do desgaste de flanco, lascamento e o desgaste abrasivo que a amostra sofreu durante o ensaio

oriundas do processo de fresamento que atrelado a aplicação do tratamento térmico de recozimento na amostra acabou-se gerando desgastes maiores que os das amostras sem tratamento térmico, pois ocorreu o fenômeno de adesão entre a ferramenta e amostra provocando o surgimento da formação de um extrato metálico entre as duas superfícies em contato ocorrendo a migração de partículas de uma superfície para a outra aumentando o desgaste da ferramenta.

5.3.4. Ensaio amostra 2 recozida – velocidade de corte 300 mm/min e avanço 0,1 mm/rot

Na Figura 29 está representado o desgaste ocorrido na ferramenta depois de 10 passes realizados durante o processo de fresamento.

Figura 29 - Desgaste de flanco para a amostra 2 após 10 passes com resolução aumentada em 10x



Fonte: Autor.

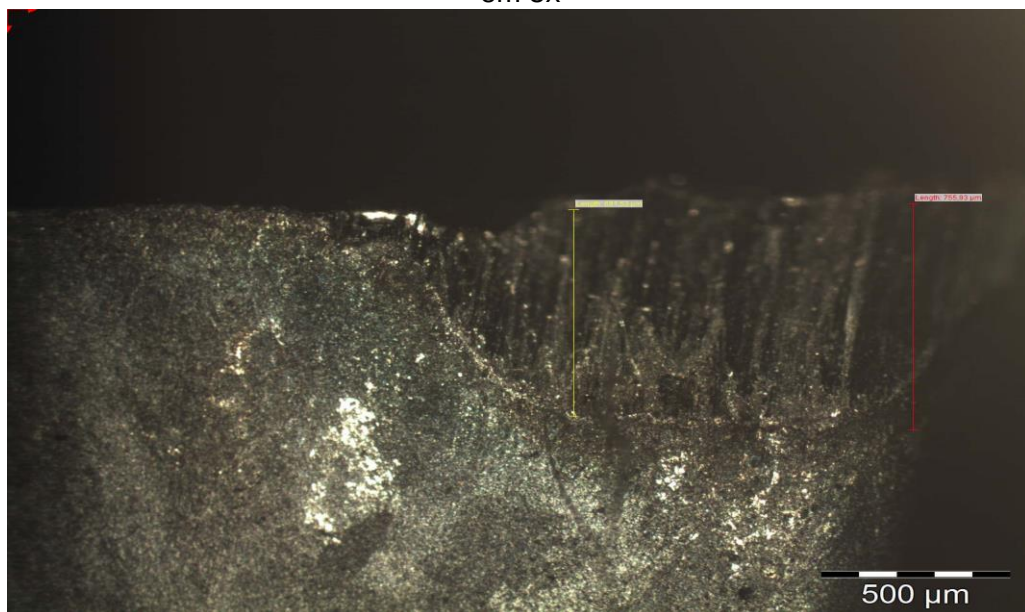
Kejia et al. (2022) afirmaram que ainda existe uma falta de entendimento compreensivo dos efeitos térmicos mecânicos, especialmente com relação para a presença de desgaste de flanco. Para solucionar isso, um modelo térmico mecânico analítico foi desenvolvido durante o seu trabalho de pesquisa para prever a

distribuição de temperatura em uma ferramenta de metal duro desgastada com base em uma abordagem de campo de linha deslizante modificada.

Com base na análise da figura Figura 29 é possível detectar com maior exatidão a presença de desgaste de flanco com uma profundidade de $258,46 \mu\text{m}$ tornando visível a progressão do desgaste associado ao incremento da velocidade de corte que acarreta na elevação da deformação da ferramenta por conta da resistência ao escoamento do material da ferramenta ter sido excedida em regiões específicas durante o fresamento.

Na Figura 30 está representado o desgaste de flanco final que a ferramenta sofreu depois de 15 passes realizados durante o processo de fresamento.

Figura 30 - Desgaste de flanco para a amostra 2 após 15 passes com resolução aumentada em 5x



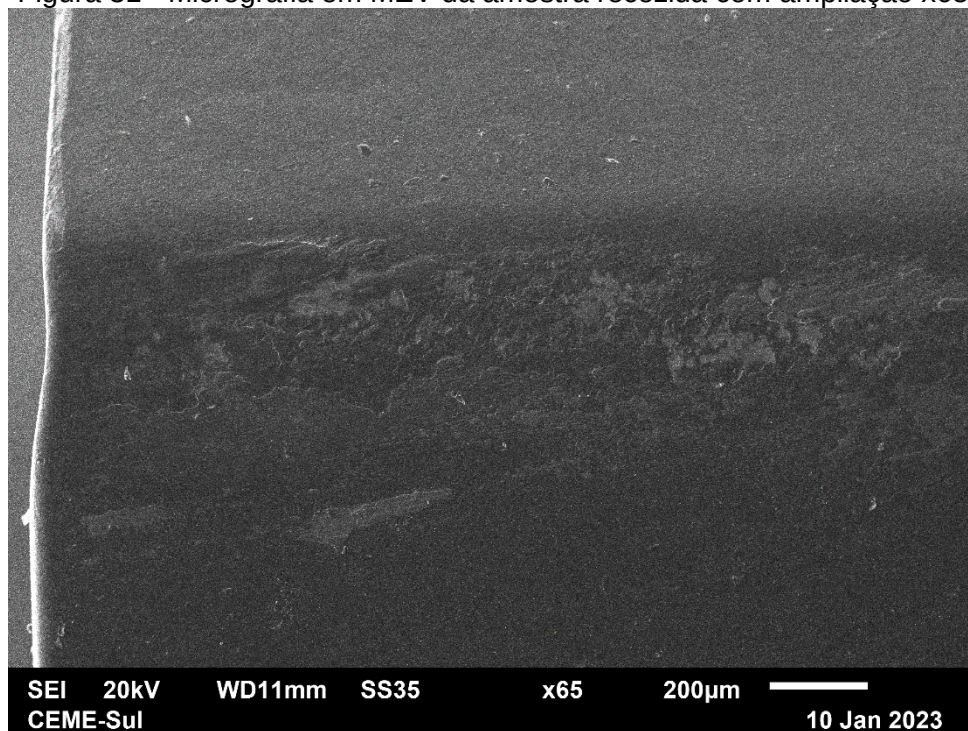
Fonte: Autor.

Muhamad et al. (2022) afirmaram que o progresso de desgaste de flanco pode ser dividido em três segmentos: o estágio inicial, o estágio estável e estágio final e que a progressão do desgaste aumenta abruptamente no estágio inicial e se mantém estável após um desgaste de 0,125 mm.

Com base na análise da Figura 30, pode-se analisar um desgaste de flanco com uma largura de 755,93 μm e outro com uma largura de 691,53 μm e esses resultados foram consequência da forte adesão que ocorreu durante o processo facilitando o desgaste da ferramenta.

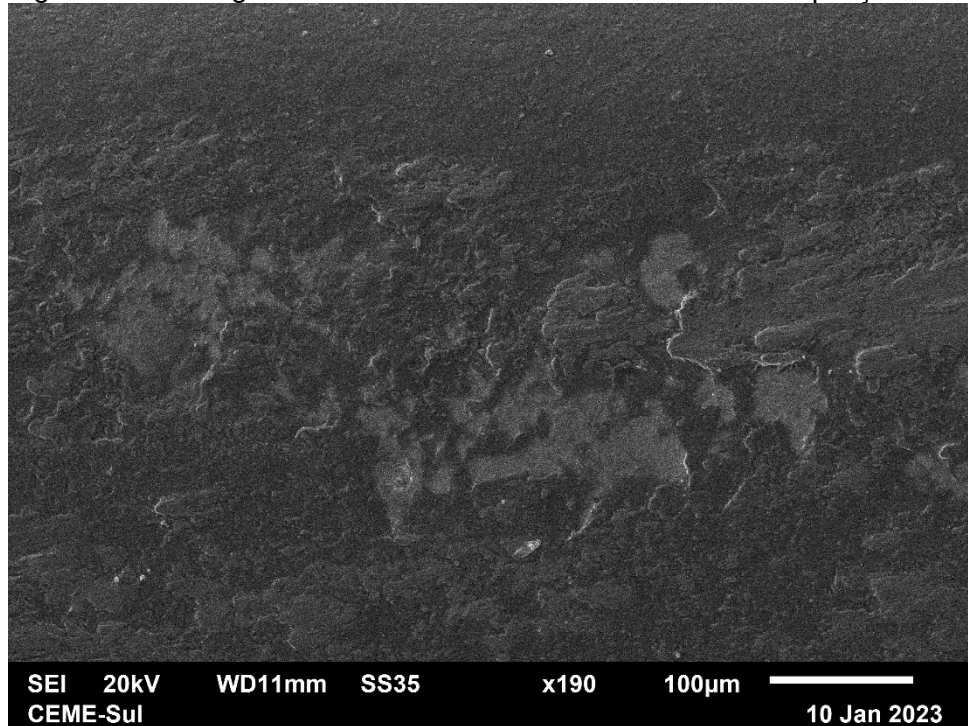
Nas Figuras 31 e 32 estão representados os desgastes que a ferramenta sofreu no final do ensaio por meio da microscopia eletrônica de varredura.

Figura 31 - Micrografia em MEV da amostra recozida com ampliação x65



Fonte: Autor.

Figura 32 - Micrografia em MEV da amostra recozida com ampliação x190



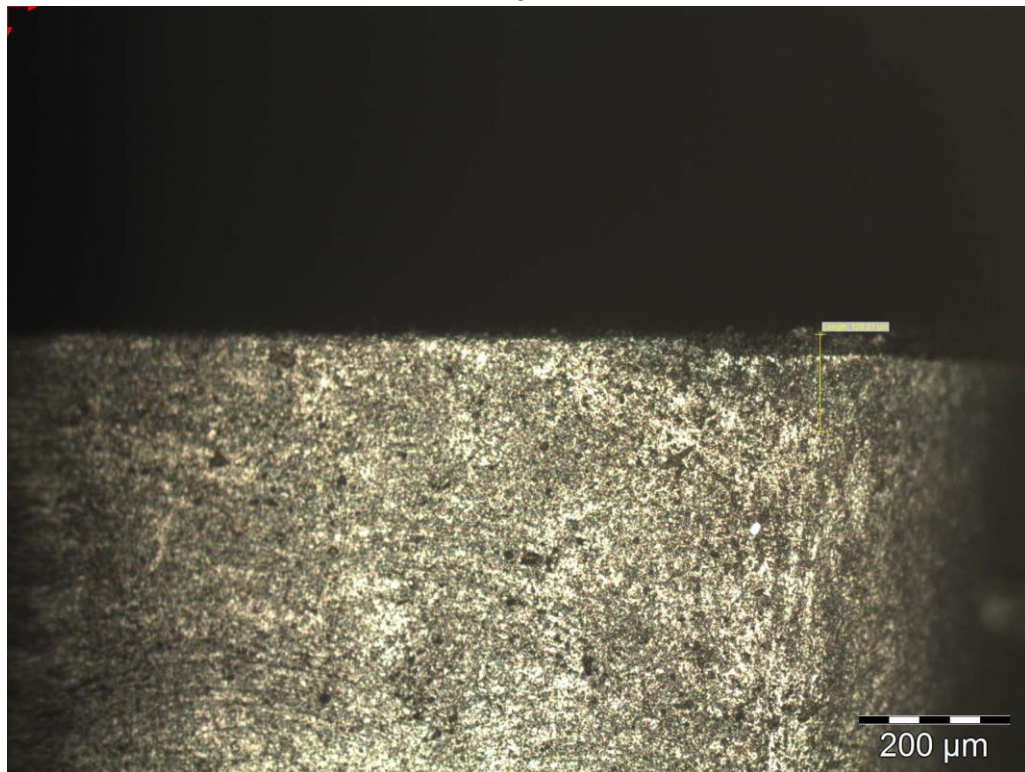
Fonte: Autor.

Nas Figuras 31 e 32 estão representados os desgastes abrasivos severos presentes na amostra no final do ensaio decorrentes do elevado gradiente de temperatura e do fenômeno de adesão existente entre a amostra e a ferramenta presente durante o processo que provoca a perda de material através da passagem de partículas rígidas presentes na amostra e na ferramenta que são forçadas umas contra as outras movendo-se ao longo de toda a superfície que está sendo usinada elevando o desgaste da ferramenta.

5.3.5. Ensaio amostra 1 temperada com duplo revenimento – velocidade de corte 200 mm/min e avanço 0,1 mm/rot

Na Figuras 33 está representado o desgaste de flanco que a ferramenta sofreu depois de 15 passes realizados durante o processo de fresamento.

Figura 33 - Desgaste de flanco da amostra 1 após 15 passes com resolução aumentada em 10x



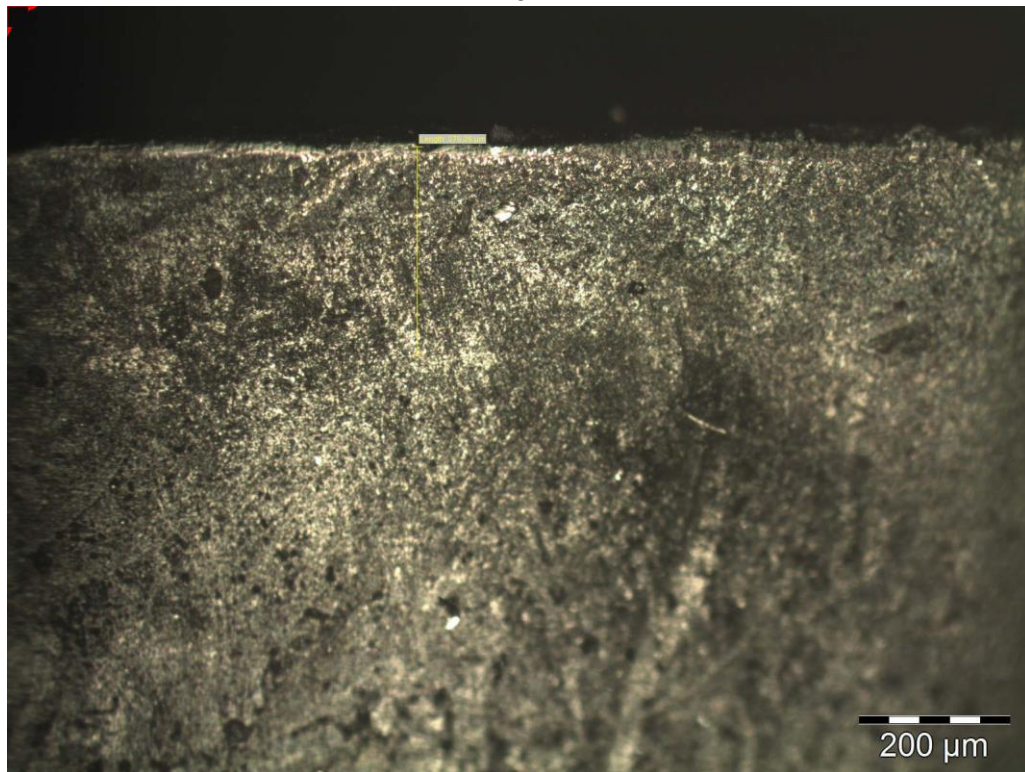
Fonte: Autor.

Sun et al. (2013), com uma ferramenta de metal duro, realizaram um processo de fresamento com as seguintes condições, velocidade de corte de 120 m/min, profundidade de corte de 20 mm e tiveram como resultado uma profundidade de desgaste de flanco de 0,075 mm, reduzindo a vida útil da ferramenta.

Com base na análise da Figura 33, a amostra sofreu um desgaste de flanco com uma profundidade de 186,44 μm apresentando um desgaste inicial em decorrência do tratamento térmico que aumentou a dureza da amostra e da velocidade de corte aplicada que conseqüentemente elevou o desgaste da ferramenta superando a resistência ao escoamento da ferramenta provocando a sua deformação.

Na Figura 34 está representado o desgaste de flanco que a ferramenta sofreu depois de 30 passes realizados durante o processo de fresamento, tornando o momento final para encerramento do ensaio na respectiva amostra.

Figura 34 - Desgaste de flanco da amostra 1 após 30 passes com resolução aumentada em 10x



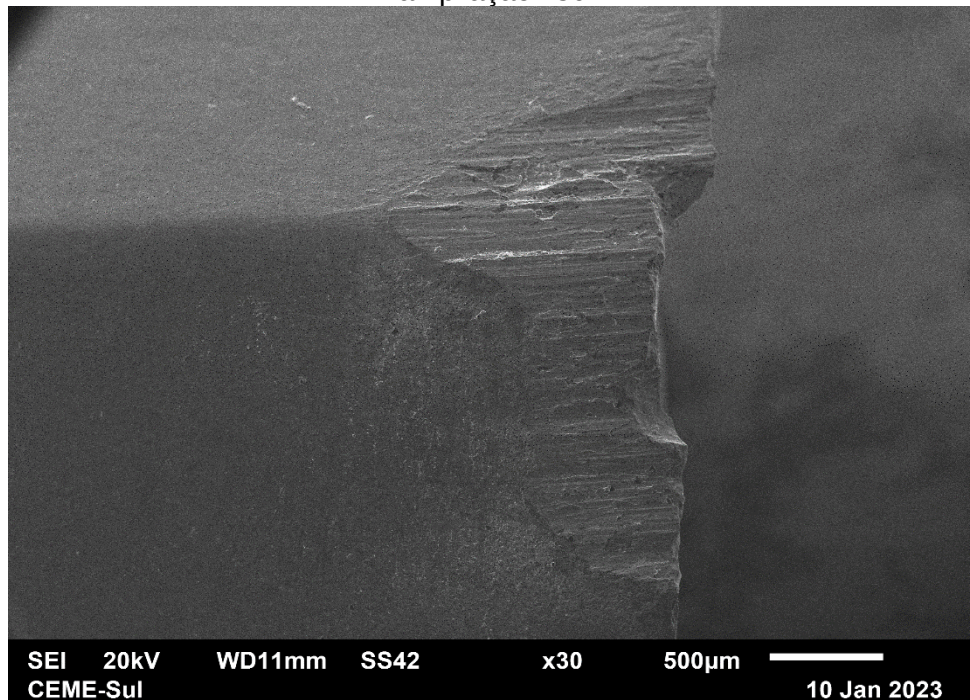
Fonte: Autor.

Liu et al. (2016) após realizarem uma análise de desgaste de flanco em ferramentas de metal duro com revestimento, concluíram que essas ferramentas possuem melhor resistência ao desgaste, com um desgaste de flanco dentro da faixa de $30\text{-}75\ \mu\text{m}$, não tendo influência na resistência ao desgaste.

Com base na análise da Figura 34, a amostra sofreu um desgaste de flanco com uma profundidade de $276,26\ \mu\text{m}$ representando uma progressão do desgaste da ferramenta por conta da deformação plástica superficial por cisalhamento que ocorre em altas temperaturas que eleva o desgaste da ferramenta.

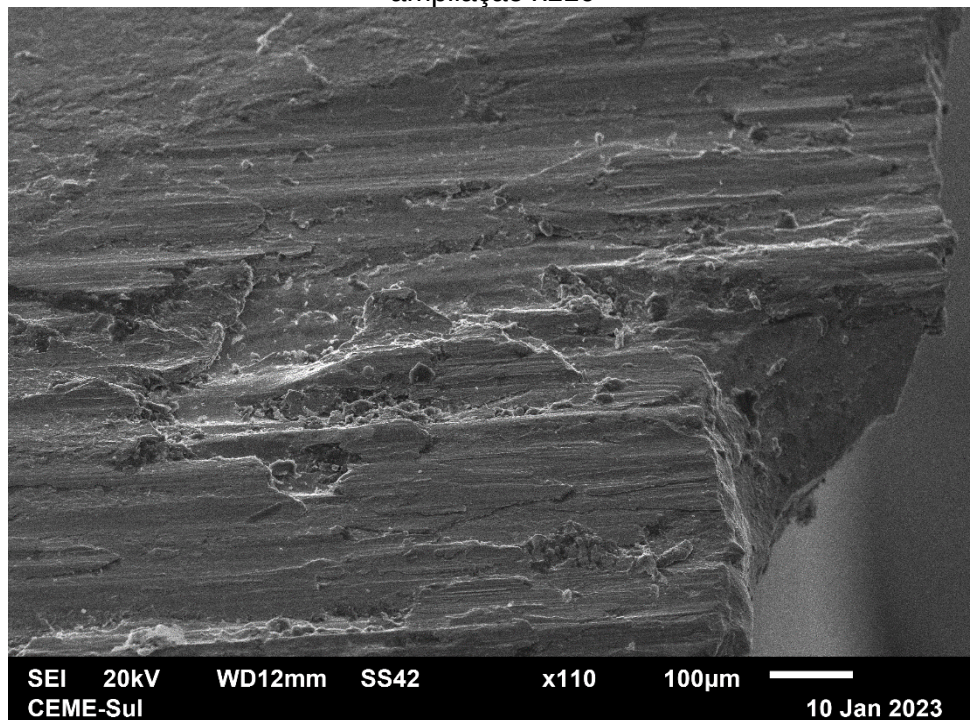
Nas Figuras 35 e 36 estão representados os desgastes que a ferramenta sofreu no final do ensaio por meio da microscopia eletrônica de varredura.

Figura 35 - Micrografia em MEV da amostra temperada com duplo revenimento com ampliação x30



Fonte: Autor.

Figura 36 - Micrografia em MEV da amostra temperada com duplo revenimento com ampliação x110



Fonte: Autor.

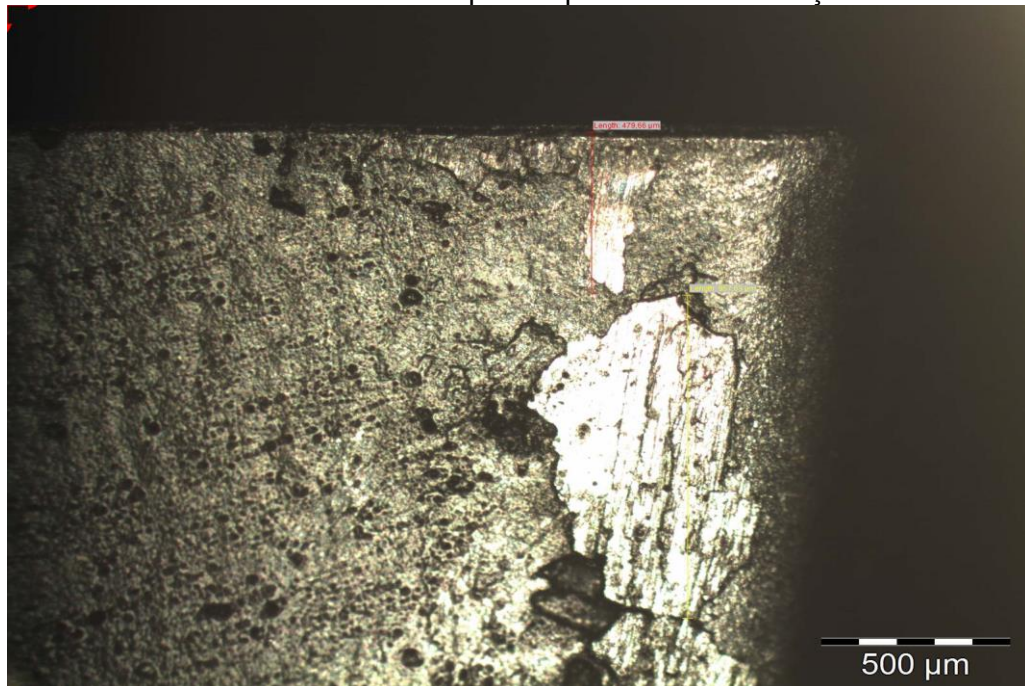
Com base na análise das Figuras 35 e 36 percebe-se a presença de avarias como desgaste de flanco, lascamento e desgaste abrasivo que a ferramenta sofreu

durante o fresamento, uma vez que, devido ao tratamento térmico de têmpera que aumentou a resistência ao desgaste e a resistência mecânica da amostra que foi submetida ao processo de fresamento, o desgaste da ferramenta aumentou devido a essas condições impostas resultando em avarias mais severas que as amostras recozidas, pois houve a presença de um atrito maior e consequentemente o efeito térmico entre a ferramenta e a amostra foi mais severo elevando o desgaste da ferramenta.

5.3.6. Ensaio amostra 2 temperada com duplo revenimento – velocidade de corte 300 mm/min e avanço 0,1 mm/rev

Na Figura 37 está representado o desgaste de flanco, lascamento que a ferramenta sofreu depois de 15 passes realizados durante o processo de fresamento.

Figura 37 - Lascamentos da amostra 2 após 15 passes com resolução aumentada em 5x



Fonte: Autor.

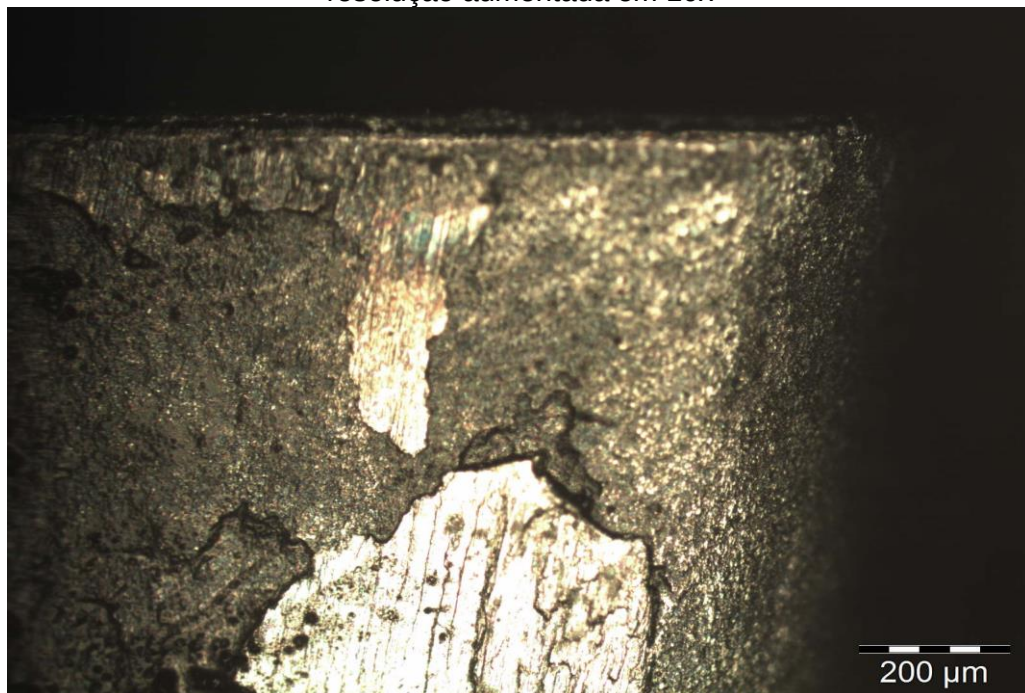
Olsson et al. (2020) com o objetivo de avaliar a vida útil da ferramenta, avaliaram o desgaste de flanco presente em ferramentas de metal duro durante o ensaio de fresamento com os seguintes parâmetros de usinagem, $V_c = 300 \text{ m/min}$ e

$f = 0,05 \text{ mm/rev}$ e sem o uso de fluido de corte. Foi obtido como resultado um desgaste de flanco com uma profundidade de $500 \mu\text{m}$. Logo, a ferramenta sofreu um desgaste elevado a ponto de tornar a ferramenta inutilizável.

A Figura 37 apresenta um desgaste de flanco com uma largura de $479,66 \mu\text{m}$ que caracteriza um desgaste de flanco elevado devido a alta velocidade de corte combinada com o tratamento térmico de têmpera que aumentou a dureza da amostra proporcionando um desgaste ainda maior na ferramenta durante o processo de usinagem.

Na Figura 38 está representado o desgaste de flanco, lascamento que a ferramenta sofreu depois de 15 passes realizados durante o processo de fresamento.

Figura 38 - Desgaste de flanco com perda de cobertura da amostra 2 após 15 passes com resolução aumentada em 10x



Fonte: Autor.

Chinchanikar et al. (2014) afirmaram que o crescimento pela necessidade dos processos de manufaturas amigavelmente econômico e ambiental tem aumentado o uso de ferramentas de metal duro no fresamento a seco e em alta velocidade de aços endurecidos. Entretanto, uma característica indesejável do processo de fresamento é

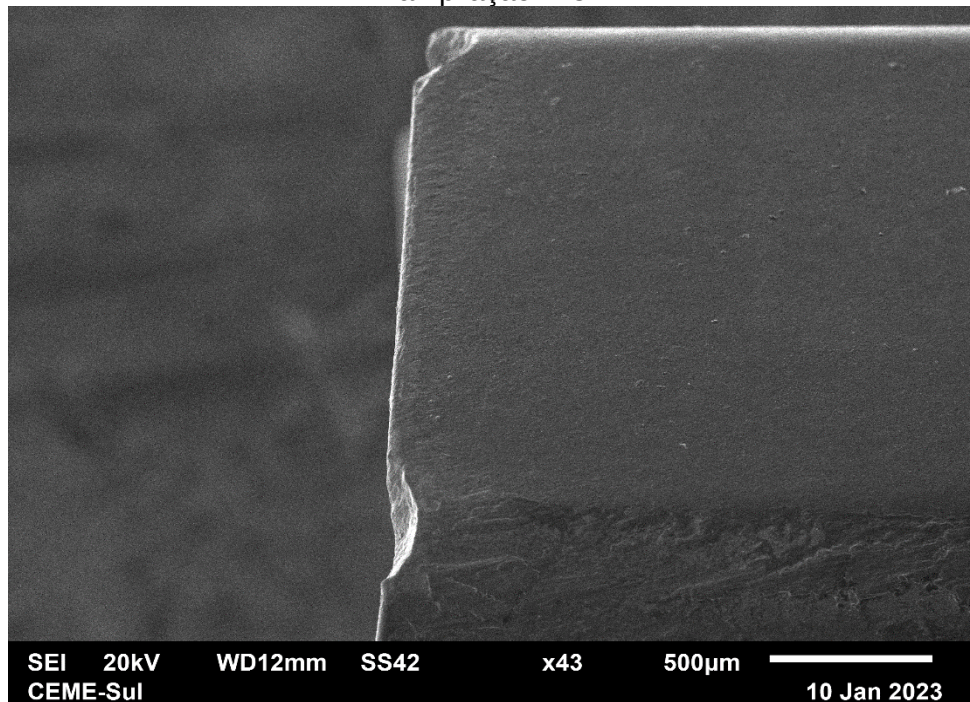
o desgaste da ferramenta, especialmente o desgaste de flanco, o qual adversamente afeta a precisão dimensional e a qualidade do produto. Logo, conclui-se que a prevenção da progressão do desgaste de flanco será extremamente valiosa.

Meher et al. (2020) avaliaram o comportamento do desgaste abrasivo em ferramentas de metal duro durante o processo de fresamento e concluíram que durante a usinagem a seco com uma velocidade de corte alta, a ferramenta apresentara desgastes abrasivos e desgaste de flancos em diferentes regiões, em virtude das condições de usinagem que a ferramenta foi submetida.

A Figura 38 apresenta o desgaste de flanco com perda de cobertura que a ferramenta sofreu no final do ensaio que foi encerrado após 15 passes, pois a ferramenta sofreu um lascamento muito grande na sua ponta devido as condições de usinagem impostas que combinadas com os efeitos da alta dureza presente na amostra oriundas do tratamento de têmpera resultaram em um desgaste ainda maior da ferramenta sendo necessário poucos passes para provocar um lascamento severo na ponta da ferramenta.

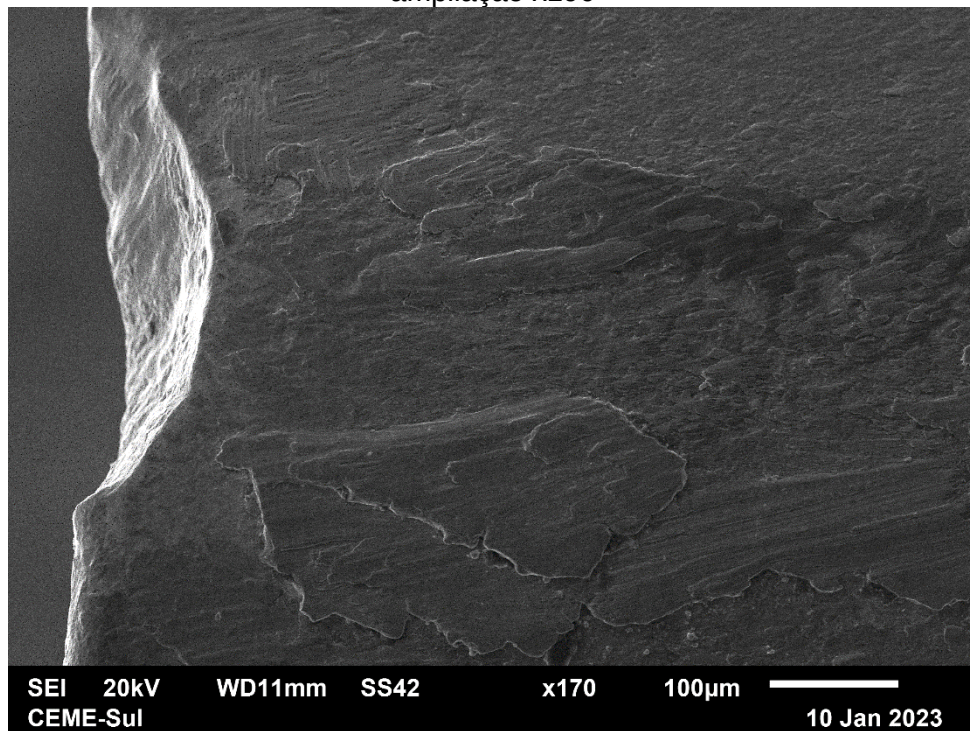
Nas Figuras 39 e 40 estão representados os desgastes que a ferramenta sofreu no final do ensaio por meio da microscopia eletrônica de varredura.

Figura 39 - Micrografia em MEV da amostra temperada com duplo revenimento com ampliação x43



Fonte:autor

Figura 40 - Micrografia em MEV da amostra temperada com duplo revenimento com ampliação x190



Fonte:autor

Com base na análise das Figuras 40 e 41 é possível verificar a presença do desgaste de flanco e do lascamento que a ferramenta sofreu durante o processo de fresamento que são consequências do efeito da têmpera que provocou a formação da martensita gerando uma dureza elevada na amostra aumentando o desgaste da ferramenta combinado com a aplicação de uma velocidade de corte maior que acabou gerando maior atrito provocando o fenômeno de difusão entre a ferramenta e a amostra provocando a transferência de átomos de um metal para o outro resultando nas avarias citadas.

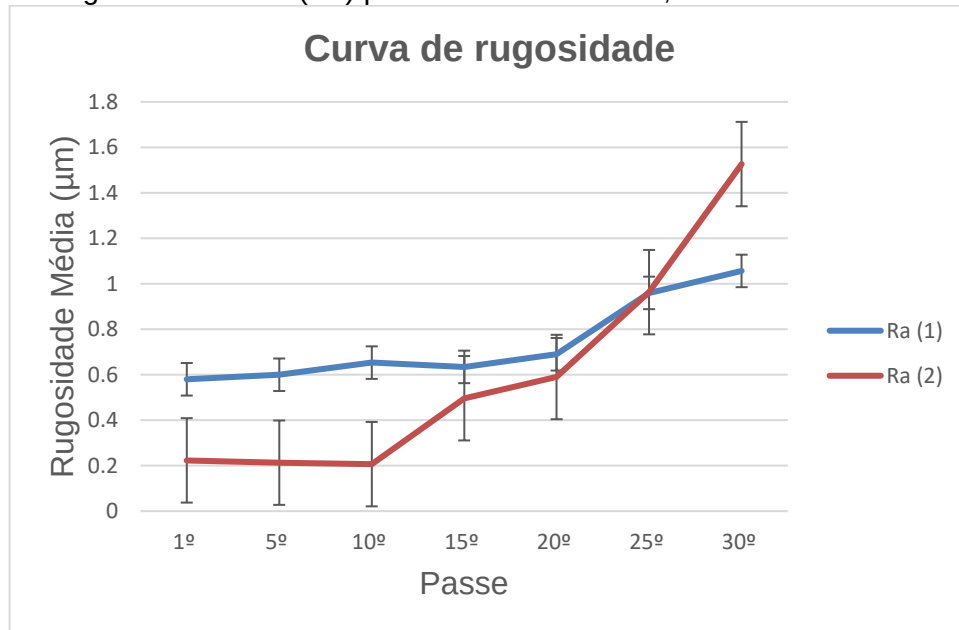
5.4. Análise de rugosidade

No presente trabalho foi analisado o comportamento da rugosidade média (R_a), desvio médio quadrático (R_q).

5.4.1 Amostras 1 e 2, sem tratamento térmico – velocidades de cortes 200 mm/min e 300 mm/min, avanço 0,1 mm/rot e profundidade 0,1 mm.

Na Figura 41 está ilustrado a rugosidade média (R_a) para as amostras 1 ($V_c=200$ mm/min) e 2 ($V_c=300$ mm/min) medido a cada 5 passes, durante o processo de fresamento do aço H13 sem tratamento térmico.

Figura 41 - Rugosidade Média (Ra) para as amostras 1 e 2, ambas sem tratamento térmico

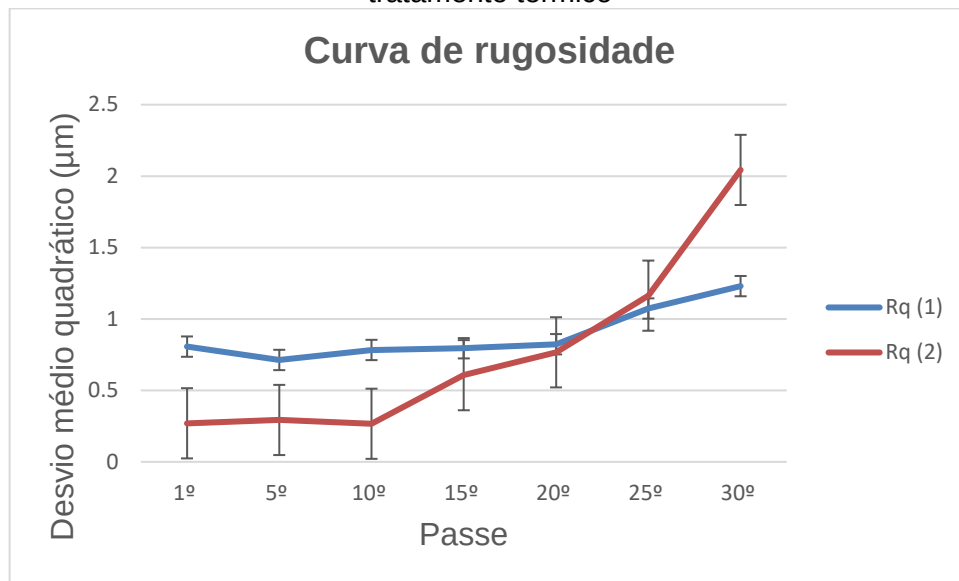


Fonte: autor

A rugosidade média das amostras fresadas com $V_c=300$ mm/min apresentaram valor 3 vezes menor até o 10º passe, o que pode ser explicado pelo fato de que trabalhando com baixos avanços, quanto maior for a velocidade de corte menor será a rugosidade, conforme citado por (FERRARESI et al., 2012). Após o 10º passe, os insertos que trabalhavam com a maior velocidade começaram a sofrer desgaste mais acentuado (devido ao fato que a velocidade de corte é também um dos parâmetros mais influentes no desgaste da ferramenta, elevando o gradiente térmico e reduzindo sua vida), o que pode ser visto com a aproximação dos valores de Ra (1) e Ra (2), que se igualam em 25 passes e que apresentam Ra (2) maior que Ra (1) no final do ensaio.

Na Figura 42 está ilustrado a rugosidade média quadrática (Rq) para as amostras 1 ($V_c=200$ mm/min) e 2 ($V_c=300$ mm/min) medido a cada 5 passes, durante o processo de fresamento do aço H13 sem tratamento térmico.

Figura 42 - Rugosidade Média Quadrática (Rq) para as amostras 1 e 2, ambas sem tratamento térmico



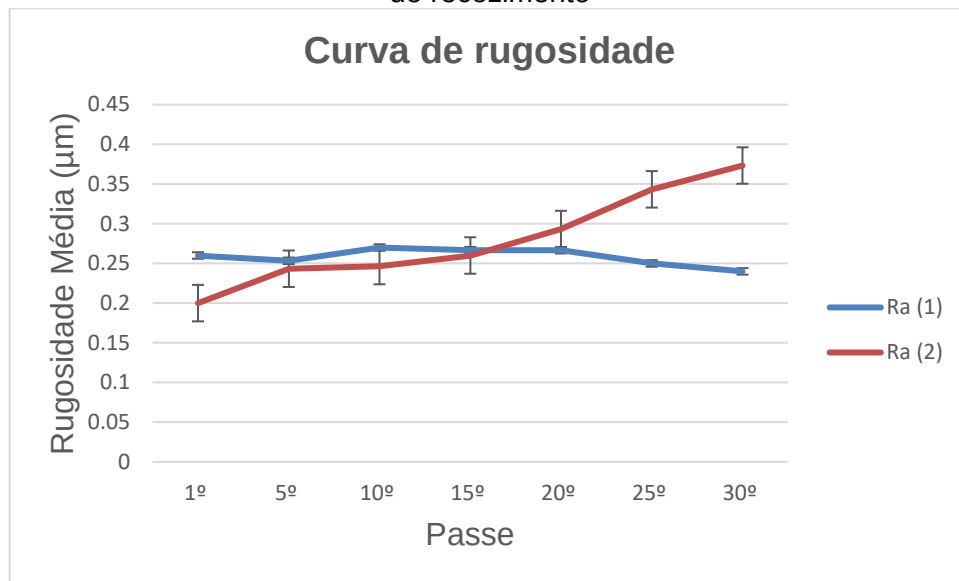
Fonte: autor

Esse gráfico é importante porque, em superfícies onde o acabamento apresenta riscos de usinagens bem orientados (torneamento e fresamento são exemplos), o parâmetro de Ra pode apresentar pouca resolução enquanto, como o Rq eleva o valor de detecção dos picos ao quadrado, acentuando-o. Podemos observar na Figura 42 que usando uma maior velocidade de corte, os valores de Rq (2) são quase 3 vezes menores, ratificando que a utilização da velocidade de corte mais elevada com baixo avanço garantem esses resultados. A diferença em relação ao gráfico de Ra é que no 20º passe os dois valores de rugosidade se tornam iguais, devido ao fato de que usar uma velocidade de corte maior acelera o desgaste da ferramenta.

5.4.2 Amostras 1 e 2, com recozimento – velocidade de corte 200 mm/min e velocidade de corte 300 mm/min, avanço 0,1 mm/rot e profundidade 0,1 mm.

Na Figura 43 está ilustrado a rugosidade média (Ra) para as amostras 1 ($V_c=200$ mm/min) e 2 ($V_c=300$ mm/min) medido a cada 5 passes, durante o processo de fresamento do aço H13 com tratamento térmico de recozimento.

Figura 43 - Rugosidade Média (Ra) para as amostras 1 e 2, ambas com tratamento térmico de recozimento



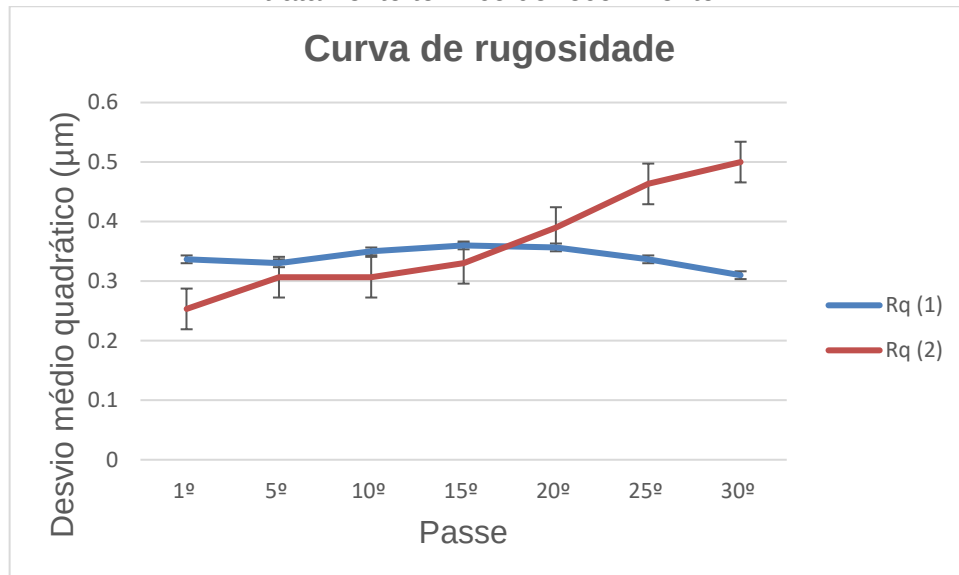
Fonte:autor

Considerando os parâmetros de usinagem, as amostras 1 e 2 possuem valores de velocidades de cortes diferentes e os mesmos valores para as profundidades de cortes e avanço. Por isso, espera-se que uma diminuição da rugosidade ocorra na amostra com maior velocidade de corte e isso ocorre até o 15º passe e a partir desse momento, a rugosidade começa subir devido o material começar a se desgastar, e por conta disso uma maior quantidade de calor e vibração do sistema começam a ser gerados, resultando na piora do acabamento superficial da peça.

Por meio dos dados é possível observar que todos os materiais recozidos possuem uma rugosidade inferior aos que não sofreram tratamento térmico, visto que os materiais recozidos possuem níveis de dureza inferiores aos materiais sem tratamento térmico (demonstrado na Seção 5.2). Os baixos níveis de rugosidade podem ser resultado da microestrutura de carbonetos globulares distribuído em uma matriz ferrítica, que gera uma maior ductibilidade e usinabilidade.

Na Figura 44 está ilustrado a rugosidade média quadrática (R_q) para as amostras 1 ($V_c=200$ mm/min) e 2 ($V_c=300$ mm/min) medido a cada 5 passes, durante o processo de fresamento do aço H13 com tratamento térmico de recozimento.

Figura 44 - Rugosidade Média Quadrática (R_q) para as amostras 1 e 2, ambas com tratamento térmico de recozimento



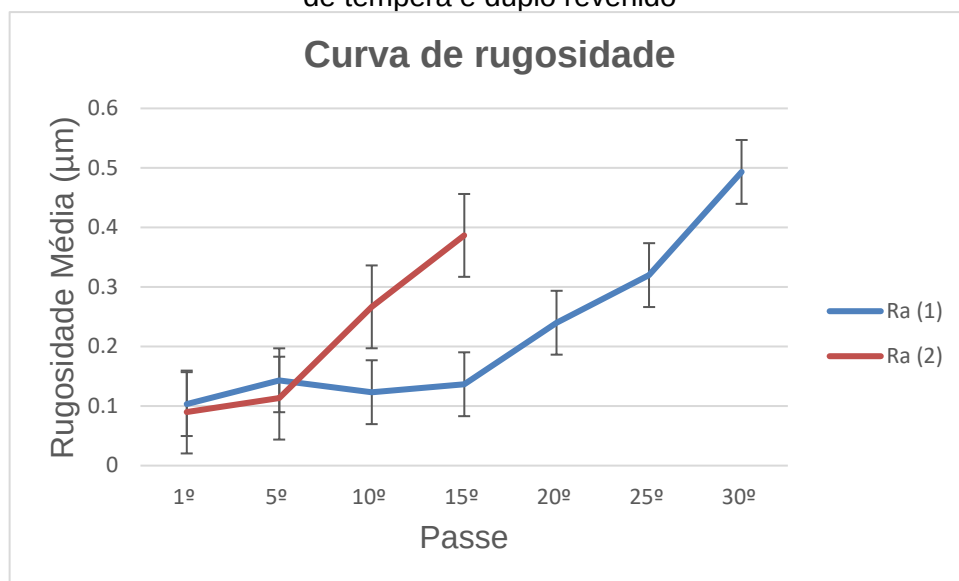
Fonte:autor

Com o intuito de reduzir o erro associado na medição da rugosidade média R_a , foi utilizado o parâmetro R_q , o qual possui uma resolução maior, detectando com mais eficácia os níveis de rugosidades, conforme afirma (ALVES, 2011). A Figura 44 mostra uma elevação dos valores de rugosidades obtidos nas curvas de R_q quando comparados com os valores de R_a , essa variação era prevista de acordo com a definição do parâmetro de rugosidade R_q (demonstrado na Seção 3.6). Após o 10º passe a amostra começa a se desgastar provocando o aumento da rugosidade causando a aproximação das curvas R_q (1) e R_q (2) e a partir desse instante os efeitos térmicos começam a agir provocando dilatações térmicas devido ao crescimento gradual do gradiente térmico existente durante o fresamento, condição que favorece na vibração do sistema e no surgimento de uma grande quantidade de calor resultando na deterioração da ferramenta.

5.4.3 Amostras 1 e 2, com têmpera e duplo revenido – velocidade de corte 200 mm/min e velocidade de corte 300 mm/min, avanço 0,1 mm/rot e profundidade 0,1 mm.

Na Figura 45 está ilustrado a rugosidade média (Ra) para as amostras 1 (Vc=200 mm/min) e 2 (Vc=300 mm/min) medido a cada 5 passes, durante o processo de fresamento do aço H13 com tratamento térmico de têmpera e duplo revenido.

Figura 45 - Rugosidade Média (Ra) para as amostras 1 e 2, ambas com tratamento térmico de têmpera e duplo revenido



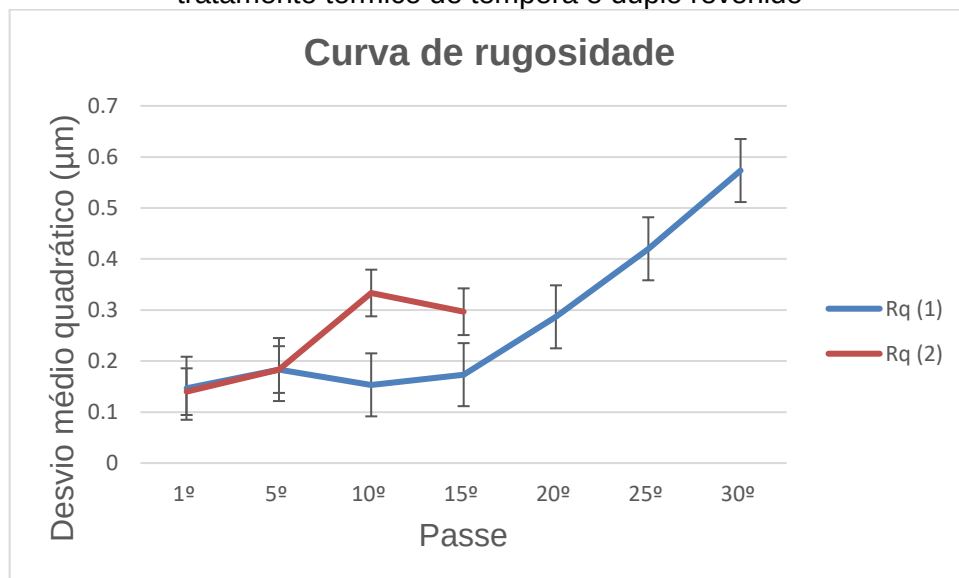
Fonte:autor

Levando-se em consideração os parâmetros de usinagem utilizados nas amostras 1 e 2 que possuem velocidades de cortes diferentes, esperava-se que a rugosidade para amostra com maior velocidade de corte tenha o menor valor e isso ocorre até o 5º passe e a partir desse instante a ferramenta começa a se desgastar devido o material a ser usinado possuir elevada dureza, com microestrutura martensítica, e carbonetos globulares que favoreceram para a geração do maior aquecimento e deformação durante o fresamento da amostra diminuindo a vida da ferramenta. Entretanto, os valores de rugosidades encontrados para as amostras temperadas com duplo revenido são menores que os resultados obtidos pelas

amostras recozidas e isso ocorre porque a formação do cavaco é distinta com a alteração do estado do material (recozido, e temperado e revenido), enquanto que no estado recozido o cavaco é contínuo e associado a elevadas tensões plásticas e elásticas, no estado temperado e revenido, o cavaco tende a ser segmentado. Portanto, no estado recozido, os valores de rugosidade tendem a maiores níveis em função das recuperações elásticas na superfície usinada.

Na Figura 46 está ilustrado a rugosidade média quadrática (R_q) para as amostras 1 ($V_c=200$ mm/min) e 2 ($V_c=300$ mm/min) medido a cada 5 passes, durante o processo de fresamento do aço H13 com tratamento térmico de têmpera e duplo revenido.

Figura 46 - Rugosidade Média Quadrática (R_q) para as amostras 1 e 2, ambas com tratamento térmico de têmpera e duplo revenido



Fonte:autor

De acordo com os parâmetros de usinagem aplicados durante o fresamento, a velocidade de corte possui grande importância na rugosidade sendo que para um baixo avanço seguido por uma alta V_c é esperado uma rugosidade menor, conforme citado por (BOING; BECKERT; SCHMIDT, 2010) e para amenizar os erros que o parâmetro R_a possui, levando-se em consideração que o gráfico de R_q possui maior

exatidão na determinação dos níveis de rugosidade, foi plotado um gráfico para R_q que demonstra um nível mais elevado de rugosidade nas amostras temperadas e a partir dos dados do gráfico da Figura 46 percebe-se que a amostra trabalhando na $V_c = 300$ mm/min possui o mesmo nível de rugosidade que a amostra que trabalha na $V_c = 200$ mm/min e isso não ocorre no gráfico de R_a , pois nele o inserto que trabalha na $V_c = 300$ mm/min possui menor rugosidade até o 5º passe e isso se justifica pela forma que o parâmetro R_q é calculado levando em consideração o desvio padrão do perfil de rugosidade diminuindo o erro durante a sua medição. Após o 5º passe, a ferramenta começa a sofrer fortes impactos devido as dilatações térmicas oriundas da variação do gradiente térmico existentes entre a ferramenta e a amostra causando o seu desgaste favorecendo na geração de vibrações do sistema que danificam a ferramenta, o qual eleva o nível de rugosidade provocando o encerramento do ensaio no 15º passe.

6. CONCLUSÕES

A partir dos resultados obtidos na parte experimental, foi possível concluir que:

- Em relação ao efeito do tratamento térmico na rugosidade superficial, pode-se afirmar que as amostras que sofreram o processo de têmpera e duplo revenimento tiveram os menores valores, pelo mecanismo de formação do cavaco ser distinto, em lascas, enquanto nas amostras recozidas e como recebida possuía formato contínuo associado a tensões plásticas e elásticas, que geraram pior acabamento superficial;
- O mecanismo de desgaste predominante em todos os casos estudados foi o desgaste de flanco, acompanhado de outros tipos de avarias como lascamentos, microsoldagens e efeitos abrasivos. Não foi identificado o desgaste de cratera nas amostras ensaiadas;
- No que diz respeito ao desgaste das ferramentas de corte foi observado que as amostras que sofreram tratamento de têmpera e duplo revenido geraram maior desgaste devido a microestrutura martensítica que, por sua elevada dureza causou maior atrito e calor na interface ferramenta/amostra provocando desgaste de flanco em grande proporção e forçando os ensaios a terminarem em um tempo bem menor em relação aos outros dois estados térmicos, que apresentaram comportamento semelhante em relação a esse aspecto, provavelmente devido aos valores de dureza muito próximos;
- A velocidade de corte demonstrou ter influência direta tanto no melhor acabamento superficial quanto na aceleração do desgaste da ferramenta. Pode-se concluir com os ensaios que, o uso da maior velocidade de corte levou a menor rugosidade em todos os experimentos, bem como gerou os maiores desgastes nas ferramentas de corte. Cabe dizer que essa relação foi obtida

usando profundidade e avanço constantes e que, a variação desses parâmetros geraria resultados diferentes.

7. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

As recomendações para trabalho futuro são:

- Avaliar as forças de cortes durante o decorrer do processo de fresamento;
- Estudar a influência da temperatura na vida da ferramenta e na qualidade superficial;
- Acrescentar a análise de vibração no processo de fresagem;
- Verificar o efeito que o uso de fluido de corte causa na usinabilidade durante o processo de fresamento.

8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

8.1 Referências Nominais

A. Persson, S. Hogmark, and J. Bergstrom. **Simulation and Evaluation of Thermal Fatigue Cracking of Hot Work Tool Steels**. *Int. J. Fatigue*, 2004, 26(10), p 1095–1107.

ADESTA, E Y T et al. Toolpath strategy for cutter life improvement in plunge milling of AISI H13 tool steel. **Materials Science and Engineering** 290 (2018) 012040, [s. l.], 18 maio 2018.

ALVES, M. L. **Reconhecimento da rugosidade em imagens monocromáticas por meio de análise de textura**. 2011. 197f. Tese de doutorado (Engenharia mecânica). Niterói - RJ: Universidade Federal Fluminense, 2011.

ARRUDA, Étory Madrilles et al. Robust optimisation of surface roughness of AISI H13 hardened steel in the finishing milling using ball nose end mills. **Precision Engineering** (2019), [S. l.], p. 1-21, 23 ago. 2019.

BAHRAMI, A.; MOUSAVI ANIJ DAN, S.H.; GOLOZAR, M.A.; SHAMANIAN, M.; VARAHRAM, N. Effects of conventional heat treatment on wear resistance of AISI H13 tool steel. **Wear**, [s. l.], ano 2005, v. 258, p. 846-851, 14 out. 2004.

REGGIANI, B.; DONATI, L.; BEN TAHAR, M.; TOMESANI, L. Experimental investigation of hot-work tool steels performances under the creep-fatigue regime. **Int J Adv Manuf Technol** (2018) 94:1957–1967, [s. l.], p. 1-11, 2 set. 2017.

BAKAR, Husni Nazra; GHANI, Jaharah A.; CHE HARON, Che Hassan. Influence of rounded cutting-edge radius and machining parameters on surface roughness and tool wear in milling AISI H13 steel under dry and cryogenic machining. **Jurnal Tribologi** 24 (2020) 52-6, [s. l.], p. 1-13, 2 fev. 2020.

BOING, D.; BECKERT, S. F.; SCHMIDT, R. A. Influência do tratamento térmico no aço-ferramenta AISI H13 em operação de fresamento com ferramenta de metal duro. **Campina Grande - Paraíba: VI Congresso Nacional de Engenharia Mecânica**, 2010. p. 10.

CALLISTER JR, William D; RETHWISCH, David G. **Ciência e engenharia de materiais: Uma Introdução**. 9ª edição. ed. [S. l.: s. n.], 2016.

CUI, Xiaobin et al. Optimization of cutting conditions in hard milling with the performance of cemented carbide tool material considered. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, [S. l.], p. 1-13, 11 fev. 2018.

CUI, Xiaobin et al. Surface roughness and chip formation in high-speed face milling AISI H13 steel. **Int J Adv Manuf Technol (2012) 61:1–13**, [S. l.], p. 1-13, 22 out. 2011.

CUI, Xiaobin; ZHAO, Jun. Cutting performance of coated carbide tools in high-speed face milling of AISI H13 hardened steel. **Int J Adv Manuf Technol (2014) 71:1811–1824**, [s. l.], p. 1-14, 24 jan. 2014.

CUI, Xiaobin et al. Investigation of Cutting Temperature for AISI H13 in High Speed End Milling. **International Journal of Engineering Materials and Manufacture**, [s. l.], 28 abr. 2012

CHINCHANIKAR, Satish et al. **Int J Adv Manuf Technol (2015) 76:1185–1201. Predictive modeling for flank wear progression of coated carbide tool in turning hardened steel under practical machining conditions**, [s. l.], 16 set. 2014.

DEMIR, Halil et al. Influence of the heat treatment on the microstructure and machinability of AISI H13 hot work tool steel. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, [s. l.], 17 nov. 2017.

DENG, Ben et al. A comprehensive study on flank wear progression of polycrystalline diamond micro-tool during micro end-milling of SiCp/Al composites. **National NC**

System Engineering Research Center, School of Mechanical Science and Engineering, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan, 430074, China, [S. l.], p. 1-24, 4 maio 2020.

DINIZ, Anselmo Eduardo *et al.* **Tecnologia da usinagem dos materiais**. 8ª edição. ed. [S. l.: s. n.], 2014

EDMONDS, D.V. *et al.* Quenching and partitioning martensite—A novel steel heat treatment. **Materials Science and Engineering A 438–440 (2006) 25–34**, [s. l.], 2 fev. 2006.

FERRARESI, Dino. **Fundamentos da Usinagem dos Metais**. [S. l.: s. n.], 1969.

GHANI, J. A. *et al.* Wear mechanism of TiN coated carbide and uncoated cermets tools at high cutting speed applications. **Journal of Materials Processing Technology**, [S. l.], p. 1-7, 2 abr. 2004.

GUANGHUA, Yan *et al.* EFFECTS OF HEAT TREATMENT ON MECHANICAL PROPERTIES OF H13 STEEL. **Metal Science and Heat Treatment 393-395 (2010)**, [s. l.], 7 ago. 2010.

HENSCHER, Sebastian; KIETOV, Volodymyr; DEIRMINA, Faraz; PELLIZZARI, Massimo; KRÜGER, Lutz. Fracture toughness of a hot work tool steel-TiC composite produced by mechanical milling and spark plasma sintering. **Materials Science and Engineering: A**, [s. l.], 17 out. 2017.

HOSSAIN, Rumana *et al.* Stability of retained austenite in high carbon steel – Effect of post-tempering heat treatment. **Materials Characterization 149 (2019) 239-247**, [s. l.], 29 jan. 2019.

HU, Meng; MING, Weiwei; AN, Qinglong; CHEN, Ming. Tool wear monitoring in milling of titanium alloy Ti–6Al–4 V under MQL conditions based on a new tool wear

categorization method. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, [S. l.], p. 1-12, 9 jul. 2019.

J., Kang; C. , Wang; G.D., Wang. Microstructural characteristics and impact fracture behavior of a high-strength low-alloy steel treated by intercritical heat treatment. **Materials Science and Engineering: A**, [s. l.], 24 maio 2012.

KASHYAP, Satadru et al. Comparative study and modelling of machinability characteristics of single and double tempered AISI H13 steel during hard part finish turning using brazed tungsten carbide tip. **Elsevier Ltd. 2214-7853**, [s. l.], 13 fev. 2020.

KEJIA, Zhuang et al. International journal of advanced manufacturing technology, 2022, Vol.123 (9-10), p.3455-3471. **Thermal–mechanical model for machining with chamfered insert considering tool flank wear**, [s. l.], 11 ago. 2022.

KR RAJBONGSHI, Sanjib et al. Journal of Manufacturing Processes. **A comparative study in machining of AISI D2 steel using textured and nontextured coated carbide tool at the flank face**, [s. l.], 31 out. 2018.

KUMAR, Pardeep et al. Influence of Different Grades of CBN Inserts on Cutting Force and Surface Roughness of AISI H13 Die Tool Steel during Hard Turning Operation. **Materials 2019, 12, 177**, [s. l.], 7 jan. 2019.

KHALIQ, Waqas; ZHANG, Chen; JAMIL, Muhammad; MASHOOD KHAN, Aqib. Tool wear, surface quality, and residual stresses analysis of micro-machined additive manufactured Ti–6Al–4V under dry and MQL conditions. **Tribology International 151 (2020) 106408**, [S. l.], p. 1-15, 30 abr. 2020.

L.A. Dobrzanski, J. Mazurkiewicz, E. Hajduczek, and J. Madejski. **Comparison of the Thermal Fatigue Resistance and Structure of the 47CrMoWVTiCeZr16-26-8 Hot-**

Work Tool Steel with X40CrMoV5-1 Type One. J. Mater. Process. Technol., 2001, 113(1–3), p 527–538

LIAO, Xiaoping; ZHOU, Gang; ZHANG, Zhenkun; LU, Juan; MA, Junyan. Tool wear state recognition based on GWO–SVM with feature selection of genetic algorithm. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, [S. l.], p. 1-13, 20 maio 2019.

LIU, Jie et al. Cutting Performance and Wear Behavior of AlTiN- and TiAlSiN-Coated Carbide Tools During Dry Milling of Ti–6Al–4V. **Acta Metallurgica Sinica (English Letters)**, [S. l.], p. 1-12, 5 fev. 2020.

LIU, Yayun et al. Wear resistance of carbide tools with textured flank-face in dry cutting of green alumina ceramics. **Wear**, [s. l.], 2 dez. 2016.

LU, Xiaohong et al. A modified analytical cutting force prediction model under the tool flank wear effect in micro-milling nickel-based superalloy. **Int J Adv Manuf Technol**, [S. l.], p. 1-8, 4 jan. 2017.

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

MACHADO, Álisson Rocha et al. **Teoria da Usinagem dos Materiais**. 1ª edição. ed. [S. l.: s. n.], 2009.

MAGALHÃES, Laurence Colares et al. Influence of feed direction on finishing milling cylindrical surfaces in H13 hardened steel. **Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering**, [S. l.], p. 1-8, 13 mar. 2019.

MEHER, Arabinda et al. Metals and Materials International. **Abrasive Wear Behaviour of TiB2 Reinforced In-Situ Synthesized Magnesium RZ5 Alloy based Metal Matrix Composites**, [s. l.], 23 abr. 2020.

MOHAMMAD EBRAHIMI, Seyed et al. The International Journal of Advanced

Manufacturing Technology. **Influence of machining conditions on tool wear and surface characteristics in hot turning of AISI630 steel**, [s. l.], 27 abr. 2021.

MOHANRAJ, T. et al. Tool condition monitoring techniques in milling process — a review. **Journal of materials research and technology**, [S. l.], p. 1-11, 13 out. 2019.

MUHAMAD, Shalina Sheik et al. Wear Mechanism of Multilayer Coated Carbide Cutting Tool in the Milling Process of AISI 4340 under Cryogenic Environment. **Department of Mechanical and Manufacturing Engineering, Faculty of Engineering and Built Environment, Universiti Kebangsaan Malaysia, Bangi 43600, Selangor, Malaysia**, [S. l.], p. 1-9, 11 jan. 2022.

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.

NAJIHA, M. S. et al. Experimental investigation of flank wear in end milling of aluminum alloy with water-based TiO₂ nanofluid lubricant in minimum quantity lubrication technique. **Int J Adv Manuf Technol (2016)**, [S. l.], p. 1-11, 28 jan. 2016.

NICOLA, Gerson L.; MISSELL, Frank P.; ZEILMANN, Rodrigo P. Surface quality in milling of hardened H13 steel. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology** volume 49, pages53–62 (2010, [s. l.], 29 set. 2009.

ODEDEYI, P B et al. An experimental study of flank wear in the end milling of AISI 316 stainless steel with coated carbide inserts. **Journal of Physics: Conference Series**, [S. l.], p. 1-8, 20 jul. 2017.

OLSSON, Mike et al. Wear 450-451 (2020) 203244. Study of wear mechanisms of cemented carbide tools during machining of single-phase niobium, **Wear** [s. l.], 28 fev. 2020.

OMORI, Toshihiro; KUSAMA, Tomoe; KAWATA, Shingo; OHNUMA, Ikuo; SUTOU,

Yuji; ARAKI, Yoshikazu; ISHIDA, Kiyohito; KAINUMA, Ryosuke. Abnormal Grain Growth Induced by Cyclic Heat Treatment. **Science**, [s. l.], 23 set. 2013.

OWAIS QADRI, Muhammad; NAMAZI, Hamidreza. Fractal-based analysis of the relationship between the surface finish of workpiece and chip formation in milling operation. **Fractals**, [S. l.], p. 1-14, 10 abr. 2020.

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

PAVEL, Kovac et al. Investigation of chip formation during milling. **International journal of production economics**, [S. l.], p. 1-5, 25 mar. 2008.

PRASHNTH, K.G. et al. Microstructure and mechanical properties of Al–12Si produced by selective laser melting: Effect of heat treatment. **Materials Science and Engineering A 590 (2014) 153-160**, [s. l.], 12 out. 2013.

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.

RIZA, Muhammad *et al.* Investigation of Cutting Temperature for AISI H13 in High Speed End Milling. **Journal of Materials Processing Technology**, [s. l.], 3 out. 2016.

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

RAZAK, N. H. et al. Progression of tool deterioration and related cutting force during milling of 718Plus superalloy using cemented tungsten carbide tools. **Int J Adv Manuf Technol**, [S. l.], p. 1-14, 26 jan. 2016.

RODRIGUES, Alessandro R. et al. Influence of the Tool Edge Geometry on Specific Cutting Energy at HighSpeed Cutting. **Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering**, 2007, Vol.29 (3), p.279-283, [S. l.], p. 1-5, 2 jun. 2007.

SANTOS, S. C., SALES, W. F. **Fundamentos da Usinagem dos Materiais**, Apostila, PUC Minas, Belo Horizonte, MG. 2003.

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

SILVA, M.B., WALLBANK, J. **Lubrication and application method in machining**. Industrial Lubrication and Tribology vol. 50, n° 4, july/august, p.149–152, 1998.

SINGH WALIA, Arminster et al. Surface Roughness Analysis of H13 Steel during Electrical Discharge Machining Process Using Cu–TiC Sintered Electrode. **Materials (Basel)**. 2021 Oct; 14(20): 5943, [s. l.], 10 out. 2021.

SINGH, Jai et al. Improvement in Mechanical Properties and Wear Resistance of 13Cr–4Ni Martensitic Steel by Cyclic Heat Treatment. **Transactions of the Indian Institute of Metals**, 2020, Vol.73 (10), p.2519-2528, [S. l.], p. 1-10, 14 jul. 2020.

SREEJITH, P.S.; NGOI, B.K.A. Dry machining: Machining of the future. **Dry machining: Machining of the future**, [s. l.], 27 jan. 1999.

SLOW, P. C. et al. INVESTIGATION OF THE TOOL WEAR AND SURFACE FINISH IN LOW-SPEED MILLING OF STAINLESS STEEL UNDER FLOOD AND MIST LUBRICATION. **Machining Science and Technology: An International Journal**, [S. l.], p. 1-23, 29 out. 2014.

SUN, Yujing et al. Int J Adv Manuf Technol (2013) 69:2545–2553. **Modeling of cutting force under the tool flank wear effect in end milling Ti6Al4V with solid carbide tool**, [s. l.], 11 ago. 2013.

TEKMEN, C. et al. High temperature behaviour of H13 steel. **Z. Metalkd. 96 (2015) 12**, [s. l.], 11 dez. 2005.

Trent, E.M. & Wright, P.K., 2010, “Metal Cutting”, **Ed. Butterworth Heinemann, Boston, USA, 446 p.**

UHLMANN, E.; RIEMER, H.; SCHRÖTER, D.; HENZE, S.; SAMMLER, F.; BARTHELMÄ, F.; FRANK, H. Investigation of wear resistance of coated PcBN turning tools for hard machining. **International Journal of Refractory Metals and Hard Materials**, [s. l.], 12 dez. 2017.

YANG, Xudong; LI, Chuanwei; ZHANG, Ziyang; ZHANG, Xinyu; GU, Jianfeng. Effect of cobalt-based coating microstructure on the thermal fatigue performance of AISI H13 hot work die steel. **Applied Surface Science**, [s. l.], 16 abr. 2020.

WANG, Jian et al. Effect of the Quenching and Tempering Temperatures on the Microstructure and Mechanical Properties of H13 Steel. **Journal of Materials Engineering and Performance 29, 1849-1859 (2020)**, [s. l.], 21 jan. 2020.

WANG, Hao et al. Evolution of Carbides in H13 Steel in Heat Treatment Process. **Transactions of the Japan Institute of Metals Materials Transactions, JIM**, [s. l.], 25 jan. 2017.

WANG, Fuzeng et al. Effects of cutting conditions on microhardness and microstructure in high-speed milling of H13 tool steel. **Int J Adv Manuf Technol (2014) 73:137–146**, [S. l.], p. 1-10, 10 abr. 2014.

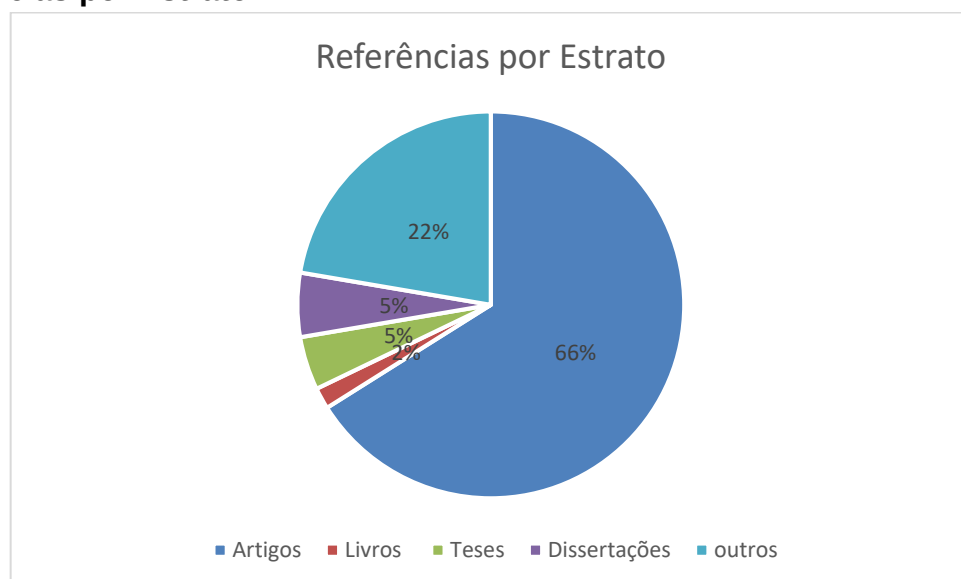
WU, Riming; LI, Wei; CHEN, Meng; HUANG, Shan; HU, Tao. Improved mechanical properties by nanosize tungsten-molybdenum carbides in tungsten containing hot work die steels. **Materials Science and Engineering: A** , [s. l.], 18 mar. 2021.

ZHANG, Li et al. Coated cemented carbide tool life extension accompanied by comb cracks: the milling case of 316L stainless steel. **State Key Laboratory of Powder Metallurgy, Central South University, Changsha 410083, China**, [S. l.], p. 1-9, 21 nov. 2018.

ZHILI, Du et al. Wear performance of different PVD coatings during hard wet end milling of H13 tool steel. **Surface and Coatings Technology 279 (2015) 118-125**, [s. l.], 19 ago. 2015.

ZHOU, W.H. et al. Structure–mechanical property relationship in a high strength low carbon alloy steel processed by two-step intercritical annealing and intercritical tempering. **Materials Science and Engineering A 607 (2014) 569-577**, [s. l.], 26 abr. 2014.

8.2 Referências por Estrato



8.3 Referências por Qualis



8.4 Referências por Data dos Artigos

