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

Estudo de parâmetros de corte para fresamento de topo de revestimentos resistentes ao desgaste

Lorhan Veras Lourenço

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica e Tecnologia dos Materiais, do Centro Federal de Educação Tecnológica Celso Suckow da Fonseca, CEFET/RJ, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre em Engenharia Mecânica e Tecnologia dos Materiais.

Orientador: Hector Reynaldo Meneses Costa, D. Sc.
Coorientadora: Tatiane de Campos Chuvas, D. Sc.

Rio de janeiro
Maio de 2023

ESTUDO DE PARÂMETROS DE CORTE PARA FRESAMENTO DE TOPO DE REVESTIMENTOS RESISTENTES AO DESGASTE

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica e Tecnologia de Materiais (PPEMM) do Centro Federal de Educação Tecnológica Celso Suckow da Fonseca, CEFET/RJ, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre em Engenharia Mecânica e Tecnologia de Materiais.

Lorhan Veras Lourenço

Banca Examinadora:

_____

Presidente, Professor Dr. Hector Reynaldo Meneses Costa (CEFET/RJ) (orientador)

_____

Professora Dra. Tatiane de Campos Chuvas (CEFET/RJ) (coorientadora)

_____

Professor Dr. Ricardo Alexandre Amar Aguiar (CEFET/RJ)

_____

Professor Dra. Maria Cindra (UFF)

Ficha catalográfica elaborada pela Biblioteca Central do CEFET/RJ

L892 Lourenço, Lorhan Veras
Estudo de parâmetros de corte para fresamento de topo de revestimentos resistentes ao desgaste / Lorhan Veras Lourenço. — 2023.
71f. : il. color. , enc.

Dissertação (Mestrado) Centro Federal de Educação Tecnológica Celso Suckow da Fonseca, 2023.
Bibliografia : f. 68-71
Orientador: Hector Reynaldo Meneses Costa
Coorientadora: Tatiane de Campos Chuvas

1. Revestimentos. 2. Aspersão térmica. 3. Fresamento**.** 4. Usinabilidade. I. Costa, Hector Reynaldo Meneses (Orient.). II. Tatiane de Campos Chuvas (Coorient.). III. Ttulo.

CDD 667.9

Elaborada pela bibliotecária Tania Mello – CRB/7 nº 5507/04

AGRADECIMENTOS

Agradeço à professora Tatiane de Campos Chuvas, pela orientação e disposição em ajudar. Além de todo conhecimento transmitido ao longo deste trabalho, mesmo em momentos difíceis como a pandemia.

Agradeço ao professor Hector Reynaldo Meneses Costa, pela orientação e auxílio sempre que necessitei, sempre com simpatia e cuidado.

Agradeço aos amigos e colegas de trabalho que colaboraram na realização dos ensaios e análises experimentais. Professor Matheus Campolina Mendes, pelas imagens no MEV. Técnico de laboratório Brenno Duarte, pelo processo de usinagem. Técnico de laboratório Hiron Akira, pelas análises de microscopia.

Agradeço ao Centro Federal de Educação Tecnológica Celso Suckow da Fonseca e ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica e Tecnologia de Materiais por toda estrutura necessária para realizar este trabalho.

Agradeço a minha família, à minha amada esposa Amanda, nossa amada filha Ísis e nossa bebê no forninho, Sara, pelo suporte e incentivo a buscar sempre o meu melhor.

RESUMO

O uso de revestimentos para proteção de componentes mecânicos é comum na indústria, pois aumentam a vida útil de componentes e de materiais que originalmente não resistiriam às condições adversas, como corrosão e desgaste. Dentre as diferentes técnicas para obtenção desses revestimentos, a aspersão térmica é muito usada por possuir relativa simplicidade e praticidade na aplicação. A principal característica do revestimento por aspersão térmica é a sua estrutura heterogênea, composta por poros, vazios, óxidos, com uma superfície bastante rugosa. Dependendo da aplicação, os componentes aspergidos devem passar por um processo de usinagem afim de regularizar a superfície e melhorar o acabamento superficial, o que ainda é um desafio no setor industrial. Dessa forma, o objetivo deste trabalho é analisar a influência dos parâmetros de corte: velocidade de corte e avanço por dente, no fresamento de topo de peças de aço carbono revestidas por aspersão térmica por arco elétrico. Para isso, foram analisados os dados de força de usinagem, desgaste da ferramenta de corte, rugosidade superficial, e dureza superficial com o intuito de obter dados que caracterizem a usinabilidade desse material. Complementarmente, foi realizada uma análise microestrutural através de microscópio ótico e medição de microdureza com o objetivo de se verificar como as camadas subsuperficiais foram afetadas devido ao processo de usinagem. Os resultados indicam que a combinação de maior velocidade de corte e menor avanço por dente (v_c= 225 m/min e f_z= 0,08 mm), dentre as condições pesquisadas, apresentou menor rugosidade e menor desgaste de ferramenta. Entretanto, o desgaste de ferramenta foi muito severo em todas as condições de usinagem estudadas, atingindo ou chegando próximo aos critérios de fim de vida normalmente utilizados, em um comprimento usinado de 140 mm.

Palavras chaves: Revestimento, Aspersão térmica, Fresamento, Integridade superficial, Usinabilidade

ABSTRACT

The use of coatings to protect mechanical components is a very common practice in industry, because they increase shelf life of components and materials, that originally would not withstand adverse conditions, such as corrosion and wear. Among the different techniques for obtaining these coatings, thermal spraying is widely used due to its relative simplicity and practicality application. The main characteristic of thermal spray coating is its heterogeneous structure, composed of pores, voids, oxides, with a very rough surface. Depending on the application, the sprayed components must pass throught a machining process to smooth the surface and improve the surface finish, which is still a challenge in the industrial sector. Thus, the objective of this work is to analyze the influence of the cutting parameters: cutting speed and feed per tooth, in the end milling of carbon steel pieces coated by thermal arc spray. For this, machining force data, cutting tool wear, surface roughness and surface hardness were analyzed in order to obtain data that characterize the machinability of this material. In addition, a microstructural analysis was carried out using an optical microscope and microhardness measurement to verify how subsurface layers were affected due to the machining process. The results indicate that the combination of higher cutting speed and lower feed per tooth (v_c= 225 m/min and f_z= 0.08 mm), among the researched conditions, presented less roughness and less tool wear. However, tool wear was very severe in all machining conditions studied, reaching or approaching end-of-life criteria normally used, in a machined length of 140 mm.

Key words: coating; thermal spray; milling; surface integrity; machinability.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Ilustração da estrutura típica do revestimento aspergido. (Fonte:VERDIAN, 2017 modificado).....4

Figura 2: Estruturas de revestimento aspergido. À esquerda, liga Al-Ta. À direita, liga metálica $Fe54Mo9Cr15C6P2Si2B3W9$. (Fonte: PAN *et al*., 2022; ZHAO *et al*., 2022) 4

Figura 3: Padrões fotográficos A Sa 2 ½ (à esquerda) e A Sa 3 (à direita). (Fonte: ISO 8501-1, 2007) 5

Figura 4: Esquema de uma pistola de aspersão a arco elétrico. (Fonte: BRITO, 2010 modificado).....8

Figura 5: Ilustração do movimento entre ferramenta e peça. (Fonte: ARAUJO *et al*., 2020 modificado).....11

Figura 6: Força de usinagem e suas componentes numa operação de fresamento tangencial. (Fonte: RIBEIRO *et al*., 2006).....12

Figura 7: Componentes de força de usinagem no fresamento de topo quando $\lambda = 0$. (ARAUJO *et al.*, 2020).....13

Figura 8: Alterações numa superfície usinada e as suas classificações. (Fonte: MACHADO *et al*., 2009 modificado).....15

Figura 9: Superfícies com geometrias distintas que apresentam Ra similar. (Fonte: MACHADO *et al*., 2009).....17

Figura 10: Parâmetro Rz (Fonte: ABNT NBR ISO 4287, 2002).....18

Figura 11: Ilustração dos perfis real e detectado pelo apalpador. (Fonte: MACHADO *et al*., 2009 modificado).....18

Figura 12: Influência da velocidade de corte nos parâmetros Ra e Rz de superfícies usinadas de revestimento aspergido FeCr17Ni2C0.2. (Fonte: GRUND *et al*., 2020 modificado) 19

Figura 13: Influência do avanço nos parâmetros Ra e Rz de superfícies usinadas de revestimento aspergido FeCr17Ni2C0.2. (Fonte: LIBORIUS *et al*., 2019 modificado).....20

Figura 14: Relação geométrica entre o raio da ponta de ferramenta ($r\epsilon$), o avanço (f) e a rugosidade Rt. (Fonte: ARAUJO *et al*., 2020).....21

Figura 15: Representação das camadas da superfície usinada. (Fonte: ARAUJO *et al*., 2020).....22

Figura 16: Perfil de microdureza num revestimento aspergido de aço 17Cr. (Fonte: KUTSCHMANN *et al*., 2021).....23

Figura 17: Direções de aplicação do fluido de corte. (Fonte: MACHADO *et al*., 2009 modificado).....24
Figura 18: Tipos e formas de cavaco. (Fonte: USINAGEM-USINABILIDADE, 2018) 25
Figura 19: Imagens de trincas térmicas obtidas com microscópio. (Fonte: MELO *et al*., 2000).....27
Figura 20: Imagens de lascamentos em ferramentas de corte obtidas com microscópio. (Fonte: LIU *et al*., 2002).....27
Figura 21: Formas de desgaste de ferramenta e suas áreas. (Fonte: MACHADO *et al*., 2009).....28
Figura 22: Desgaste de ferramenta visto no microscópio eletrônico. (Fonte: ARAUJO *et al*., 2020).....28
Figura 23: Desgastes de cratera e de flanco e suas referências para medição. (Fonte: ARAUJO *et al*., 2020).....29
Figura 24: Mecanismos de desgaste. (Fonte: MACHADO *et al*., 2009) 31
Figura 25: Modelo tridimensional e desenho com as principais dimensões da ferramenta de corte utilizada. (Fonte: SANDVIKCOROMANT modificado) 35
Figura 26: Amostra montada para o fresamento. (Fonte: Autor) 35
Figura 27: Desenho esquemático da amostra depois do fresamento. (Fonte: Autor)..36
Figura 28: Montagem da peça sobre o dinamômetro para o fresamento. (Fonte: Autor) 37
Figura 29: À esquerda, gráfico de Fu de um processo de usinagem com destaque para a região tomada como mais homogênea. À direita, gráfico de Fu da região mais homogênea. (Fonte: Autor).....38
Figura 30: Montagem do rugosímetro e amostra para medição de rugosidade. (Fonte: Autor) 39
Figura 31: Pontos de medição de microdureza nas amostras metalográficas. (Fonte: Autor) 41
Figura 32: Gráfico de Fu da parte mais homogênea dos quatro experimentos. (Fonte: Autor) 42
Figura 33: Valores de forças de usinagem máximas dos quatro experimentos. (Fonte: Autor) 43
Figura 34: Rugosidade Ra. (Fonte: Autor) 44

Figura 35: Valores máximos de Rq medidos nos quatro experimentos. (Fonte: Autor) 45
Figura 36: Valores máximos de Rz medidos nos quatro experimentos. (Fonte: Autor) 45
Figura 37: Valores máximos de Rt medidos nos quatro experimentos. (Fonte: Autor) 46
Figura 38: Dureza superficial medida nas quatro superfícies usinadas. (Fonte: Autor) 47
Figura 39: Desgaste de ponta das ferramentas de corte utilizadas nos quatro experimentos com aumento de 100x. (Fonte: Autor) 49
Figura 40: Desgaste da superfície de saída das ferramentas de corte utilizadas nos quatro experimentos com aumento de 100x. (Fonte: Autor) 50
Figura 41: Desgaste da superfície de saída das ferramentas de corte utilizadas nos quatro experimentos com aumento de 50x. (Fonte: Autor) 51
Figura 42: Valores de $VBBmax$ e KT medidos nas ferramentas de corte. (Fonte: Autor) 52
Figura 43: Imagem da ponta da ferramenta usada no experimento 1. MEV (Fonte: Autor) 53
Figura 44: Tipos de desgastes encontrados na ferramenta utilizada no experimento 1. MEV (Fonte: Autor) 54
Figura 45: Trincas vistas na ferramenta utilizada no experimento 1. MEV (Fonte: Autor) 54
Figura 46: Superfície de saída da ferramenta utilizada no experimento 2. MEV (Fonte: autor) 55
Figura 47: Ponta da ferramenta utilizada no experimento 2. MEV (Fonte: autor) 55
Figura 48: Tipos de desgastes vistos na ferramenta utilizada no experimento 2. MEV (Fonte: autor) 56
Figura 49: Desgaste da ponta da ferramenta utilizada no experimento 3. MEV (Fonte: Autor) 57
Figura 50: Desgaste da superfície de saída da ferramenta utilizada no experimento 3. MEV (Fonte: Autor) 57
Figura 51: Desgaste da ponta da ferramenta utilizada no experimento 4. MEV (Fonte: Autor) 58

Figura 52: Desgaste da superfície de saída da ferramenta utilizada no experimento 4. MEV (Fonte: Autor) 58
Figura 53: Adesão de material vista na superfície de saída da ferramenta utilizada no experimento 4. MEV (Fonte: Autor) 59
Figura 54: Imagem dos cavacos gerados durante os processos de usinagem. (Fonte: Autor) 60
Figura 55: Perfil de microdureza na amostra metalográfica. (Fonte: Autor) 61
Figura 56: Perfis do revestimento de cada condição de usinagem com aumento de 100x. (Fonte: Autor) 63
Figura 57: Detalhes do revestimento em cada uma das condições de usinagem com aumento de 200x. (Fonte: Autor) 64

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Propriedades de alguns processos de AT. (Fonte: BRITO, 2010 modificado) 7

Tabela 2: Índices de usinabilidade de alguns materiais. (Fonte: ARAUJO *et al*., 2020 modificado).....33

Tabela 3: Composição química dos arames utilizados, em % de peso. (Fonte: BRITO, 2010).....34

Tabela 4: Parâmetros de corte utilizados nos experimentos. (Fonte: Autor).....36

Tabela 5: Valores de desgaste $VBBmax$ e KT. (Fonte: Autor).....52

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

a_p – Profundidade de corte

APC – Aresta postiça de corte

AT – Aspersão térmica

f – Avanço

f_z – Avanço por dente

F_u – Força de usinagem

HVOF - *High Velocity Oxygen Fuel*

KT – Desgaste de cratera

l_n – Comprimento de avaliação (rugosidade)

l_r – Comprimento de amostragem(rugosidade)

MEV – Microscópio Eletrônico de Varredura

R_a – Desvio aritmético médio (rugosidade)

R_t – Altura total do perfil (rugosidade)

R_z – Altura máxima do perfil (rugosidade)

v_c – Velocidade de corte

v_f – Velocidade de avanço

VB_B – Desgaste de flanco médio

$VB_{Bmáx}$ – Desgaste de flanco máximo

VB_N – Desgaste de entalhe

SUMÁRIO

Introdução 1

1 Revisão Bibliográfica 3

1.1 Aspersão térmica 3

1.1.1 Aspersão Térmica por Arco Elétrico 7

1.2 Usinagem 9

1.2.1 Fresamento 9

1.2.2 Forças de usinagem 11

1.2.3 Integridade superficial 14

1.2.4 Lubrirrefrigeração 23

1.2.5 Geometria do cavaco 25

1.2.6 Desgaste de ferramenta 26

1.2.7 Usinabilidade 32

2 Materiais e métodos 34

2.1 Amostra por aspersão térmica 34

2.2 Fresamento 34

2.3 Aquisição das forças de usinagem 37

2.4 Medição da rugosidade 38

2.5 Ensaios de dureza superficial 39

2.6 Análise de desgaste de ferramenta 40

2.7 Análise da geometria dos cavacos 40

2.8 Amostra metalográfica 40

3 Resultados e discussão 42

3.1 Forças de usinagem 42

3.2 Medida da rugosidade 44

3.3 Dureza superficial 47

3.4 Desgaste de ferramenta 48

3.5 Geometria dos cavacos 59
3.6 Amostra metalográfica e Microdureza 61
4 Conclusão 65
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS 67

Introdução

O uso de revestimentos para proteção contra desgaste e corrosão de componentes mecânicos é de grande importância na indústria. Tais deteriorações podem ser muito danosas, trazendo grandes prejuízos em recursos material, humano e ambiental, como a quebra de peças, vazamentos, contaminações, e acidentes em decorrência desses. Algumas técnicas podem ser aplicadas a fim de evitar ou reduzir os danos, como a pintura com tintas e resinas, tratamento químico ou eletroquímico, proteções metálicas (GENTIL, 1996).

Aspersão térmica é uma técnica que vem sendo utilizada como revestimento, melhorando as propriedades mecânicas originais em relação ao desgaste e corrosão. É um processo que apresenta um bom custo relativo, facilidade na operação, e ainda pode ser feito em campo. Assim, possui uma boa relação custo-benefício na produção e manutenção de equipamentos, além de aumentar a sua vida útil. Principalmente onde ocorrem grandes solicitações térmicas e mecânicas (MARQUES, 2020; PAREDES, 2012).

De forma simplificada, o processo de aspersão térmica consiste em depositar material fundido ou semifundido numa superfície preparada através de um bico de pistola adequado com uma fonte de calor. A superfície gerada apresenta grande irregularidade, assim como diversos defeitos na sua estrutura, como poros, vazios e óxidos. Dessa forma, buscam-se formas de minimizar essas irregularidades, como a utilização de selantes, a fim de vedar os poros abertos e regularizar a superfície. O uso de selantes contribui para aumentar a resistência a corrosão do material de base. Elementos onde a aspersão térmica se destina apenas a proteção contra corrosão, o uso de selantes para regularizar a superfície é suficiente em geral. Por outro lado, dependendo da finalidade do componente, principalmente aqueles sujeitos a grande desgaste, o requisito quanto ao acabamento superficial e tolerâncias dimensionais pode demandar operações de usinagem (MARQUES, 2020; PAREDES, 2012).

O objetivo deste trabalho é pesquisar a influência dos parâmetros de corte, velocidade de corte e avanço por dente, na integridade superficial em operações de fresamento de revestimento metálico aspergido por arco elétrico em substrato de aço carbono. Foram adquiridos dados de rugosidade, dureza superficial, desgaste da ferramenta de corte e a força de usinagem durante o processo de fresamento a fim de estabelecer uma correlação entre os valores obtidos. Também deseja-se verificar se o fresamento pode ser uma alternativa aos processos de usinagem normalmente feitos em revestimentos aspergidos, como a retificação,

além de analisar a usinabilidade desse tipo de material (ŘEHOŘ *et al.*, 2022). Por fim, foi feita a avaliação da microdureza da seção transversal de cada condição do material usinado e não usinado, para verificar se há um nível significativo de deformação plástica na superfície usinada da peça.

1 Revisão Bibliográfica

1.1 Aspersão térmica

A Aspersão Térmica (AT), também chamada de metalização ou *spray* térmico (***Th****ermal* ***Sp****raying*, THSP) é a tecnologia referente a um grupo de processos utilizados na deposição de revestimentos metálicos ou não metálicos sobre uma superfície previamente preparada, o substrato, através de um bico de pistola próprio com uma fonte de calor, a tocha de aspersão. Os revestimentos obtidos por AT possuem diversas aplicações, como melhorar a resistência ao desgaste de componentes mecânicos, promover isolamento térmico e proteção à corrosão, além de restauração dimensional, sendo possível restaurar até 5 mm de espessura de uma peça desgastada com a aplicação de uma camada de revestimento (BRITO, 2010; DARUT *et al.*, 2021; MARQUES, 2020).

Existem variações nos processos de AT, pelos diferentes materiais utilizados, tipo de fonte de energia usada para aquecer ou fundir o material e forma de propulsão das partículas aspergidas para o substrato. Em geral, são utilizados materiais estáveis a altas temperaturas na aspersão, como metais, intermetálicos, ligas metálicas, cerâmicos, óxidos, alguns polímeros e alguns vidros, que podem ser matéria-prima em pelo menos um dos processos de AT. Esses materiais podem ser fornecidos na forma de vareta, arame, cordão ou pó. Quanto aos materiais que podem ser substrato estão metais, cerâmicos, vidros, a maioria dos plásticos e madeiras. As fontes de energia para aquecer ou fundir o material na tocha de aspersão podem ser a queima de um gás combustível ou a geração de um arco elétrico (BRITO, 2010; MARQUES, 2020).

Logo após a fusão, o material aquecido é transformado em gotículas e é acelerado por gases pressurizados, essas gotículas são confinadas em um feixe e são projetadas contra a superfície do substrato, atingindo-a no estado fundido, semifundido ou solidificado. As gotículas achatam-se formando lamelas ao se chocar com o substrato, e aderem a ele. À medida que a aspersão é feita, novas gotículas vão aderindo às já existentes, formando assim camadas de revestimento com uma estrutura típica, não similar a qualquer outra forma metalúrgica. Essas camadas são formadas por pequenas partículas achatadas na direção paralela ao substrato, com estrutura tipicamente lamelar, e sempre contendo defeitos, como inclusões de óxidos, vazios e

porosidades. A estrutura e composição química do material aspergido podem ser diferentes daquelas no estado original. Devido à natureza do processo, podem ocorrer reações com gases e a atmosfera, acarretando a formação de óxidos, quando ar ou oxigênio são usados (DARUT *et al.*, 2021; PAN *et al.*, 2022; ZHAO *et al.*, 2022). A Figura 1 ilustra uma estrutura típica de um revestimento aspergido. Na Figura 2, são apresentadas duas imagens obtidas com microscópio ótico da sessão transversal do revestimento aspergido.

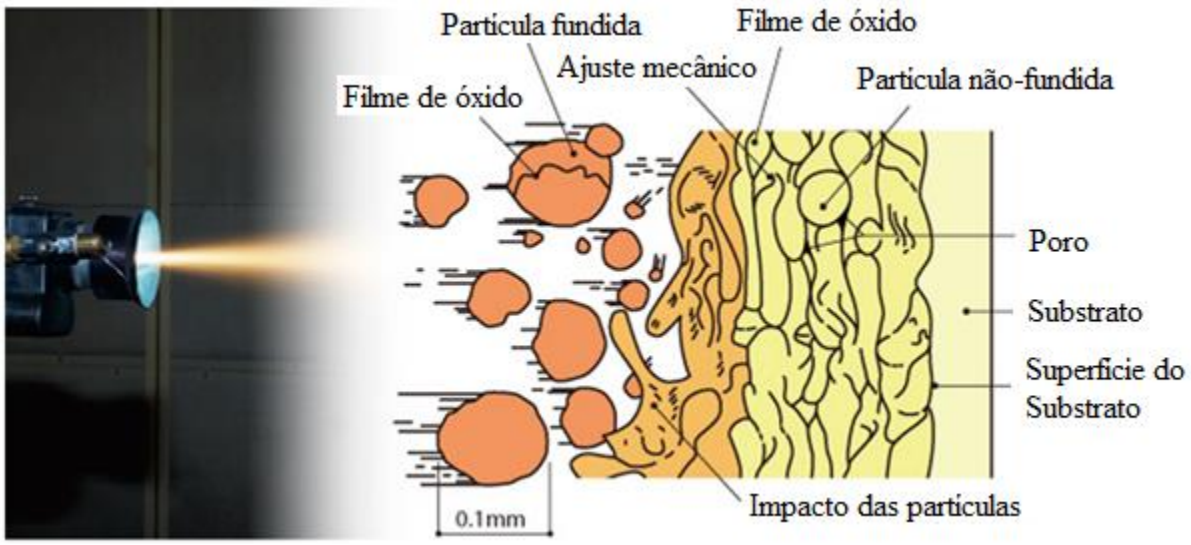


Figura 1: Ilustração da estrutura típica do revestimento aspergido. (Fonte: VERDIAN, 2017 modificado)

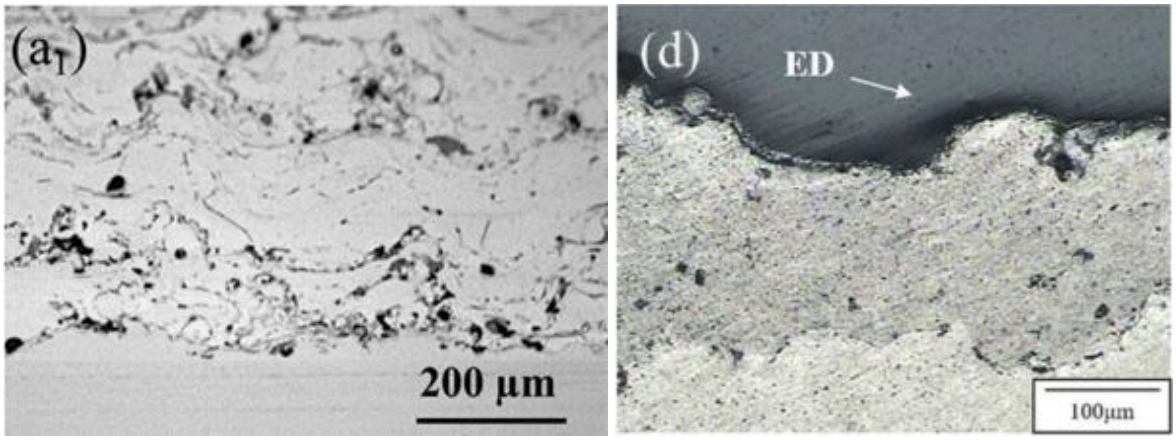


Figura 2: Estruturas de revestimento aspergido. À esquerda, liga Al-Ta. À direita, liga metálica $Fe_{54}Mo_9Cr_{15}C_6P_2Si_2B_3W_9$. (Fonte: PAN *et al.*, 2022; ZHAO *et al.*, 2022)

Os processos de AT são específicos e o número de variáveis envolvidas é grande, portanto, o bom conhecimento dessas variáveis é crucial para um bom resultado do revestimento. A preparação da superfície é a etapa mais crítica nos processos de AT, os procedimentos padronizados de preparação da superfície devem ser seguidos corretamente para garantir o sucesso da aplicação dos revestimentos. A norma ISO 8501-1 padroniza os graus de limpeza entre Sa 1 e Sa 3 (ISO 8501-1, 2007). Para se obter uma boa aderência ao substrato, deve-se ter um grau de limpeza Sa3, exceto pelo processo de AT por arco elétrico que admite um grau de limpeza Sa 2 ½, sem prejuízos à aderência. A seguir, são especificados os graus de limpeza usados antes da AT segundo a norma:

1) Grau Sa 2 ½ (Jateamento abrasivo ao metal quase branco): Quando examinada a olho nu, a superfície deve estar livre de contaminantes visíveis como óleo, graxa e sujidades, e carepa de laminação, corrosão, pintura antiga e materiais estranhos. Quaisquer traços remanescentes de corrosão ou de pintura devem se apresentar somente como manchas tênues ou estrias;
2) Grau Sa 3 (Jateamento abrasivo ao metal branco): Quando examinada a olho nu, a superfície deve estar livre de todos contaminantes visíveis como óleo, graxa e sujidades, e também de carepa de laminação, corrosão, pintura antiga e materiais estranhos. A superfície deve apresentar, então, coloração metálica uniforme.

A Figura 3 mostra os padrões fotográficos A Sa 2 ½ e A Sa 3 de acordo com a norma ISO 8501-1, que são as superfícies de aço que inicialmente estavam completamente cobertas com carepa de laminação, com pouca ou nenhuma corrosão, e passaram por jateamento abrasivo.



Figura 3: Padrões fotográficos A Sa 2 ½ (à esquerda) e A Sa 3 (à direita). (Fonte: ISO 8501-1, 2007)

De uma maneira geral, os processos de AT apresentam as seguintes vantagens e desvantagens (BRITO, 2010; DARUT *et al.*, 2021; MARQUES, 2020):

Vantagens

1) O revestimento proporciona proteção anticorrosiva imediata, não é necessário tempo de cura;
2) Possui boa adesão para aplicação de selantes e pinturas posteriores;
3) Emitem um teor baixíssimo de compostos orgânicos voláteis da camada base para a atmosfera;
4) O processo pode ser feito a temperaturas próximas a 0 °C;
5) Apresentam elevada resistência a trabalhos com soldagem próximos às áreas metalizadas;
6) Os equipamentos utilizados nos processos de combustão a baixa velocidade e arco elétrico são pequenos e portáveis, sendo possível a sua utilização fora de fábrica;
7) O risco de degradação do substrato é reduzido durante o processo de AT quando há um controle apropriado;
8) A aplicação do revestimento pode ser feita com baixo aporte de calor, proporcionando alteração não significativa no substrato;
9) O revestimento desgastado ou danificado pode ser removido sem alterar as propriedades mecânicas, químicas ou dimensionais do substrato;
10) Alta adaptabilidade à forma do componente a ser revestido.

Desvantagens (BRITO, 2010; DARUT *et al.*, 2021; MARQUES, 2020):

1) É necessário mão-de-obra qualificada, e a aplicação manual dos revestimentos por longos períodos pode ser cansativa, quando comparado aos sistemas de pintura;
2) um preparo de superfície de melhor qualidade que os sistemas de pintura é necessário;
3) Os resíduos gerados por alguns materiais, como alumínio e zinco, são tóxicos, e podem se tornar explosivos se os devidos cuidados não forem tomados;
4) A estrutura heterogênea característica do processo, com partículas duras, vazios, apresenta baixo acabamento superficial, além de dificultar o processamento posterior, como a usinagem.

A Tabela 1 apresenta as propriedades de alguns processos de AT

Tabela 1: Propriedades de alguns processos de AT. (Fonte: BRITO, 2010 modificado)

Processos	Temp. da chama (°C)	Velocidade da partícula (m/s)	Teor de óxidos (%)	Custo relativo	Taxa de deposição (kg/h)	Energia (kW/kg)
Arco elétrico	5600	240	0,5~3	1	16	4~6
Chama	2200~2800	30~180	4~6	3	7	25~100
HVOF	3100	610~1080	0,2	5	14	100~270
Plasma	5600	240	0,5~1	5	5	30~80

Como pode ser visto na Tabela 1, o processo de AT por arco elétrico apresenta o menor custo relativo com a maior taxa de deposição, teor de óxidos menor, comparado ao processo a chama, e ainda admite grau de limpeza do substrato Sa 2 ½. Isso faz com que seja um processo de excelente custo x benefício. O processo de AT por arco elétrico foi utilizado na fabricação das amostras estudadas nesta pesquisa. E será mais bem detalhado a seguir.

1.1.1 Aspersão Térmica por Arco Elétrico

O processo de AT por arco elétrico (***A**rc **S**pray **P**rocess*, ASP, em inglês) é um processo avançado onde a fonte de calor é um arco elétrico obtido pela diferença de potencial no bico de uma pistola. Dois arames (sólidos ou tubulares) carregados eletricamente com cargas opostas são alimentados simultaneamente. Assim, é formado um arco controlado na interseção dos dois arames, aquecendo e fundindo o metal. Os arames utilizados são da ordem de 5 mm de diâmetro, podendo ser de materiais puros ou ligados. Um jato de gás atomizante em alta velocidade (ar comprimido, geralmente) é direcionado ao arco elétrico, na região de fusão do material, atomizando-o em forma de gotículas fundidas e projetando-o contra o substrato. A depender da necessidade, gases inertes em alta velocidade, como argônio, hélio e nitrogênio podem ser utilizados a fim de reduzir a oxidação dos revestimentos. Tais gases também podem ser

utilizados em materiais extremamente reativos como zircônio e titânio (BRITO, 2010). A Figura 4 ilustra uma pistola de aspersão por arco elétrico.

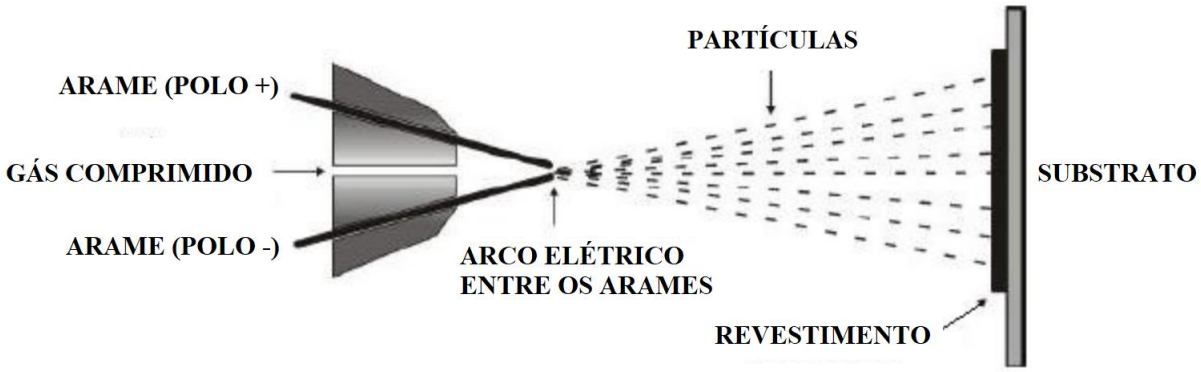


Figura 4: Esquema de uma pistola de aspersão a arco elétrico. (Fonte: BRITO, 2010 modificado)

O equipamento para este processo consiste basicamente em uma fonte de corrente contínua do tipo tensão constante (que trabalha entre 18 e 40 V), alimentadores de arame do tipo velocidade constante, tocha de aspersão e um sistema de fornecimento de ar comprimido, além de mangueiras e cabos. A elevação da tensão elétrica faz aumentar a abertura do arco voltaico formado pelos arames e o tamanho das partículas. Portanto, a tensão elétrica deve ser mantida mais baixa possível para manter a estabilidade do arco, resultando em camadas mais densas e uniformes, com melhor acabamento. Maior tensão elétrica resulta em maiores partículas, menor porosidade, e acabamento mais grosseiro (BRITO, 2010).

A temperatura atingida no arco elétrico é muito maior que a temperatura de fusão dos materiais aspergidos, com isso, pode ocorrer superaquecimento e volatilização, principalmente com materiais como zinco e alumínio. As partículas em alta temperatura podem produzir zonas de interação metalúrgica (reação química) e/ou zonas de difusão após o impacto com o substrato. As partículas com alto estado de energia tendem a mudar a composição de ligas devido à oxidação seletiva e/ou vaporização. Esses fenômenos são de natureza bastante complexa, mas podem ser minimizados pela seleção criteriosa da composição do arame. Um fato limitador do processo é a necessidade dos materiais a serem aspergidos serem condutores elétricos (BRITO, 2010).

1.2 Usinagem

Usinagem é o processo de fabricação onde ocorre a remoção de material em forma de cavaco para dar forma e acabamento às peças. É um processo bastante comum e utilizado na indústria, que produz geometrias e acabamentos de alta qualidade. Por outro lado, apresenta grande complexidade, pois, algumas vezes, pode ser difícil de prever o comportamento do processo, devido às diversas variáveis relacionadas, por exemplo: o tipo de operação aplicada, os parâmetros de corte, o material usinado, material da ferramenta e fluidos de corte (DINIZ *et al.*, 2010; FERRARESI, 1977). Com relação aos revestimentos aspergidos, atualmente, se utilizam operações de usinagem com ferramentas sem geometria definida, como a retificação, que possuem alto custo e baixa produtividade, o que torna evidente a necessidade de estudos sobre o comportamento desse material quando usinado com ferramentas de geometria definida (ŘEHOŘ *et al.*, 2022).

O uso de ferramentas com geometria definida, como o fresamento, poderia possibilitar maior reprodutibilidade e a adaptação dos parâmetros de usinagem que influenciam nas propriedades finais do revestimento, como tensões residuais, por exemplo (LIBORIUS *et al.*, 2021).

1.2.1 Fresamento

O fresamento de topo foi a operação realizada nos experimentos deste trabalho. Para que o processo de usinagem aconteça, deve haver um movimento entre a peça a ser trabalhada e a ferramenta de corte, mais especificamente, o ponto de referência, que é um ponto genérico na aresta de corte. Como as definições dos movimentos e parâmetros são função do tipo de operação, os conceitos a seguir são relativos ao fresamento.

No fresamento, a ferramenta gira e a peça e/ou a ferramenta se deslocam seguindo uma trajetória para a obtenção da geometria desejada. Dentre os diversos parâmetros existentes, a velocidade de corte, o avanço por dente, a velocidade de avanço e a profundidade de corte são os que mais influenciam no processo de corte (DINIZ *et al.*, 2010; FERRARESI, 1977; MACHADO *et al.*, 2009).

O movimento de corte é aquele realizado entre a ferramenta e a peça onde ocorre a remoção de cavaco uma única vez. A direção de corte é a direção instantânea do movimento de corte. O sentido de corte é a resultante quando se considera a peça parada e a ferramenta realizando todo o movimento. As velocidades são a rapidez com que o movimento acontece. A velocidade de corte (v_c) é a velocidade tangencial instantânea resultante da rotação da ferramenta, segundo a direção e o sentido de corte, conforme apresenta a Equação 1.

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

Onde v_c é a velocidade de corte em m/min, *d* é o diâmetro da ferramenta em mm e *n* é a velocidade de rotação da ferramenta em rpm.

O movimento de avanço é aquele que, em conjunto com o movimento de corte, causa a retirada contínua de cavaco. Portanto, o avanço *(f)* é o percurso percorrido pela ferramenta sobre a peça em cada volta, segundo a direção de avanço. Em ferramentas com mais de um gume, como é o caso do fresamento, é comum utilizar o avanço por dente (f_z), que é o percurso de avanço de cada dente medido na direção do avanço da ferramenta. A relação entre *f* e f_z é dada pela Equação 2.

$$f = f_z.z \quad (2)$$

Onde *f* é o avanço em mm/revolução, f_z é o avanço por dente em mm e *z* é o número de dentes.

A velocidade de avanço (v_f) é velocidade instantânea do ponto de referência da aresta de corte, segundo a direção e o sentido de avanço, representada pela Equação 3.

$$v_f = f.n \quad (3)$$

Onde v_f é a velocidade de avanço em mm/min, *f* é o avanço em mm/revolução e *n* é a velocidade de rotação da ferramenta em rpm.

Profundidade de corte (a_p) é a profundidade da penetração da ferramenta em relação à peça, medida perpendicularmente ao plano de trabalho, que é o plano formado pelas direções de avanço e de corte, passando pelo ponto de referência, mostrado na Figura 6.

A Figura 5 ilustra o movimento entre uma ferramenta que gira sem se deslocar, enquanto a peça avança na direção horizontal, no sentido da esquerda para a direita, onde também é possível ver a a_p (ARAUJO *et al.*, 2020; DINIZ *et al.*, 2010; FERRARESI, 1977; MACHADO *et al.*, 2009).

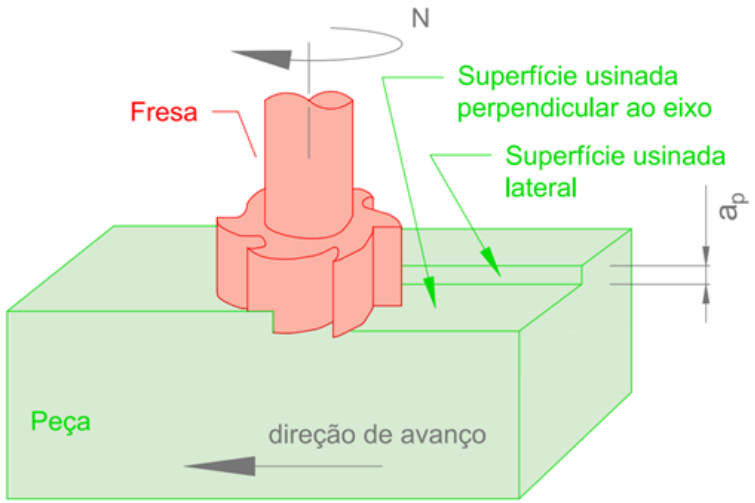


Figura 5: Ilustração do movimento entre ferramenta e peça. (Fonte: ARAUJO *et al.*, 2020 modificado)

1.2.2 Forças de usinagem

Durante o processo de corte, para a formação do cavaco, uma força atua, tanto na peça quanto na ferramenta, devido a tensão de cisalhamento do material da peça, denominada força de usinagem (F_u). O conhecimento da força de usinagem que atua sobre a cunha de corte da ferramenta possibilita estimar a potência necessária para o corte, assim como, os esforços exercidos nos componentes da máquina operatriz. A F_u também tem relação com o desgaste da ferramenta de corte, o que traz informações sobre a viabilidade econômica do processo.

Por ser uma força de três dimensões, para uma análise experimental, é melhor medir a F_u a partir de suas componentes, sendo as três componentes básicas a força de corte, a força de avanço e a força passiva. Além das básicas, existem mais três componentes relevantes: a força ativa, a força de compressão e a força de apoio (DINIZ *et al.*, 2010; FERRARESI, 1977; MACHADO *et al.*, 2009). Todas essas componentes são descritas a seguir:

a) Força de corte ou Força principal de corte (F_c): projeção da F_u sobre o plano de trabalho, na direção de corte, dada pela velocidade de corte;
b) Força de avanço (F_f): projeção da F_u sobre o plano de trabalho, na direção de avanço, dada pela velocidade de corte;
c) Força passiva ou força de profundidade (F_p): projeção da F_u perpendicular ao plano de trabalho;
d) Força ativa (F_t): projeção da F_u sobre o plano de trabalho;
e) Força de compressão (F_n): projeção da F_u sobre uma direção perpendicular à superfície principal de corte;
f) Força de apoio (F_{ap}): projeção da F_u sobre uma direção perpendicular à direção de avanço, situada no plano de trabalho.

A Figura 6 mostra a F_u e todas as suas componentes numa operação de fresamento de topo.

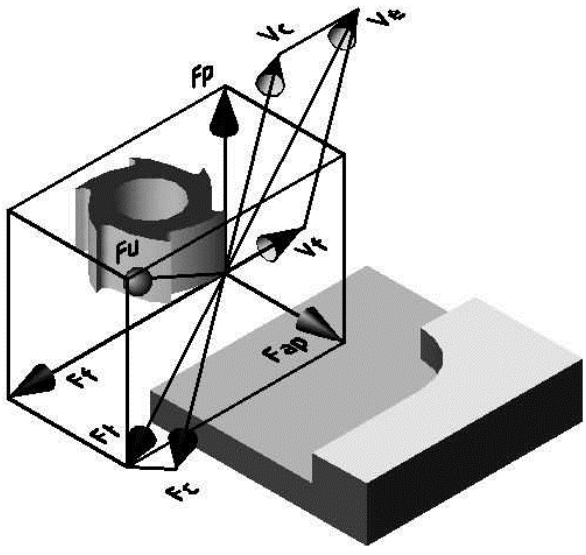


Figura 6: Força de usinagem e suas componentes numa operação de fresamento topo. (Fonte: RIBEIRO *et al.*, 2006)

A F_u pode ser decomposta em três componentes ortogonais, podendo ser calculada com a Equação 4 (MACHADO *et al.*, 2009).

$$F_u = \sqrt{F_{ap}^2 + F_f^2 + F_p^2} \tag{4}$$

O processo de fresamento de topo onde a aresta de corte é posicionada paralela ao eixo de rotação da ferramenta, ou seja, tem ângulo de hélice (λ) e de posição igual a zero pode ser aproximado com menor erro pelo corte ortogonal. O modelo de corte ortogonal considera que o plano de trabalho é perpendicular à aresta de corte. Portanto, no fresamento de topo com λ = 0, a componente vertical da força de usinagem (F_{ap}) pode ser desconsiderada, restando as componentes de força tangencial e radial, referentes ao avanço e à profundidade. A Figura 7 mostra um exemplo de fresamento de topo nessa condição.

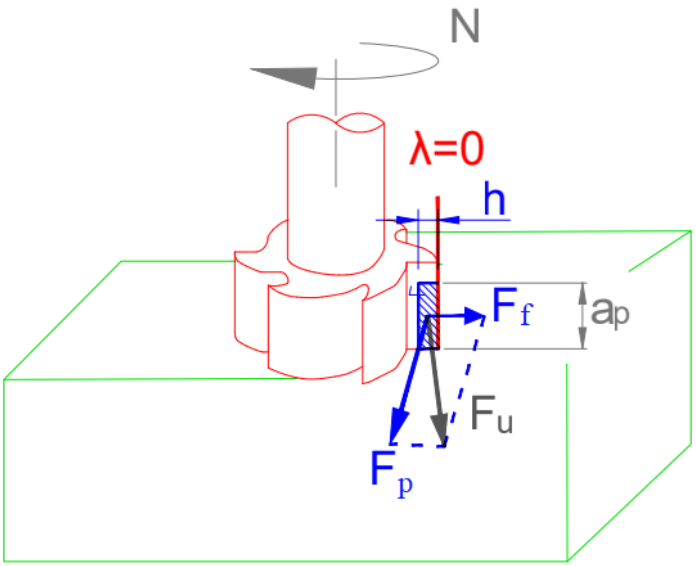


Figura 7: Componentes de força de usinagem no fresamento de topo quando λ = 0. (ARAUJO *et al.*, 2020 modificado)

A medição experimental das forças de usinagem é feita com dinamômetros específicos, sendo os mais utilizados atualmente os que utilizam a medição por extensômetros, que são transdutores que convertem deformação mecânica em variação de tensão elétrica. Um outro princípio de funcionamento de dinamômetro se baseia na piezoeletricidade, que é a capacidade

de certos cristais de se polarizarem eletricamente quando estão sob esforços mecânicos, e de se deformarem elasticamente quando estão submetidos a uma polarização elétrica (FERRARESI, 1977).

Sobre o comportamento de materiais metálicos aspergidos durante o processo de corte, considera-se que os mesmos se equiparem a materiais difíceis de usinar, como Inconel e aço Super duplex. Liu *et al*. (2022) pesquisaram o comportamento de Inconel 718 com dureza 473 HV no fresamento de topo em nove condições de corte, a partir da combinação das velocidades de corte de 45, 60 e 75 m/min, e avanços por dente de 0,05, 0,10 e 0,15 mm/dente. As forças de usinagem medidas foram de 250 a 400 N dentro das nove condições estudadas. George *et al*. (2021) avaliaram o efeito da variação dos parâmetros de usinagem sobre as forças de usinagem no fresamento de aços Duplex 2205 (30 HRC) e Super Duplex 2507 (32 HRC). Eles pesquisaram doze condições diferentes, a partir da combinação das velocidades de corte de 1400, 2800 4200 e 5600 rpm, e avanços de 50, 100 e 150 mm/min. As forças de usinagem medidas ficaram entre 275 e 492 N no Duplex 2205, e entre 458 e 622 N no Super Duplex 2507.

1.2.3 Integridade superficial

A integridade superficial é o termo que se utiliza para descrever a qualidade de uma superfície. Entretanto, não se limita apenas à superfície em si, abrange também camadas subsuperficiais. Já que o processo de usinagem envolve deformações plásticas, ruptura, recuperação elástica, geração de calor, vibração, tensões residuais e, às vezes, reações químicas. A Figura 8 mostra um diagrama com as alterações que podem acontecer numa superfície usinada e as suas classificações (MACHADO *et al.*, 2009). A avaliação da integridade superficial melhora a integridade do componente em si, podendo evitar que falhas possam acontecer e reduzindo custos de uma maneira geral (OLIVEIRA *et al*., 2021).

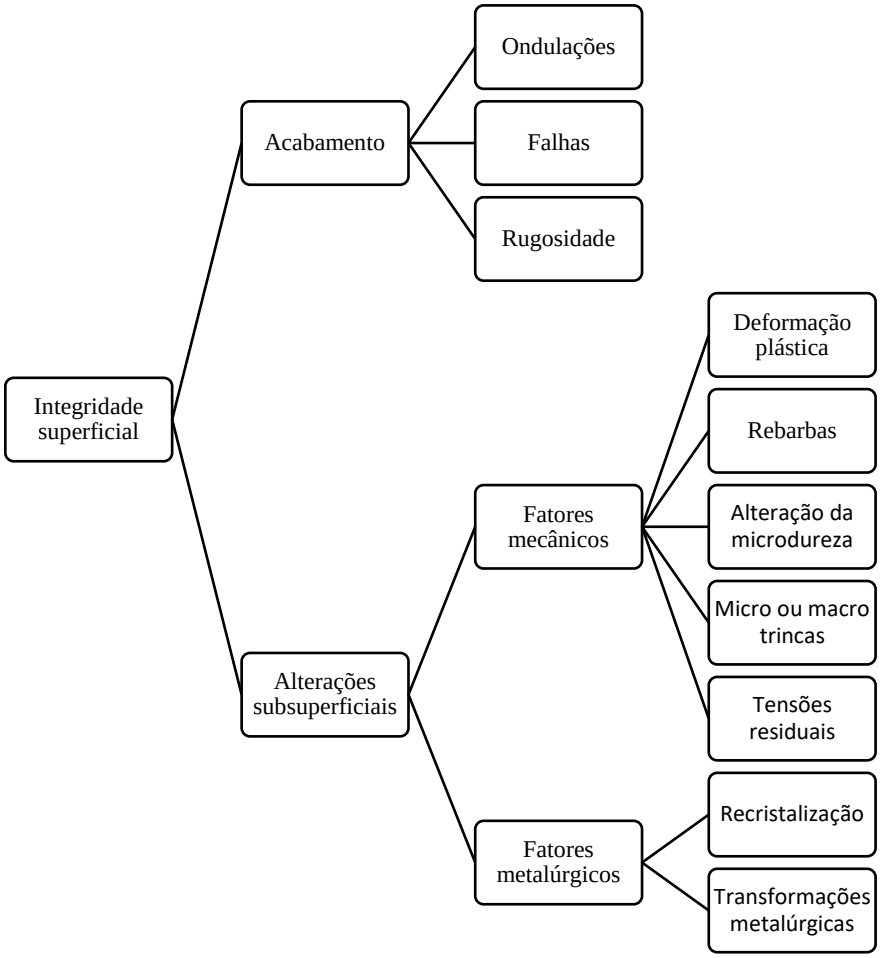


Figura 8: Alterações numa superfície usinada e as suas classificações. (Fonte: MACHADO *et al*., 2009 modificado)

Um dos pontos mais estudados na integridade superficial em usinagem é o acabamento da superfície, sendo esse uma combinação de três fatores: ondulações, falhas e rugosidade (MACHADO *et al.*, 2009).

Ondulações são irregularidades superficiais ou erros geométricos onde os espaçamentos são maiores que as irregularidades consideradas como rugosidade. Elas podem ser causadas por vibrações e flexões da ferramenta e/ou da peça devido à força de usinagem, temperatura de corte ou a erros de fixação da peça ou da ferramenta. Falhas são interrupções na topografia típica de uma superfície, elas não são intencionais e são indesejadas. Podem ser causadas pela característica do processo de fabricação, como na aspersão térmica, como inclusões, bolhas, trincas. Além de poderem ser oriundas do próprio processo de corte.

A rugosidade é uma característica intrínseca ao processo de corte, ela é composta de irregularidades finas ou de erros microgeométricos decorrentes de marcas de avanço, aresta postiça de corte (APC), desgaste de ferramenta. A rugosidade depende de diversos fatores como a máquina operatriz, propriedades do material da peça e da ferramenta, geometria da ferramenta, tipo de operação de usinagem. Enquanto ondulações e falhas devem ser sempre evitadas, o requisito de rugosidade deve estar previsto no projeto, de acordo com a finalidade do componente (MACHADO *et al.*, 2009).

A rugosidade sofre influência de diversas variáveis, e pode ser avaliada de diferentes maneiras. Em destaque, tem-se o Desvio aritmético médio (R_a), o Desvio médio quadrático do perfil avaliado (R_q), a Altura total do perfil (R_t) e a Altura máxima do perfil (R_z). Para todos os casos, a norma ABNT NBR ISO 4287:2002 define como comprimento de amostragem (l_r), o comprimento na direção do eixo X usado para identificar as irregularidades características do perfil sob avaliação. E o comprimento de avaliação (l_n), é definido como o comprimento na direção do eixo X usado para estabelecer o perfil sob avaliação e pode conter um ou mais comprimentos de amostragem.

R_a é a média aritmética dos valores absolutos das ordenadas no comprimento de amostragem. É o parâmetro de controle de processo mais utilizado em superfícies usinadas, já que alterações no seu valor evidenciam alterações no processo, especialmente no desgaste da ferramenta. Por ser um valor médio, é considerado estável, ou seja, não suscetível a efeitos ocasionais. Por outro lado, superfícies com geometrias diferentes, que apresentam desempenho em serviço diferentes, podem apresentar R_a iguais ou próximos, o que torna o parâmetro impreciso em algumas aplicações. A Figura 9 ilustra três superfícies geometricamente distintas com R_a similar (ABNT NBR ISO 4287, 2002; MACHADO *et al*., 2009).

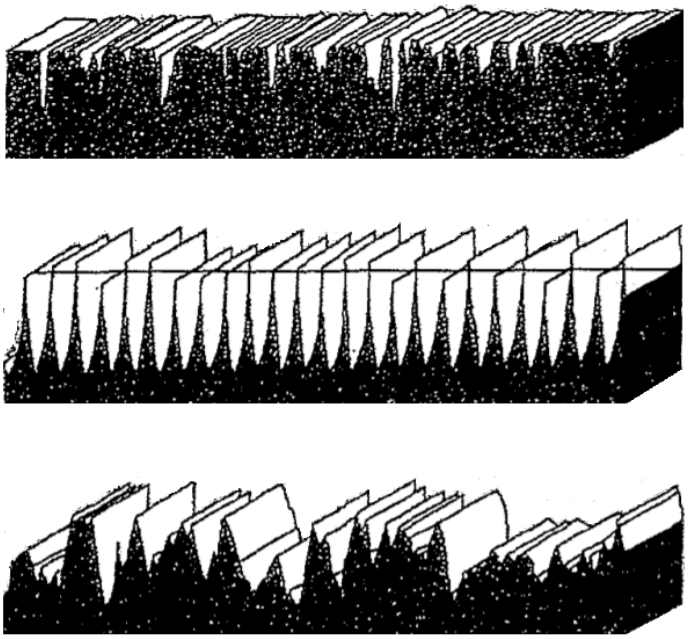


Figura 9: Superfícies com geometrias distintas que apresentam R_a similar. (Fonte: MACHADO *et al.*, 2009)

Com base na Figura 9, fica evidente que R_a não é um parâmetro que consegue identificar características importantes da superfície quando usado de forma isolada, necessitando de outros parâmetros complementares, como o R_q, R_t e/ou R_z.

O parâmetro R_q é a raiz quadrada da média dos valores das ordenadas no comprimento de amostragem, ele tem o efeito de ampliar os valores dos picos e vales isolados ou esporádicos. Nos casos em que é desejável ou necessário especificar a altura máxima da rugosidade, podem ser usados os parâmetros R_t, que é a soma da maior altura de pico do perfil e da maior profundidade de vale do perfil no comprimento de avaliação. Ou o parâmetro R_z, que é a soma da altura máxima dos picos e a maior das profundidades dos vales no comprimento de amostragem, conforme mostrado na Figura 10 (MACHADO *et al.*, 2009).

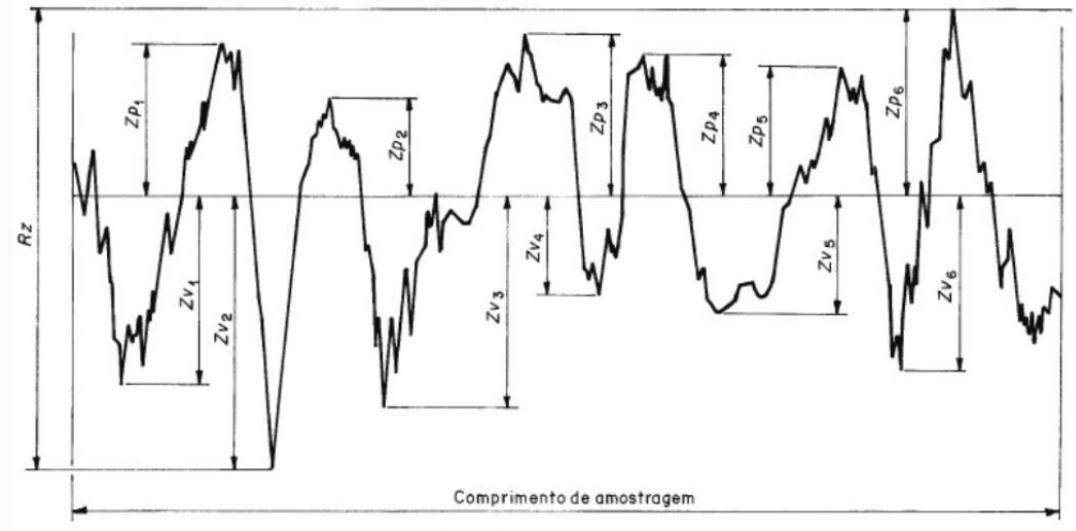


Figura 10: Parâmetro R_z (Fonte: ABNT NBR ISO 4287, 2002).

A rugosidade é medida com um instrumento chamado rugosímetro, podendo ser feita com ou sem contato de um apalpador com a peça. A medição com contato é a mais utilizada por ser simples, versátil e de baixo custo. Nela, um apalpador de diamante percorre o comprimento de avaliação em linha reta. Como o apalpador possui um raio de ponta, ele acaba não detectando imperfeições menores que o raio, portanto, o perfil mostrado é mais suave que o real. A Figura 11 ilustra um perfil real e um perfil detectado pelo rugosímetro. Nos casos em que essas limitações não sejam aceitáveis, é necessário medir a rugosidade por métodos sem contato (MACHADO *et al.*, 2009).

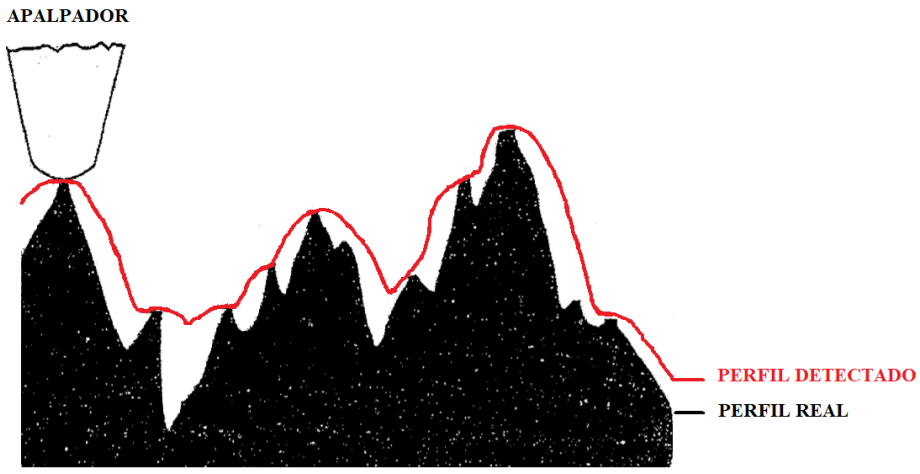


Figura 11: Ilustração dos perfis real e detectado pelo apalpador. (Fonte: MACHADO *et al.*, 2009 modificado)

Os parâmetros de corte têm grande influência nos valores de rugosidade obtidos em processos de usinagem, como o fresamento. GRUND *et al*. (2020) avaliaram a influência da variação da velocidade de corte nas propriedades da superfície usinada por torneamento de revestimento aspergido de aço FeCr17Ni2C0.2. Nesse estudo, as velocidades de corte avaliadas variaram entre 100 e 400 m/min, conforme apresenta a Figura 12.

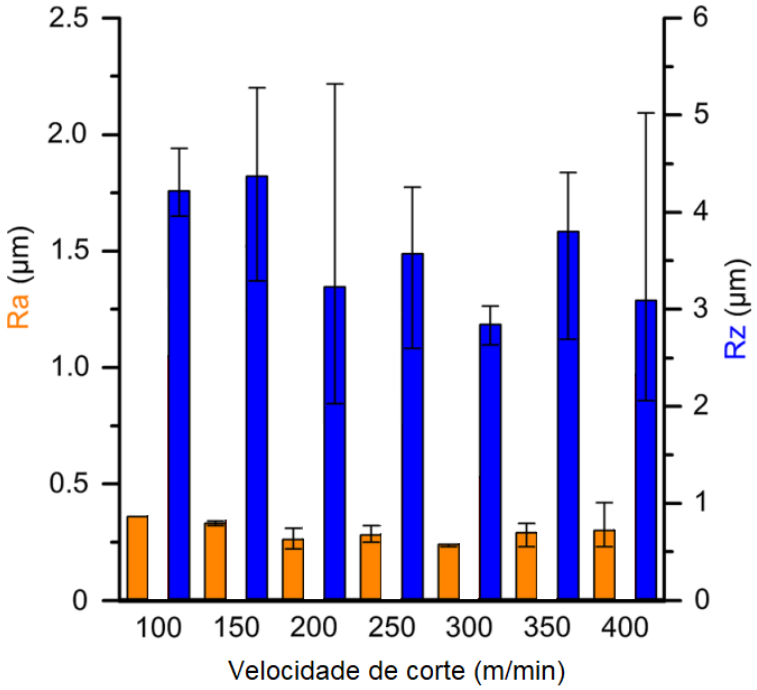


Figura 12: Influência da velocidade de corte nos parâmetros R_a e R_z de superfícies usinadas de revestimento aspergido FeCr17Ni2C0.2. (Fonte: GRUND *et al*., 2020 modificado)

A menor rugosidade R_a foi obtida com velocidade de corte de 300 m/min. Partindo da velocidade 100 m/min, R_a foi reduzindo até o menor valor encontrado, segundo os autores, isso ocorreu devido ao aumento de temperatura na zona de corte, que acarretou a redução de dureza. Nas duas velocidades superiores testadas, 350 e 400 m/min, R_a aumentou, provavelmente devido ao maior desgaste de ferramenta, conforme relataram.

LIBORIUS *et al*. (2019) avaliaram a influência do avanço sobre a integridade superficial no torneamento do revestimento aspergido de FeCr17Ni2C0.2, com avanços entre 0,025 e 0,15 mm/ver, conforme mostra a Figura 13, com profundidade de corte e velocidade de corte constantes, 0,05 mm e 200 m/min respectivamente.

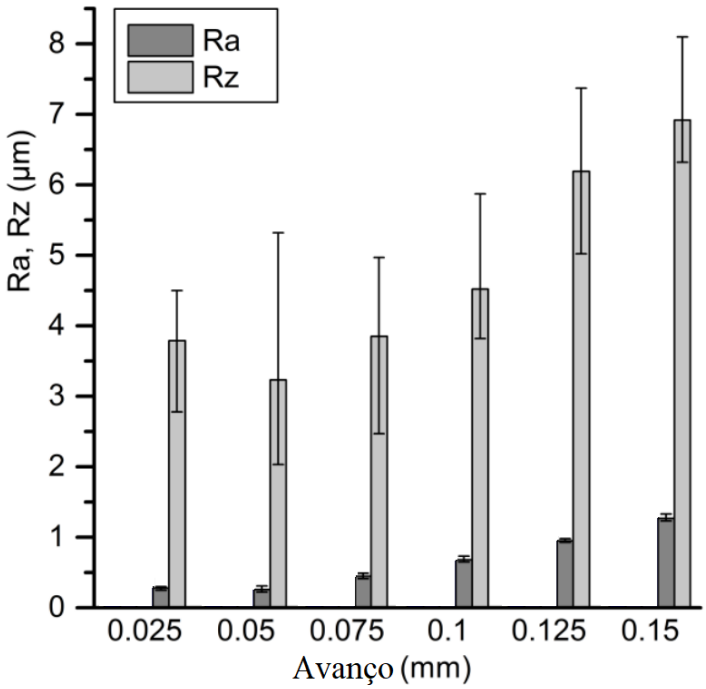


Figura 13: Influência do avanço nos parâmetros R_a e R_z de superfícies usinadas de revestimento aspergido FeCr17Ni2C0.2. (Fonte: LIBORIUS *et al*., 2019 modificado)

Verifica-se que houve uma redução nos valores de R_a *e* R_z quando o avanço foi de 0,025 para 0,05 mm, com esse avanço se mostrando o ponto ótimo. O incremento do avanço a partir de 0,05 até 0,15 mm foi acompanhado de um aumento nos valores de rugosidade.

Existe a possibilidade de fazer uma previsão da rugosidade de uma superfície usinada por torneamento ou fresamento de forma teórica. A equação utilizada é baseada na geometria da ferramenta e no valor de avanço, por dente ou por rotação. Portanto, os valores calculados são tomados apenas como referência, já que não levam em consideração outros fatores como vibrações e condição de lubrirrefrigeração, além de se considerar a geometria da ferramenta como se estivesse nova, sem desgaste. A Figura 14 mostra a relação geométrica entre o raio da ponta de ferramenta (r_ϵ), o avanço (*f)* e a rugosidade R_t.

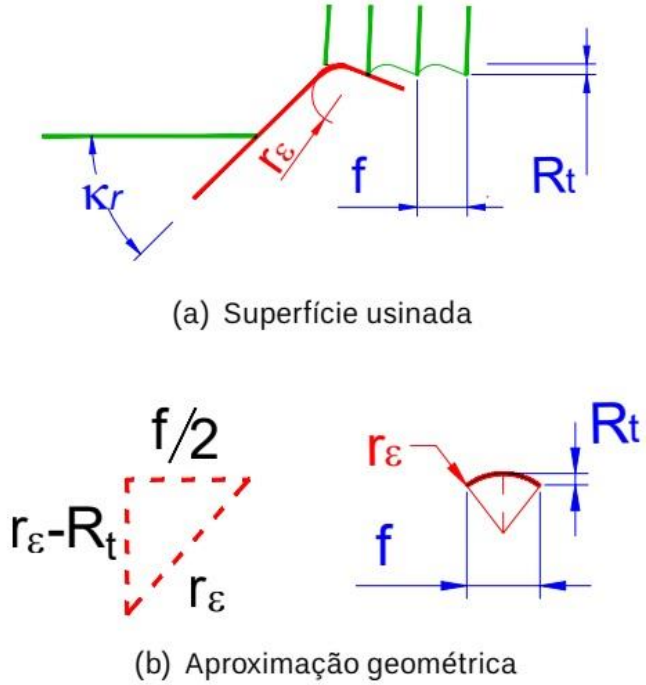


Figura 14: Relação geométrica entre o raio da ponta de ferramenta (r_ϵ), o avanço (f) e a rugosidade R_t. (Fonte: ARAUJO *et al*., 2020)

A partir da geometria teórica, é possível calcular R_t e R_a, mostrado nas Equações 5 e 6 a seguir.

$$R_t = \frac{f^2}{8r_\epsilon} \tag{5}$$

$$R_a = \frac{f^2}{18\sqrt{3}r_\epsilon} \tag{6}$$

Alterações abaixo da superfície usinada podem acontecer, e o conhecimento de tais alterações é de suma importância, já que as propriedades mecânicas podem ser afetadas. As principais alterações subsuperficiais são divididas de acordo com a sua origem, entre mecânica e metalúrgica, como apresenta a Figura 8 (MACHADO *et al.*, 2009). A Figura 15 mostra uma representação esquemática das camadas da superfície usinada.

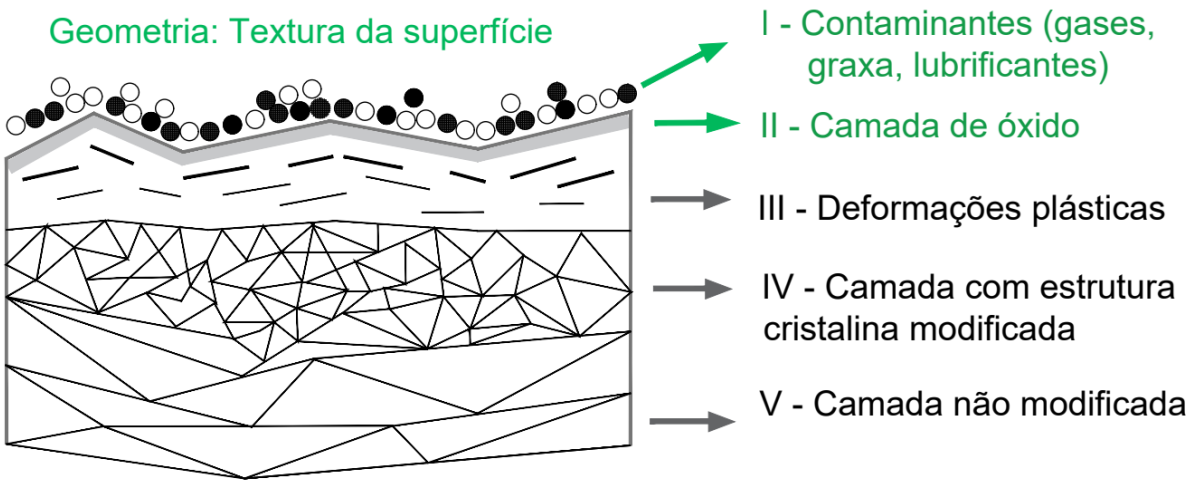


Figura 15: Representação das camadas da superfície usinada. (Fonte: ARAUJO *et al*., 2020)

Para a análise de possível deformação plástica localizada durante a usinagem, pode-se utilizar o ensaio de microdureza Vickers. Neste ensaio, um penetrador piramidal de diamante padronizado é utilizado na aplicação de uma carga sobre a superfície plana previamente preparada do material. O valor da grandeza é obtido através da medição da impressão feita na superfície da peça pelo penetrador com o auxílio de microscópio, devido a impressão ser da ordem de micrometros (CAMPOS *et al.*, 2020).

Com relação aos materiais aspergidos, alguns estudos de dureza e/ou microdureza vêm sendo desenvolvidos para caracterizar as propriedades mecânicas dos materiais depositados. KUTSCHMANN *et al*. (2021) pesquisaram a influência do endurecimento superficial termoquímico na topografia superficial de um revestimento aspergido por arco elétrico de aço 17Cr. Eles obtiveram um perfil de microdureza do revestimento no estado como aspergido e com tratamento de nitretação após aspersão (Figura 16). É possível ver que os valores de microdureza chegam a variar 50% entre o valor máximo e mínimo na condição sem tratamento, caracterizando a heterogeneidade do revestimento. Contudo, ainda há poucos estudos sobre a dureza superficial de peças aspergidas após processos de usinagem por fresamento.

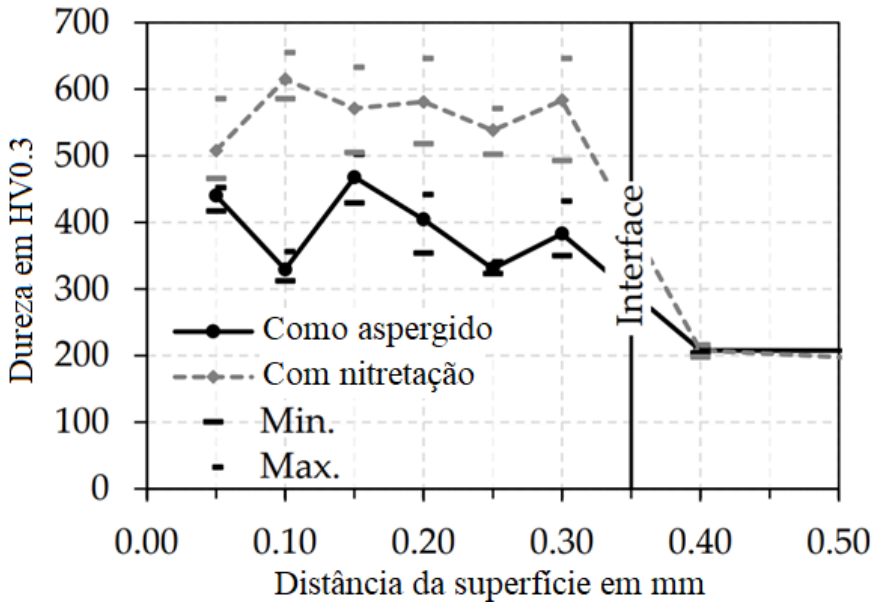


Figura 16: Perfil de microdureza num revestimento aspergido de aço 17Cr. (Fonte: KUTSCHMANN *et al.*, 2021)

1.2.4 Lubrirrefrigeração

Durante o processo de usinagem, normalmente, são aplicados fluidos lubrirrefrigerantes, também chamados de fluidos de corte. Os fluidos de corte possuem quatro funções principais: lubrificar a baixas velocidades de corte, refrigerar a altas velocidades de corte, remover cavacos da zona de corte e proteger a máquina operatriz e a peça contra oxidação. A primeira utilização de um fluido de corte foi feita em 1890. Na ocasião, utilizou-se água como refrigerante, e foi possível aumentar a velocidade de corte em 33%, sem prejuízo a vida da ferramenta. Por mais que a água possua um bom efeito refrigerante, ela promove a oxidação e tem baixo efeito lubrificante. Dessa forma, iniciaram pesquisas para obtenção de soluções de água com outros componentes, até o desenvolvimento dos óleos emulsionáveis com água em proporções entre 1 e 20% de óleo. Assim, o fluido pode ser utilizado como refrigerante ou lubrificante, a depender da aplicação. Uma preocupação também presente no desenvolvimento dos fluidos está no uso de produtos menos danosos ao meio ambiente e à saúde do operador (ARAUJO *et al.*, 2020; DINIZ *et al.*, 2010; MACHADO *et al.*, 2009).

O fluido de corte pode ser aplicado em três direções, conforme mostrado na Figura 17. Na direção A, o fluxo de fluido de corte é direcionado à formação do cavaco, que não é adequada quando há cavacos emaranhados por eles impedirem o contato do fluido com a

interface cavaco-ferramenta. Na direção B, o fluido é aplicado no sentido oposto à saída do cavaco, é recomendada quando o fluido está sob alta pressão. Na direção C, o fluido de corte é aplicado na interface ferramenta-peça, favorecendo a redução do desgaste de flanco e melhora a qualidade da superfície usinada, sendo uma posição relativamente protegida dos cavacos (MACHADO *et al.*, 2009).

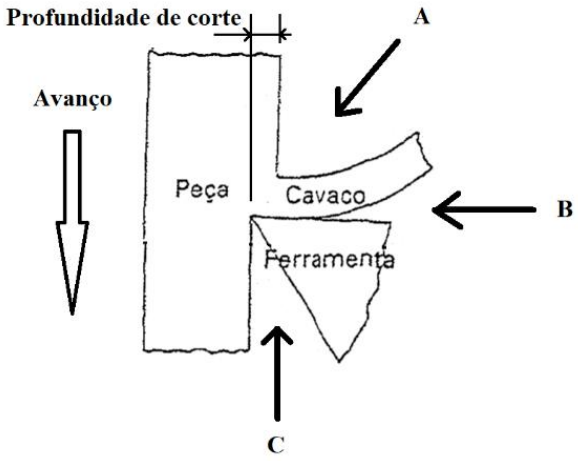


Figura 17: Direções de aplicação do fluido de corte. (Fonte: MACHADO *et al*., 2009 modificado)

Os métodos de aplicação dos fluidos de corte são quatro basicamente: aplicação manual pelo próprio operador; inundação com jorro a baixa pressão, que é o sistema mais comum devido à sua simplicidade, por ser realizado pela máquina-ferramenta; sistema a alta pressão, que exige um sistema mais complexo, que pode utilizar fluido líquido ou gás; e aplicação de névoa, também chamada de mínima quantidade de lubrificante (MQL), onde o fluido é aplicado com ar comprimido diretamente na região de usinagem sob a forma de gotículas. É o método que entrega maior penetração e velocidade do fluido (ARAUJO *et al.*, 2020; MACHADO *et al.*, 2009).

Estudos mostram a influência do uso de fluidos de corte sobre a integridade superficial na usinagem de materiais de elevada dureza. ŞIRIN *et al*. (2021) pesquisaram a influência de diversos tipos de lubrirrefrigeração sobre a integridade superficial, desgaste de ferramenta, entre outros, ao fresar liga de Níquel X-750. Eles encontraram valores de R_a 40% menores, redução na temperatura da zona de corte de 450° C para menos de 350° C e uma pequena

redução na força de usinagem, ao usar MQL quando comparados ao corte a seco. GUELI *et al*. (2021) analisaram os efeitos da variação de profundidade de corte e avanço sobre o desgaste de ferramenta, rugosidade, entre outros, ao fresar Inconel 718. Eles observaram uma pequena melhora nos valores de rugosidade e uma redução significativa no desgaste da superfície de saída ao usar fluído de corte abundante quando comparado ao corte a seco.

1.2.5 Geometria do cavaco

A formação do cavaco está relacionada com diversos fatores do processo de usinagem, como o desgaste da ferramenta, as forças de usinagem, o calor gerado no processo, a penetração do fluido de corte. Portanto, o processo de formação do cavaco tem influência direta em fatores econômicos, na qualidade final da peça, no uso adequado da máquina operatriz. Assim, a análise do cavaco gerado evidencia como o processo de usinagem aconteceu (DINIZ *et al.*, 2010; MACHADO *et al.*, 2009).

Os cavacos podem ser classificados de diversas maneiras, a mais usual é quanto aos seus tipos e formas, conforme mostrado na Figura 18.



Figura 18: Tipos e formas de cavaco. (Fonte: USINAGEM-USINABILIDADE, 2018)

Quanto a sua morfologia, os cavacos podem ser contínuos, parcialmente contínuos, descontínuo ou segmentado. Quanto a sua forma, os cavacos podem ser em fita, helicoidais, em

espiral, em lascas ou pedaços. O material da peça é o fator que mais influencia na forma do cavaco, porém, os parâmetros de corte também têm alguma influência. Aumentar a velocidade de corte, reduzir o avanço, ou aumentar o ângulo de saída tende a mudar a forma do cavaco de tamanho menor para cavacos de tamanho maior (ou sair de descontínuos para contínuos). Na Figura 18, seria uma mudança dos formatos à direita para os à esquerda. Desses parâmetros, o avanço é o de maior influência (MACHADO *et al.*, 2009).

1.2.6 Desgaste de ferramenta

O desgaste da ferramenta é algo intrínseco ao processo de usinagem. Independente da dureza e resistência da ferramenta de corte, haverá um desgaste que, em determinado momento, demandará a substituição da ferramenta. O conhecimento do desgaste da ferramenta é importante, pois, a partir dele, é possível tomar medidas para reduzir o desgaste e prolongar a vida da ferramenta.

Por mais que o custo relacionado a ferramenta em si seja baixo, quando comprado ao processo como um todo. A troca frequente de ferramenta acarreta paradas de máquinas que impactam na produtividade. Além disso, o desgaste da ferramenta afeta também a qualidade final da peça usinada. Existem três fenômenos que causam mudança na aresta de corte e a perda de eficácia da ferramenta: avaria, desgaste e deformação plástica. Entretanto, alguns autores consideram a deformação plástica apenas como um mecanismo de desgaste (MACHADO *et al.*, 2009).

As avarias ocorrem de forma repentina e inesperada, decorrentes de quebra, lascamento ou trinca da aresta de corte. As avarias de origem térmica surgem a partir de operações de corte interrompido, como no fresamento, onde a ferramenta passa por um ciclo em que há uma parte ativa (quando ela retira o cavaco e aquece) e uma parta inativa (quando não retira cavaco e resfria). Materiais aspergidos por serem heterogêneos, apresentam poros, óxidos, vazios, também fazem com que o corte seja do tipo interrompido. Com isso, a temperatura da ferramenta varia de forma cíclica, em que a distribuição de temperatura durante o ciclo depende das condições de corte (principalmente velocidade de corte e avanço e da relação entre o tempo ativo e inativo de um ciclo) e dos materiais da ferramenta de corte e da peça. Trincas térmicas geralmente são perpendiculares à aresta de corte. Interação com trincas mecânicas, que são

paralelas à aresta de corte geralmente, pode ocorrer, levando ao lascamento (MACHADO *et al.*, 2009). A Figura 19 mostra as imagens obtidas por microscópio de trincas térmicas nas superfícies de saída de ferramentas.

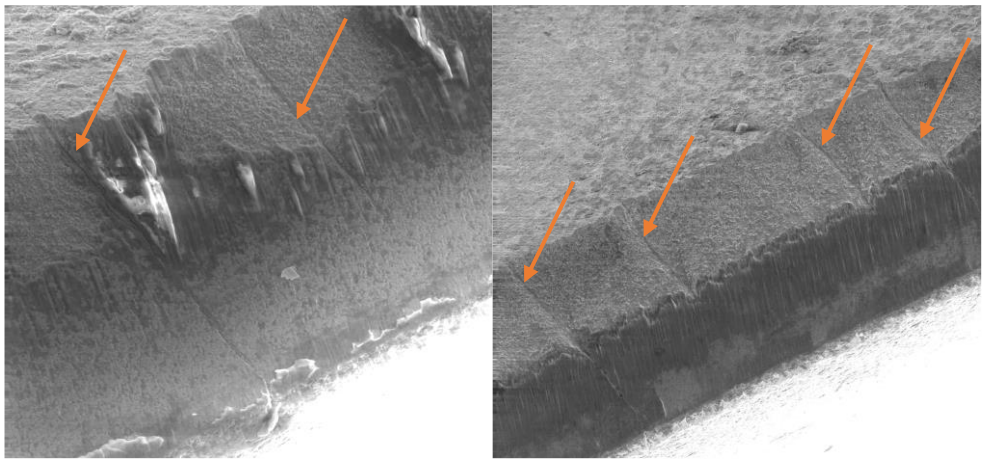


Figura 19: Imagens de trincas térmicas obtidas com microscópio. (Fonte: MELO *et al*., 2000)

As avarias de origem mecânicas são trincas oriundas de choques mecânicos durante a entrada ou a saída da aresta de corte da peça. Normalmente, são paralelas à aresta de corte, tanto na superfície de saída como na superfície de folga da ferramenta, e resultam em lascamentos que podem requerer a substituição da ferramenta (MACHADO *et al.*, 2009). A Figura 20 mostra as imagens obtidas por microscópio de lascamentos em ferramentas de corte.

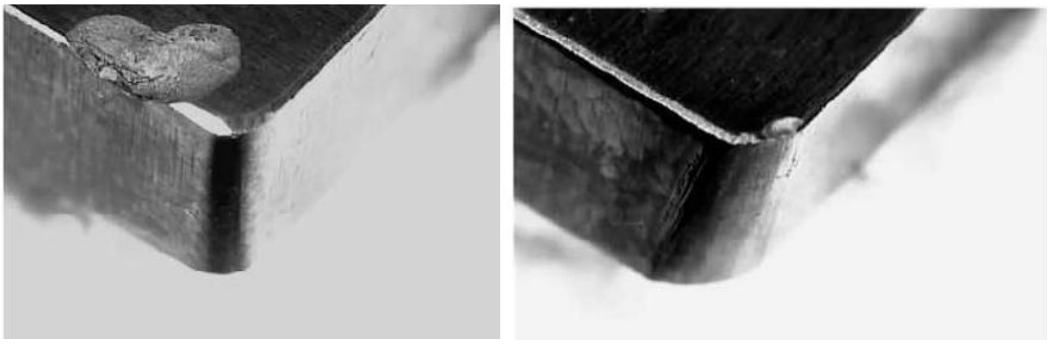


Figura 20: Imagens de lascamentos em ferramentas de corte obtidas com microscópio. (Fonte: LIU *et al*., 2002)

O desgaste é a mudança da forma original da ferramenta durante o corte, resultante da perda gradual de material. Ao contrário da avaria, e mesmo que a ferramenta tenha tenacidade para evitar uma avaria, o desgaste ocorre de forma contínua e progressiva, e em proporções pequenas. Existem pelo menos três tipos de desgaste, conforme mostrado na Figura 21: desgaste de cratera (área A), desgaste de flanco (área B) e desgaste de entalhe (áreas C e D) (MACHADO *et al.*, 2009). A Figura 22 mostra o desgaste de uma ferramenta visto no microscópio eletrônico.

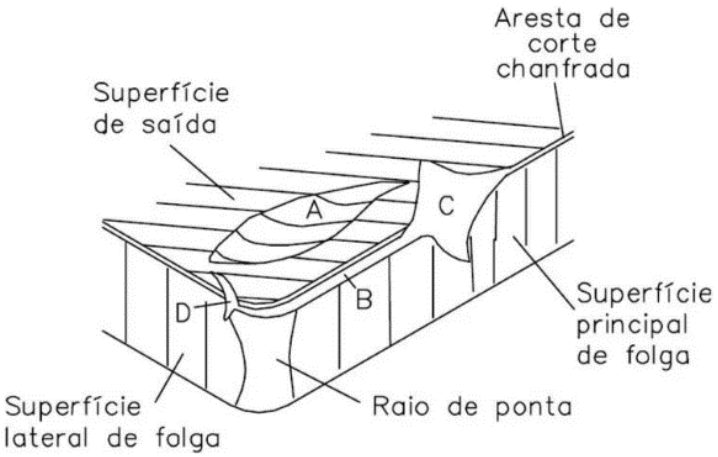


Figura 21: Formas de desgaste de ferramenta e suas áreas. (Fonte: MACHADO *et al*., 2009)

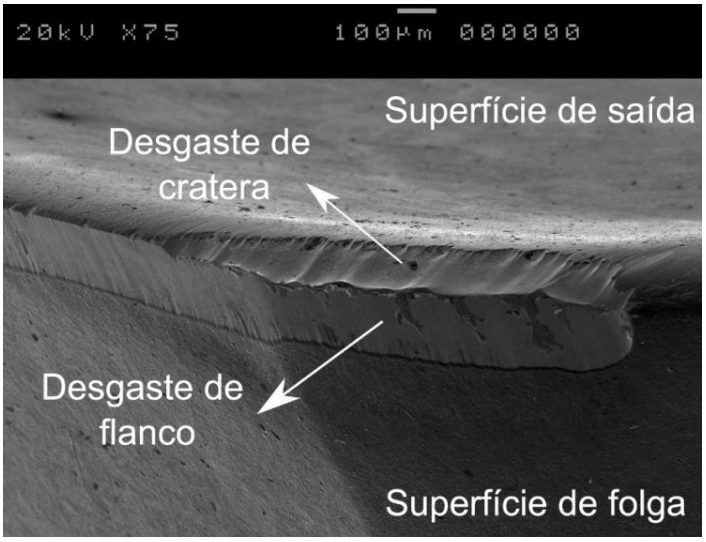


Figura 22: Desgaste de ferramenta visto no microscópio eletrônico. (Fonte: ARAUJO *et al.*, 2020)

O desgaste de flanco é a perda de material dos flancos da ferramenta de corte durante a operação de corte, podendo ser uniforme ou não uniforme. A medição do desgaste de flanco é feita paralelamente à superfície do desgaste da fase e na direção perpendicular à linha original da aresta de corte. O desgaste de flanco pode ser de tamanho uniforme, assim como, pode haver variações na sua dimensão em outras partes dos flancos maiores ou menores, a depender do perfil da ferramenta e das fraturas na aresta. Com isso, o desgaste de flanco deve ser relacionado com a área ou posição da aresta de corte onde a sua medição é feita. Os critérios normalmente utilizados são o "Desgaste de flanco médio (VB_B)", o "Desgaste de flanco máximo ($VB_{Bmáx}$)" e o "Desgaste de entalhe (VB_N)", que é um desgaste que aparece sempre nas regiões coincidentes com as laterais do cavaco, ou seja, regiões mais expostas a atmosfera. Estudos apontam que o desgaste de entalhe tem relação com a oxidação do material da ferramenta (ARAUJO *et al*., 2020; ISO 8688, 2020; MACHADO *et al*., 2009).

O desgaste de cratera (*KT*) é o desenvolvimento progressivo de uma cratera orientada na direção aproximadamente paralela à aresta principal de corte, na superfície de saída do cavaco, e com a máxima profundidade de corte a uma distância da aresta principal de corte. A sua medição é feita pela profundidade da cratera, que é medida na superfície original da ferramenta em uma direção perpendicular à superfície de saída. Como a profundidade da cratera varia ao longo do seu comprimento, a posição da medição em relação à aresta de corte original deve ser documentada em relação a um ponto de referência escolhido na ferramenta (ARAUJO *et al*., 2020; ISO 8688, 2020). A Figura 23 ilustra os tipos de desgastes e os seus pontos de medição.

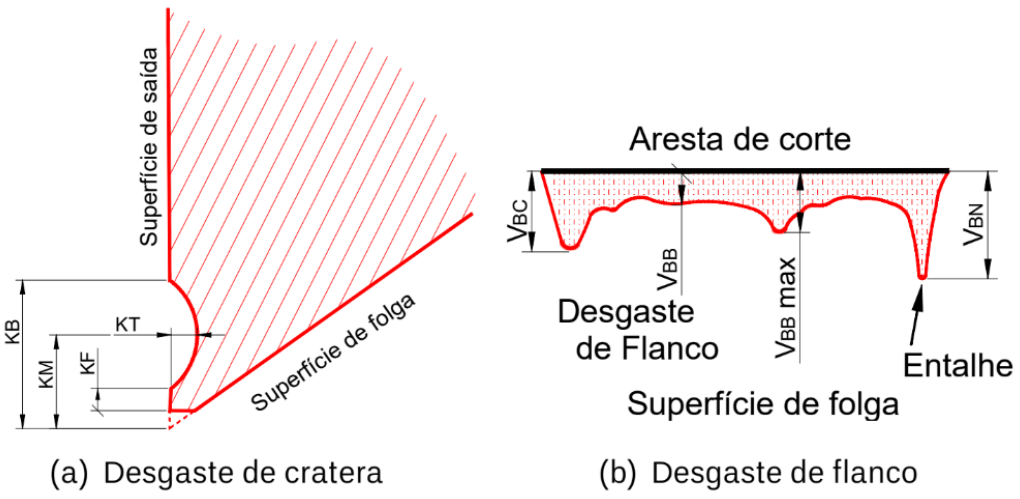


Figura 23: Desgastes de cratera e de flanco e suas referências para medição. (Fonte: ARAUJO *et al*., 2020)

O tempo que a ferramenta de corte trabalha de forma efetiva antes de ser reafiada (quando possível) ou substituída é chamado “vida da ferramenta de corte”. Cabe aos engenheiros responsáveis pelo processo de usinagem acompanhar e determinar os critérios de vida de ferramenta, de acordo com cada situação específica (MACHADO *et al.*, 2009).

Existem alguns critérios que determinam o fim da vida da ferramenta, as normas ISO 3685 e 8688 recomendam alguns critérios, sendo os principais:

1) Desgaste de flanco médio (VB_B) de 0,3mm quando o comprimento do desgaste ocorre de forma regular;
2) Desgaste de flanco máximo (VB_{Bmax}) atinge o valor de 0,6mm quando o desgaste não ocorre de forma regular;
3) Profundidade da cratera (*KT*), com seu valor limite dada em função do avanço (*f*) dada pela equação: $KT = 0{,}06 + 0{,}3f$.

O tipo de desgaste que contribui geralmente para o fim da vida deve ser usado como guia para a escolha de um dos critérios específicos de vida de ferramenta (ISO 3685, 2017; ISO 8688, 2020).

Existem alguns mecanismos de desgaste, e a sua classificação depende da literatura, por exemplo, a deformação plástica pode ser considerada um mecanismo de desgaste ou uma forma de desgaste. Normalmente, são classificados como mecanismos de desgaste difusão, adesão, abrasão e oxidação. Geralmente, todos esses mecanismos de desgaste ocorrem em condições normais de corte, e um deles deve prevalecer sobre os outros, caracterizando-o como o mecanismo de desgaste de maior impacto na vida da ferramenta. A Figura 24 apresenta um diagrama dos mecanismos de desgaste em função da temperatura de corte, esses diagramas podem ser em função de outros parâmetros como a velocidade de corte e avanço, ou qualquer outro que influencie (ARAUJO *et al.*, 2020; MACHADO *et al.*, 2009).

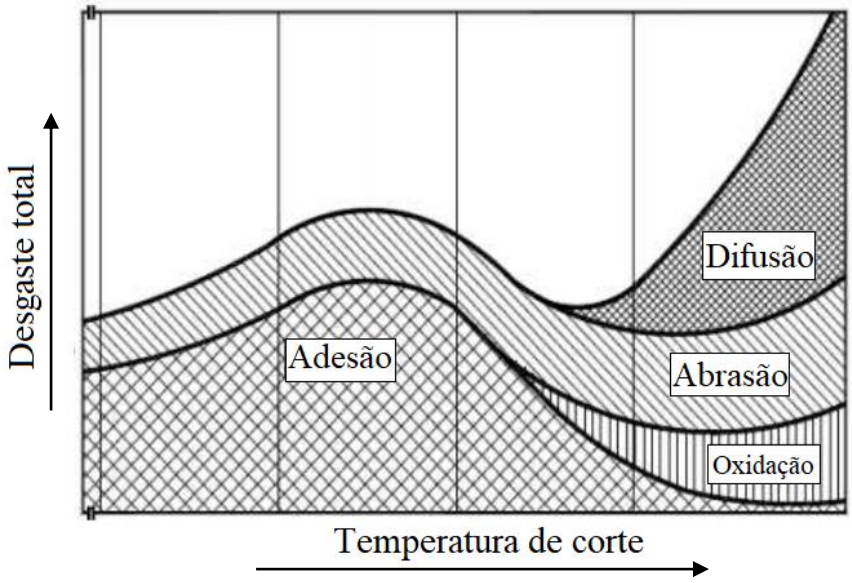


Figura 24: Mecanismos de desgaste. (Fonte: MACHADO *et al.*, 2009)

Verifica-se que a baixas temperaturas os mecanismos de adesão e abrasão prevalecem, enquanto a altas temperaturas o mecanismo de difusão sozinho pode sobressair em relação a todos os outros. Mostrando a grande relação da difusão com a temperatura. Observa-se também que o desgaste total aumenta bastante com o acréscimo de temperatura (MACHADO *et al.*, 2009).

A difusão é um mecanismo de desgaste onde ocorre transferência de material entre o cavaco e a ferramenta no nível atômico. Ela tem forte dependência de três fatores: temperatura, tempo e solubilidade dos elementos presentes na zona secundária de cisalhamento. A adesão é um mecanismo de desgaste que ocorre a baixas velocidades geralmente, quando o fluxo de material sobre a superfície de saída da ferramenta se torna irregular. Em baixas velocidades, a APC pode aparecer, fazendo com que o processo de usinagem se torne menos contínuo, principalmente se a APC for instável. Com isso, fragmentos microscópios da superfície da ferramenta são arrancados e arrastados com o fluxo de material adjacente à interface. E com certa periodicidade, o fluxo de fragmentos da APC arrasta grãos da ferramenta. A abrasão ocorre quando há remoção ou deslocamento de material de uma superfície por partículas duras que podem estar soltas entre duas superfícies com movimento relativo, ou quando as partículas emergirem de uma das superfícies. A oxidação ocorre na maioria dos metais quando estão a altas temperaturas e na presença de ar e água (provenientes da atmosfera e do fluido de corte) (DINIZ *et al.*, 2010; MACHADO *et al.*, 2009).

Estudos que avaliaram o desgaste de ferramenta em materiais de elevada dureza apontam que o mecanismo de desgaste pode variar de acordo com diversos parâmetros do processo. GUELI *et al*. (2021) pesquisaram o desgaste de ferramenta de carboneto sólido no fresamento de Inconel 718 com corte a seco e com fluido refrigerante em diferentes avanços e profundidades de corte, e velocidade de corte de 60 m/min. Eles observaram que as regiões de desgaste eram diferentes do corte a seco para o lubrificado, e também, notaram que o desgaste aumentou com o acréscimo de avanço, sendo esse parâmetro o de maior influência. LIBORIUS *et al*. (2019) pesquisaram a integridade superficial no torneamento do revestimento aspergido de FE17CR2NI0.2C com inserto de nitreto cúbico de boro com avanços entre 0,05 e 0,15 mm com profundidade de corte de 0,05 mm e velocidade de corte de 200 m/min com corte a seco. Eles verificaram que o avanço foi de grande importância no desgaste, os avanços entre 0,05 e 0,10 mm causaram desgaste imperceptível, enquanto que a partir de 0,10 mm as forças de usinagem e temperatura na zona de corte aumentaram, o que resultou num maior avanço.

1.2.7 Usinabilidade

Usinabilidade é uma grandeza comparativa (índice ou porcentagem) que relaciona a dificuldade de usinar um material em determinado sistema de usinagem, com um outro material tomado como padrão. Não é uma propriedade intrínseca ao material, pois depende das condições de usinagem, da ferramenta e da peça, e não tem relação direta com propriedades como dureza e resistência mecânica. As condições de usinagem englobam diversos fatores como os parâmetros de velocidade de corte, avanço, profundidade de corte, as condições de lubrirrefrigeração, a rigidez da máquina operatriz e fixação de ferramentas. Também influenciam o material da ferramenta e a sua geometria. Assim como, o material da peça usinada e seu estado, a existência de inclusões, partículas duras, se passou por processos anteriores, como laminação, recozimento, têmpera, que podem dificultar ou facilitar a usinagem. Devido ao grande número de variáveis, chega a ser difícil estabelecer um valor único de usinabilidade de um material, portanto deve ser entendido como um valor médio (ARAUJO *et al.*, 2020; FERRARESI, 1977).

A Tabela 2 mostra um exemplo da usinabilidade criado pelo Instituto Americano de Ferro e Aço (AISI) onde o aço AISI B1112 foi tomado como modelo, portanto com índice 100%.

Tabela 2: Índices de usinabilidade de alguns materiais. (Fonte: ARAUJO *et al*., 2020 modificado)

Material	Dureza (HBN)	Índice de usinabilidade (%)
Latão	* ver nota	200
Ligas de alumínio	* ver nota	200 ~125
Material padrão: AISI B1112	180 ~ 220	100
Aço inoxidável AISI 416	190 ~210	90
Aço médio-carbono	140 ~210	65
Aço 4130	180 ~200	65
Aço alto-carbono	180 ~230	55
Aço 4140	190 ~210	55
Aço baixo-carbono	130 ~170	50
Aço 4340	200 ~230	45
Aço inoxidável 304	160 ~170	40
Ligas de titânio	220 ~280	30

* As ligas de alumínio e o latão podem apresentar uma grande variação na sua dureza, de acordo com os elementos de liga do material e do tratamento térmico pelo qual ele passou.

A determinação da usinabilidade leva em conta diversos fatores, sendo o mais importante a vida da ferramenta. Por ser uma grandeza comparativa a partir de um modelo predeterminado, os resultados da usinabilidade são valores maiores ou menores que o modelo, sempre tomado como índice 1 ou 100% (ARAUJO *et al.*, 2020; FERRARESI, 1977).

2 Materiais e métodos

2.1 Amostra por aspersão térmica

As amostras utilizadas no presente trabalho foram obtidas de estudos anteriores realizados por BRITO (2010). A amostra com revestimento metálico foi fabricada pelo processo de aspersão térmica a arco elétrico em substrato de aço carbono UNS G10200 com dimensões 99 x 152 mm. Antes da deposição por AT, a superfície foi preparada por limpeza mecânica grau Sa 2 ½ com jateamento abrasivo de óxido de alumínio G.20. Foi aplicada uma liga intermediária 95Ni5Al para aumentar a aderência do revestimento. Os elementos de liga Ni e Al foram utilizados por apresentarem altas capacidades de aderência com o material do substrato.

No processo de AT, dois arames de 2,6 mm foram utilizados, cujas composições químicas são mostradas na Tabela 3, onde os elementos com menos de 0,01% não foram indicados. Os parâmetros para o processo de AT foram: tensão de 40 V, corrente próxima a 100 A, taxa de deposição de 3,24 kg/h e aplicação de três a seis passes. Com isso, foi obtida uma camada de revestimento de 1,9 mm (BRITO, 2010).

Tabela 3: Composição química dos arames utilizados, em % de peso. (Fonte: BRITO, 2010)

Arame	Fe	Cr	Ni	B	Mn	Mo	C	Si
1	66,1	27,0	---	3,5	1,8	---	---	1,6
2	65,7	25,7	2,9	---	1,9	0,8	1,6	1,4

2.2 Fresamento

O fresamento de topo foi feito numa fresadora convencional Diplomat 3001, modelo FVF 2000, disponível no Laboratório de Pesquisa em Usinagem (LABUS) no CEFET/RJ. Foi utilizada uma fresa intercambiável com diâmetro de 20mm, composta por dois insertos de metal

duro, modelo R390-11T3 08M-PM, classe 4240, com revestimento CVD TiCN+Al2O3+TiN, da Sandvik Coromant, mostrado na Figura 25. O fabricante recomenda os parâmetros de corte: f_z entre 0,08 e 0,2 mm (ideal 0,12 mm) e v_c entre 210 e 225 m/min (ideal 220 m/min) para a classe de materiais M (aços inoxidáveis) (SANDVIKCOROMANT, [*s. d.*]). Foi utilizado fluido de corte do tipo emulsão na proporção 1:10 com jorro a baixa pressão na direção C da Figura 17. O comprimento usinado foi de 70 mm a partir da extremidade da amostra, como apresenta a Figura 26. A Figura 27 apresenta o desenho esquemático da amostra depois do fresamento, a região hachurada indica onde ocorreram os fresamentos de cada experimento.

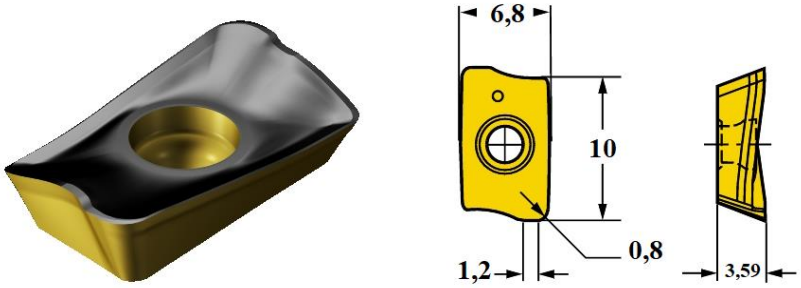


Figura 25: Modelo tridimensional e desenho com as principais dimensões da ferramenta de corte utilizada. (Fonte: SANDVIKCOROMANT modificado)

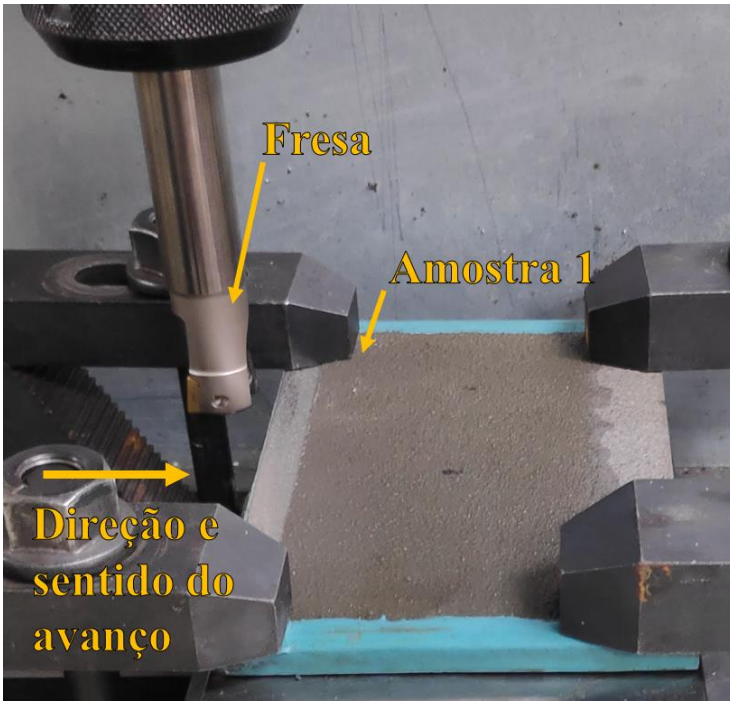


Figura 26: Amostra montada para o fresamento. (Fonte: Autor)

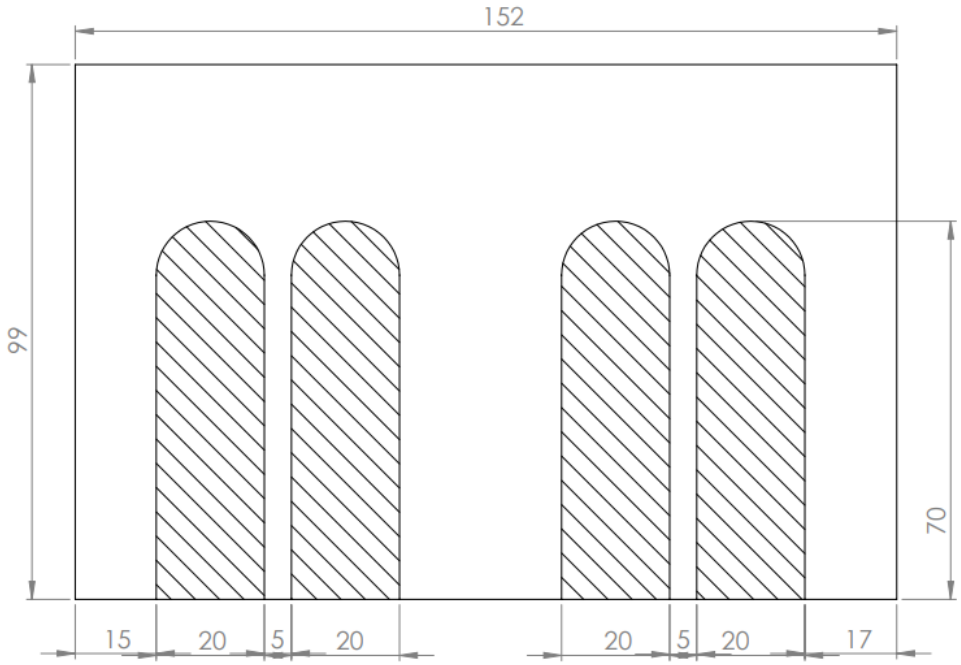


Figura 27: Desenho esquemático da amostra depois do fresamento. (Fonte: Autor)

O estudo avaliou a variação dos parâmetros f_z e v_c, com a_p fixa de 0,5 mm. Para as usinagens foi utilizado o planejamento experimental fatorial 2k, resultando em quatro condições, como mostra a Tabela 4. Inicialmente, foi pensado de utilizar uma combinação dos valores extremos dos parâmetros f_z e v_c suportados pela ferramenta, porém a fresadora não tinha capacidade de alcançar os valores máximos de f_z, suportando no máximo um valor próximo ao ideal (0,12 mm), e esse foi utilizado como valor máximo. No total, foram realizados dois passes em cada experimento e para cada condição foi usado um par de ferramentas de corte novo.

Tabela 4: Parâmetros de corte utilizados nos experimentos. (Fonte: Autor)

Experimento	v_c (m/min)	f_z (mm)
1	210	0,08
2	225	0,08
3	210	0,12
4	225	0,12

2.3 Aquisição das forças de usinagem

Para a aquisição das forças de usinagem, foi utilizado um dinamômetro do fabricante Kistler Instrument AG, Modelo 30 9257 BA, disponível no LABUS do CEFET/RJ, acoplado à fresadora Diplomat 3001. Este equipamento pode medir três componentes ortogonais de força (F_x, F_y e F_z) simultaneamente. O dinamômetro utilizado é do tipo piezoelétrico com cristais de quartzo, que produz um sinal elétrico proporcional a força de carregamento o qual está submetido. A Figura 28 exibe a amostra montada na fresadora sobre o dinamômetro, também é possível ver a fresa utilizada. Além disso, as componentes da força de usinagem estão representadas.

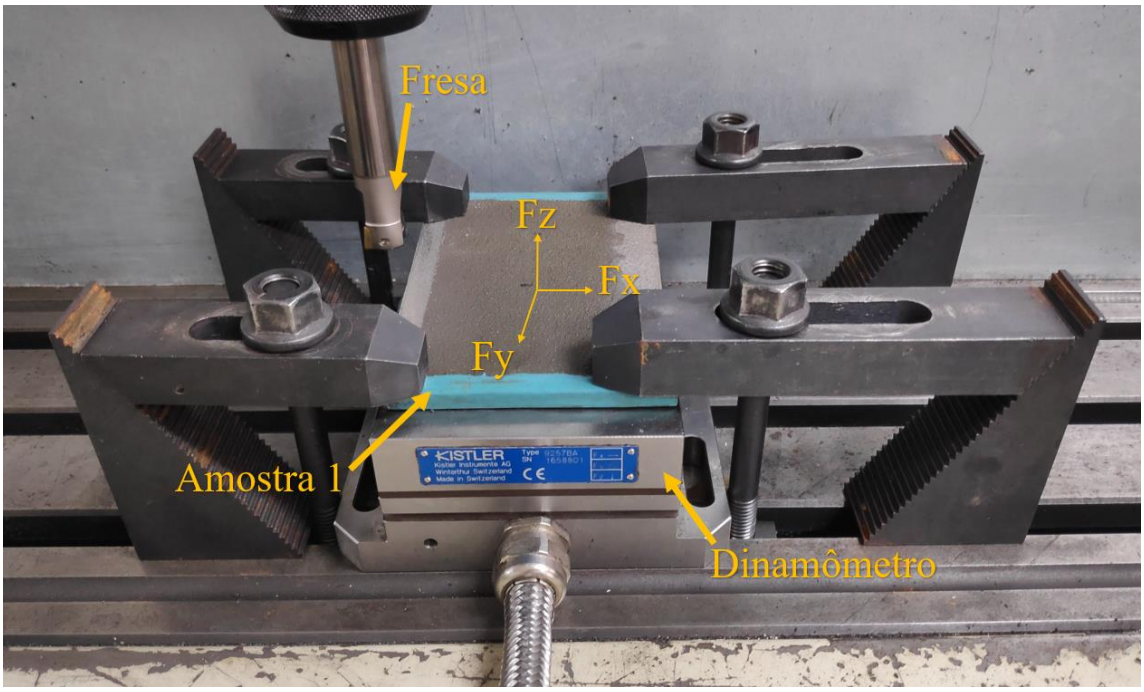


Figura 28: Montagem da peça sobre o dinamômetro para o fresamento. (Fonte: Autor)

O sinal emitido pelo dinamômetro é direcionado a um condicionador de sinais Kistler modelo 52331, e em seguida, para uma placa de aquisição de dados (digitalizador A/D) do fabricante National Instruments modelo NI USB-6221. A placa de aquisição de dados é composta por 8 canais de entrada analógica, com resolução de 16 bits, e taxa de aquisição de dados de até 250kS/s (*kiloSamples* por segundo). As faixas de tensão máximas e mínimas são

de ±10V e ±200mV respectivamente. O sinal analógico (constante no tempo) recebido pela placa de aquisição de dados é transformado em sinal digital (quantizado no tempo) para ser possível a sua visualização no *software* disponibilizado pelo fabricante. Por fim, é gerado um arquivo de dados com os valores de tensão elétrica em milivolt (mV) ao longo do tempo do ensaio.

A F_u foi calculada utilizando a Equação 4, desprezando-se a componente F_z, referente a força de apoio, pois foi assumida a hipótese do modelo de corte ortogonal no fresamento de topo (ARAUJO *et al.*, 2020). Tendo em vista que as forças variam muito durante o processo de usinagem, a F_u máxima de cada condição de usinagem foi calculada a partir da média dos quinze picos de F_u da porção considerada como mais homogênea do gráfico de F_u do processo inteiro. Os cálculos e análise gráfica foram feitos com um programa específico. A Figura 29 mostra um gráfico de força de um dos experimentos executados, em destaque a região considerada como a mais uniforme.

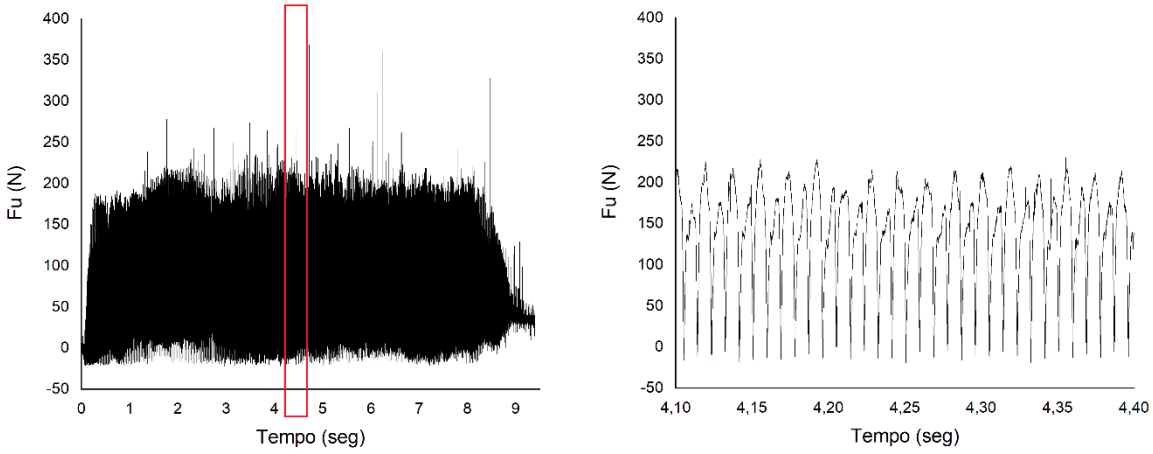


Figura 29: À esquerda, gráfico de F_u de um processo de usinagem com destaque para a região tomada como mais homogênea. À direita, gráfico de F_u da região mais homogênea. (Fonte: Autor)

2.4 Medição da rugosidade

A medição da rugosidade das superfícies usinadas foi realizada utilizando-se um rugosímetro Mitutoyo SJ-210 com resolução de 0,002 µm, disponível no LABUS do

CEFET/RJ. Foram realizadas três medições dos parâmetros R_a, R_q, R_t e R_z ao longo do comprimento usinado. O comprimento de amostragem l_r foi de 2,50 mm e o comprimento de avaliação l_n de 12,50 mm. O valor de R_a foi calculado a partir da média das três medições feitas e também foi calculado o desvio padrão, nos demais parâmetros foi considerado o maior valor das três medições. A Figura 30 mostra a montagem para a medição dos valores de rugosidade.

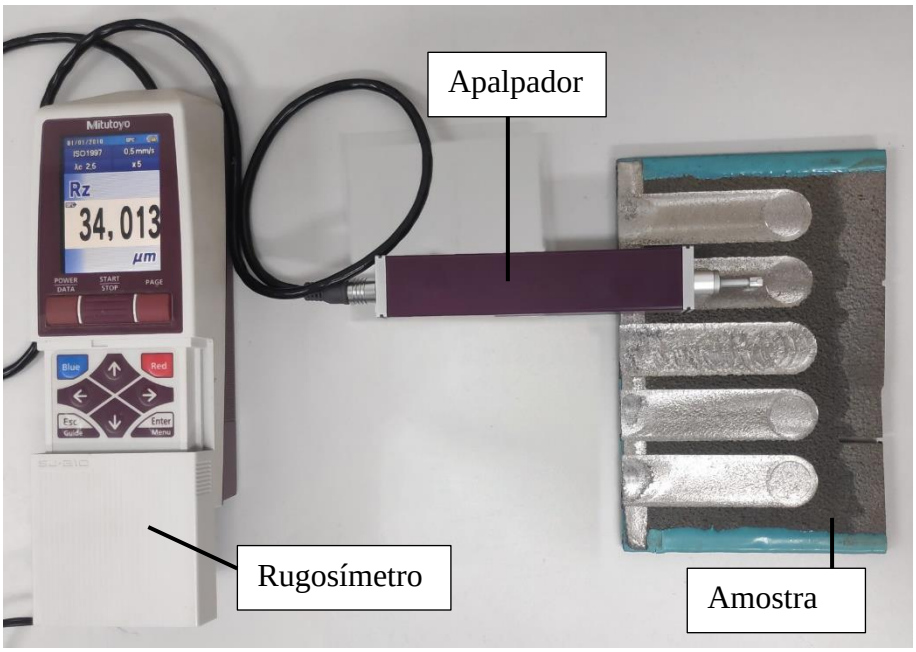


Figura 30: Montagem do rugosímetro e amostra para medição de rugosidade. (Fonte: Autor)

2.5 Ensaios de dureza superficial

Os ensaios de dureza Vickers foram realizados em cinco pontos de cada uma das quatro superfícies usinadas, também foram calculados as médias e desvios-padrão. Para a realização dos ensaios, foi utilizado um durômetro da fabricante Instron Wolpert, modelo DIA TESTOR 7551, do Laboratório de Materiais (LAMAT) do CEFET/RJ utilizando-se a carga de 1 kg.

2.6 Análise de desgaste de ferramenta

A análise dos desgastes das ferramentas foi realizada com microscópio óptico do fabricante *Olympus*, modelo BX60M, do Laboratório de Materiais (LAMAT) do CEFET/RJ. Foram analisados o flanco principal, flanco secundário, a superfície de saída e a ponta das ferramentas. As imagens dos flancos foram feitas com aumento de 100x. As imagens da superfície de saída foram feitas com aumentos de 100x, onde foi possível ver o desgaste com maiores detalhes e fazer a sua medição. Também foram feitas imagens com aumento de 50x, onde foi possível fazer uma comparação com uma ferramenta nova, através de uma imagem sobreposta. Além dessas, foram feitas algumas imagens no microscópio eletrônico de varredura (MEV) CamScan LV3200, disponível no Laboratório de Materiais (LAMAT) do CEFET/RJ, onde foi possível ver com melhores detalhes os tipos de desgastes que ocorreram.

2.7 Análise da geometria dos cavacos

A análise da geometria do cavaco foi realizada com estereomicroscópio do fabricante Metrimpex, do Laboratório de Materiais (LAMAT) do CEFET/RJ, com os aumentos de 16x e 40x. Também foi feita uma imagem no microscópio ótico com aumento de 100x.

2.8 Amostra metalográfica

Duas amostras metalográficas foram preparadas, cada uma possui duas condições de usinagem e uma parte não usinada. O intuito é verificar a estrutura metalográfica do revestimento aspergido com microscópio ótico. Além de avaliar a microdureza do revestimento, da interface revestimento-substrato e do substrato com um microdurômetro, com o objetivo de verificar se houve camadas subsuperficiais afetadas pelo processo de usinagem. As medições de microdureza foram feitas com o Microdurômetro do fabricante *Wilson Instruments*, modelo 422MVD, com carga de 300g disponível no LAMAT do CEFET/RJ. Foram feitas nove medições no total, como mostra a Figura 31.

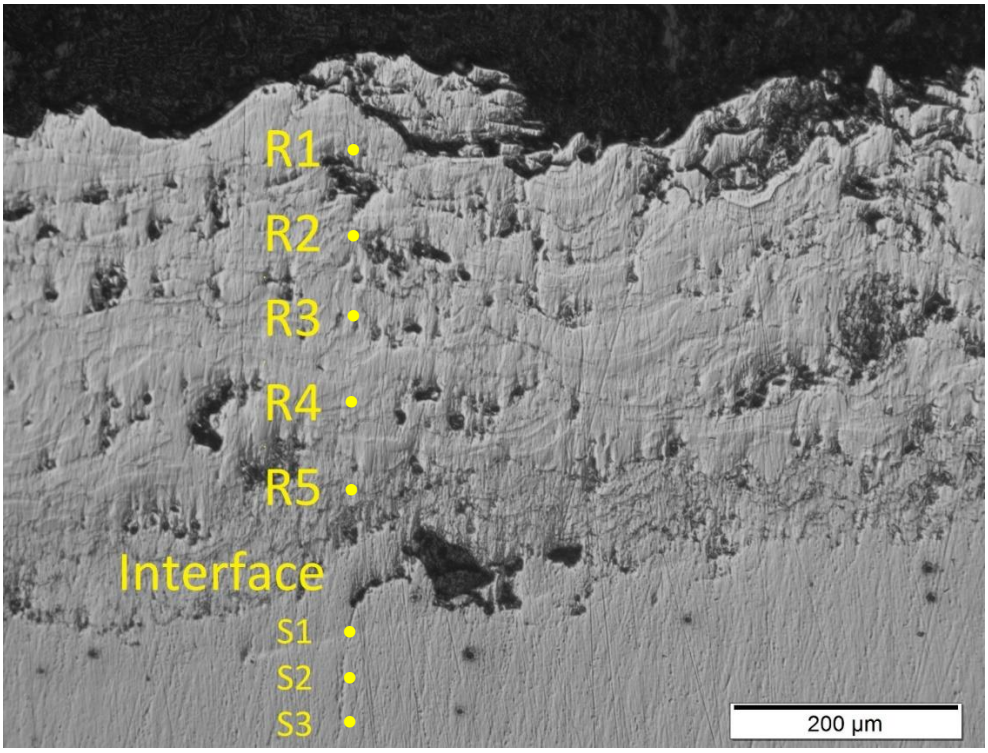


Figura 31: Pontos de medição de microdureza nas amostras metalográficas. (Fonte: Autor)

Foram feitas cinco medições no revestimento partindo da extremidade mais próxima à superfície usinada até a interface com o substrato, denominados R1, R2, R3, R4 e R5 na Figura 31. Foi medido um ponto na interface revestimento-substrato e mais três pontos no substrato, denominados S1, S2 e S3 na Figura 31. Com isso, foi possível traçar um perfil de microdureza.

3 Resultados e Discussão

3.1 Forças de usinagem

Os gráficos de força de usinagem dos quatro experimentos realizados são mostrados na Figura 32, neles estão mostrados apenas as partes consideradas mais homogêneas de todo o processo de usinagem. A Figura 33 apresenta os resultados compilados da média dos quinze picos de cada gráfico de força de usinagem e seus desvios-padrão.

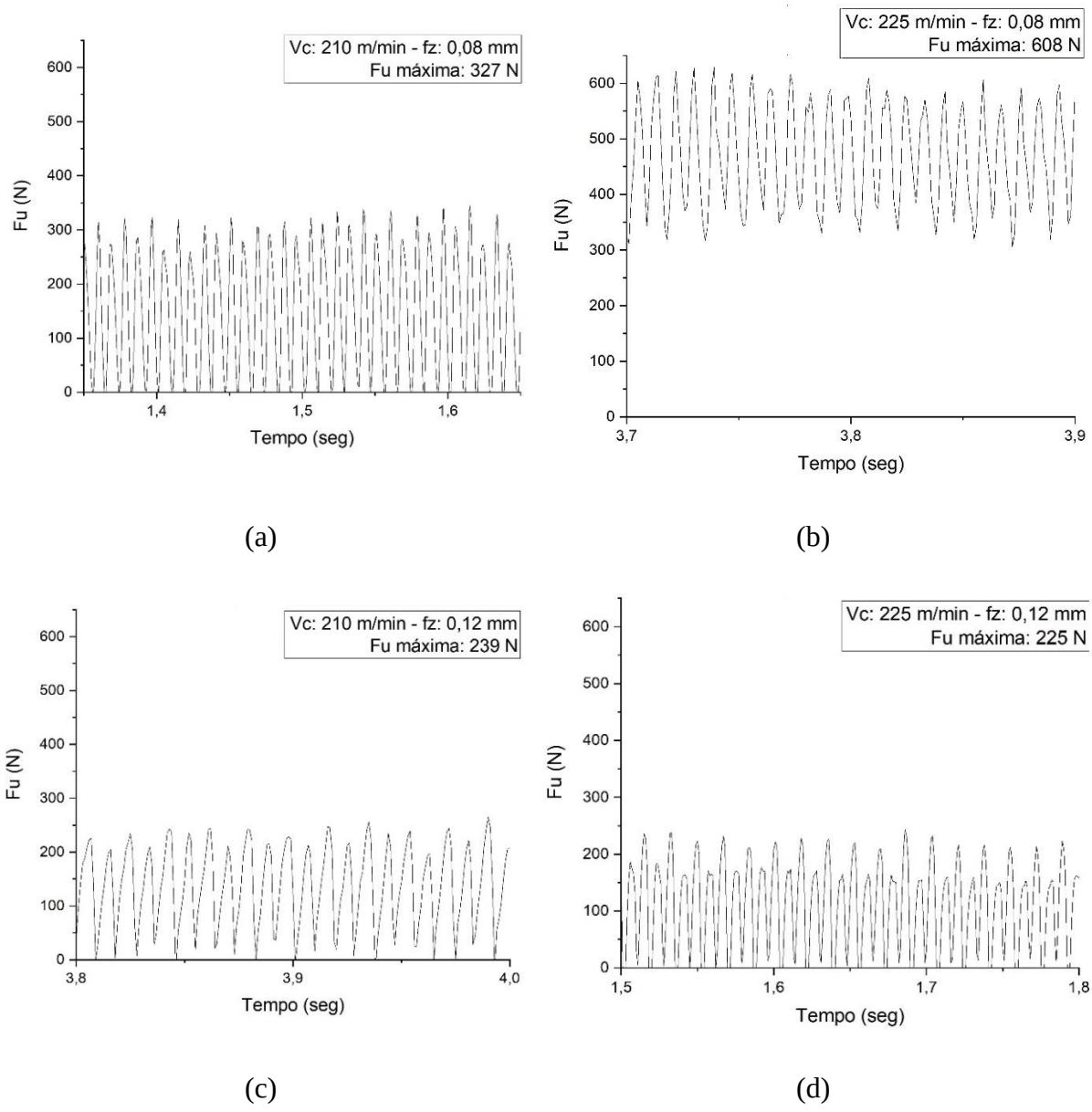


Figura 32: Gráfico de F_u da parte mais homogênea dos quatro experimentos. (Fonte: Autor)

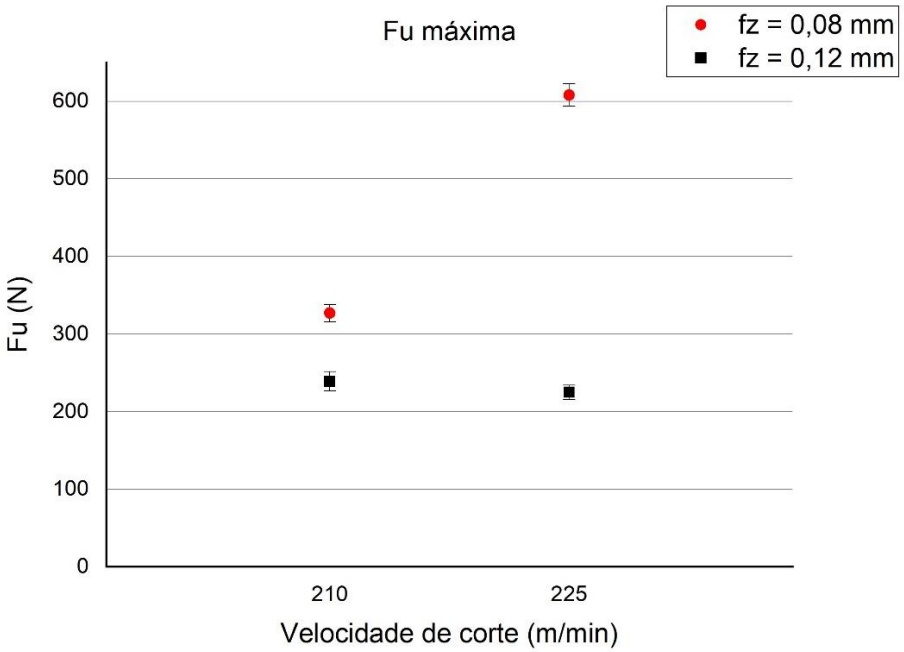


Figura 33: Valores de forças de usinagem máximas dos quatro experimentos. (Fonte: Autor)

Verifica-se que o menor avanço resultou em maiores forças de usinagem nas duas condições comparadas. Essa condição causa maior atrito entre ferramenta e peça e maior tempo de contato. Possivelmente, a refrigeração não eficiente nas condições com maior avanço, resultando em maiores temperaturas, redução de dureza, e consequentemente menor força de usinagem. O aumento de velocidade de corte resultou num grande aumento de força combinado ao avanço de 0,08 mm, e uma pequena redução combinado ao avanço de 0,12 mm.

Segundo a literatura, em materiais de elevada dureza, é esperado uma redução de forças de usinagem ao aumentar a velocidade de corte, devido ao aumento de temperatura no processo de corte. LIU *et al*. (2022), ao fresar Inconel 718 observaram uma redução das forças de usinagem ao aumentar a velocidade de corte de 45 para 60 m/min e de 60 para 75 m/min nas condições com avanço de 0,10 e 0,15 mm/dente. GEORGE *et al*. (2021), ao fresar aços Duplex 2205 e Super Duplex 2507, verificaram reduções entre 3 e 25% nas forças de usinagem ao aumentar a velocidade de corte de 1400 para 2800 e de 2800 para 4200 rpm nas condições com avanços de 50, 100 e 150 mm/min.

Os valores de força de usinagem encontrados no material aspergido deste estudo, entre 225 e 608 N, são similares aos medidos por outros estudos de materiais considerados difíceis de usinar, como Inconel, Duplex e Super Duplex, entre 250 e 622 N.

3.2 Análises da rugosidade

Os valores de rugosidade medidos experimentalmente são apresentados a seguir. A título de comparação, os valores de rugosidade teóricos foram calculados utilizando-se as Equações 5 e 6. Portanto, para as condições com f_z = 0,08 mm: R_a = 0,0010 mm e R_t = 0,0040 mm. E para as condições com f_z = 0,12 mm: R_a = 0,0023 mm e R_t = 0,0090 mm. Inicialmente, são mostrados os valores de R_a médios e desvios padrão de cada um dos quatro experimentos na Figura 34. Além disso, os valores de rugosidade teóricos calculados estão representados em forma de linha nesse gráfico, sendo $R_{at(0,08)}$ o valor de R_a teórico calculado para as condições com avanço de 0,08 mm e $R_{at(0,12)}$ para as condições de 0,12 mm.

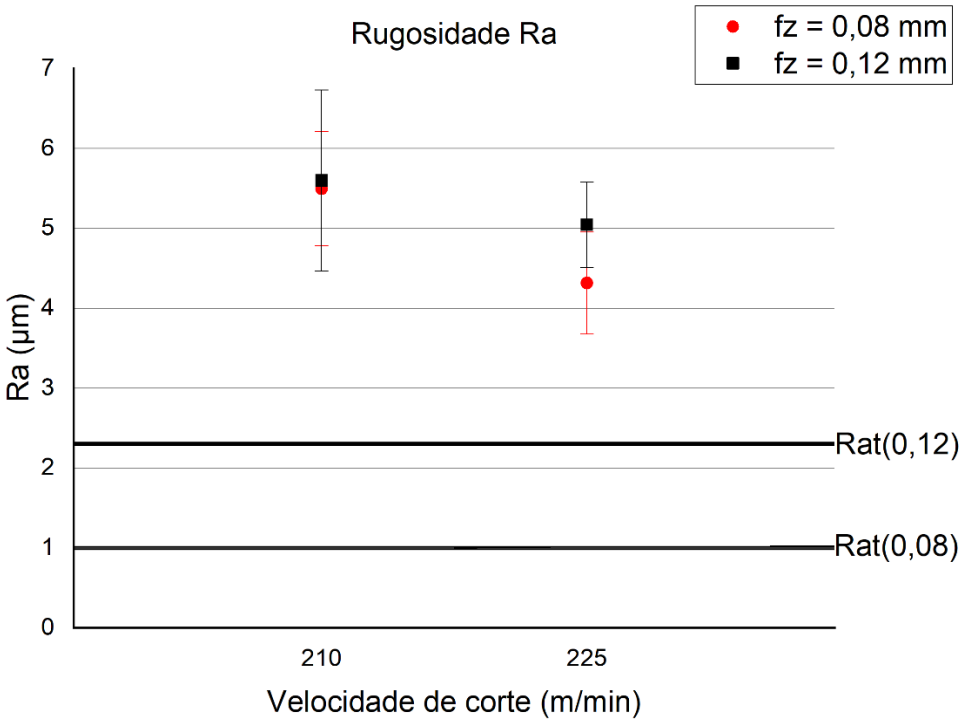


Figura 34: Rugosidade R_a. (Fonte: Autor)

Verifica-se que o aumento da velocidade de corte e a redução do avanço resultaram em menores valores de R_a ao comparar as condições no geral. Os valores absolutos de R_a estão próximos, exceto pela condição de menor avanço e maior velocidade de corte que apresentou a menor rugosidade média e um baixo desvio padrão em comparação aos demais. Esse resultado vai de acordo com o esperado pela literatura, que diz que menores rugosidades são alcançadas

com maiores velocidades de corte e menores avanços (DINIZ *et al*., 2010; MACHADO *et al*., 2009). As Figuras 35, 36 e 37 mostram os valores de R_q, R_z e R_t máximos encontrados em cada condição de usinagem.

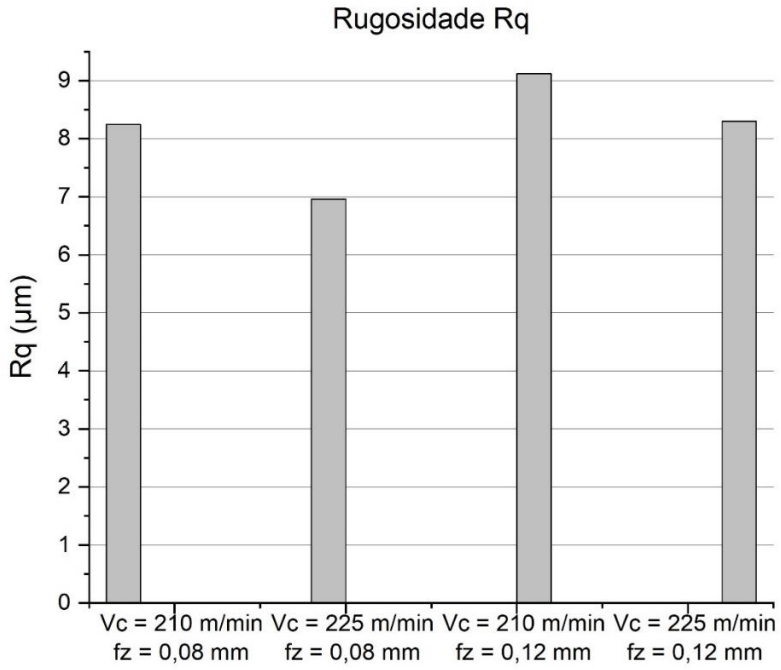


Figura 35: Valores máximos de R_q medidos nos quatro experimentos. (Fonte: Autor)

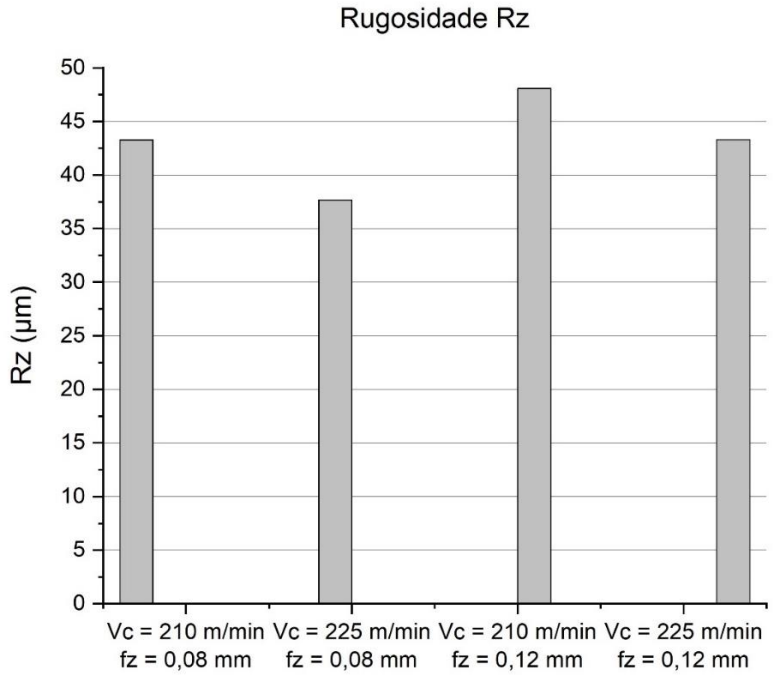


Figura 36: Valores máximos de R_z medidos nos quatro experimentos. (Fonte: Autor)

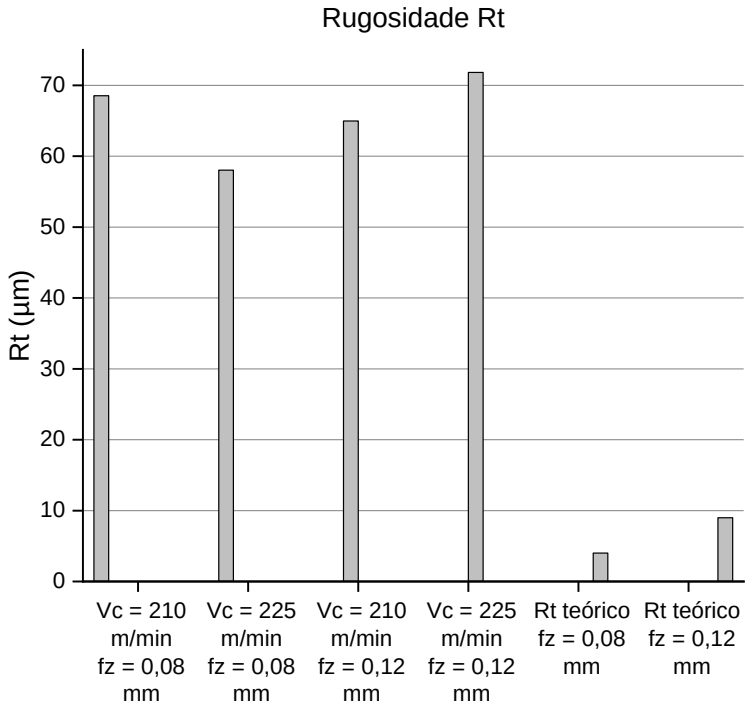


Figura 37: Valores máximos de R_t medidos nos quatro experimentos. (Fonte: Autor)

A condição de usinagem 2 (maior velocidade de corte e menor avanço) também apresentou as menores R_q, R_z e R_t. As condições com maior avanço resultaram em maiores valores de rugosidade no geral, quando comparado nas condições de mesma velocidade de corte. Por outro lado, quanto a velocidade de corte, as condições não apresentaram um padrão de comportamento para R_q, R_z e R_t, já que a mudança de velocidade tanto aumentou quanto reduziu os valores de rugosidade com o mesmo valor de avanço. Os valores teóricos de R_t calculados são bem menores do que os valores encontrados experimentalmente. Portanto, todos os valores de rugosidade medidos experimentalmente ficaram muito maiores que os teóricos. Esse resultado mostra que a usinabilidade do material quanto a rugosidade é baixa, já que todos os valores de rugosidade medidos são muito maiores do que o esperado ou os encontrados em materiais aspergidos em outros estudos. Também é necessário considerar que o revestimento aspergido por apresentar grande heterogeneidade, com a presença de poros, deve apresentar valores de rugosidade maiores do que esperado em materiais homogêneos.

GRUND *et al*. (2020) avaliaram a influência da velocidade de corte no torneamento do revestimento aspergido de FeCr17Ni2C0.2 entre 100 e 400 m/min com avanço constante. Em todas as condições estudadas, os valores de R_a medidos ficaram abaixo de 0,5 µm, e os de R_z abaixo de 5 µm. LIBORIUS *et al*. (2019) avaliaram a influência do avanço sobre a integridade

superficial no torneamento do revestimento aspergido de FeCr17Ni2C0.2, e encontraram valores de R_a abaixo de 1,5 µm, e de R_z abaixo de 7 µm.

3.3 Dureza superficial

Os valores de dureza superficial medidos são mostrados na Figura 38, que apresenta os a média das cinco medições feitas em cada uma das quatro superfícies usinadas e seus desvios-padrão.

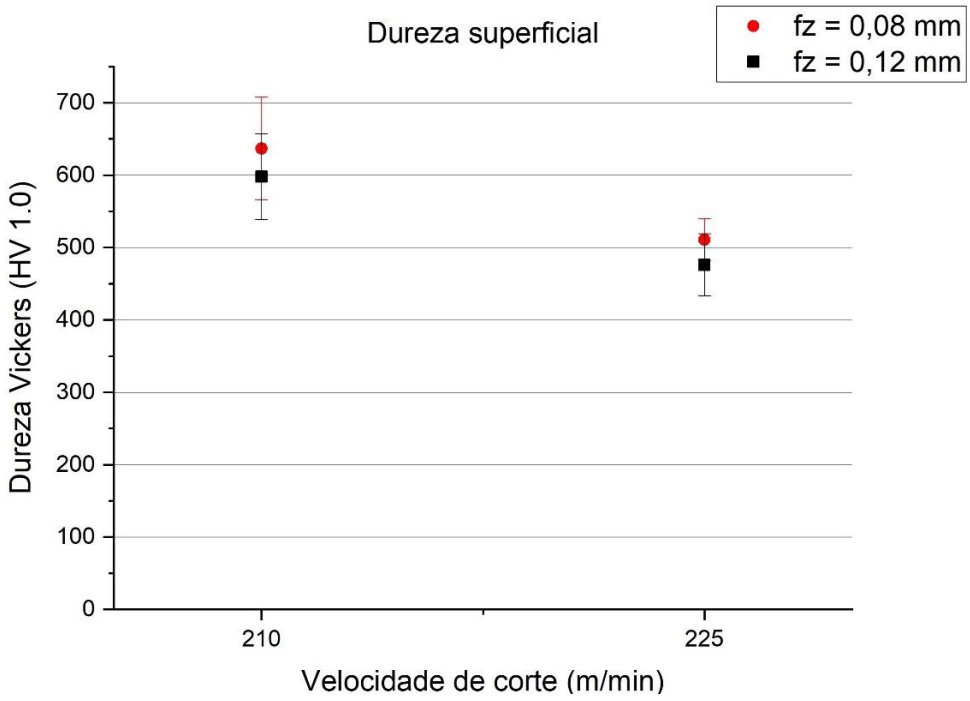


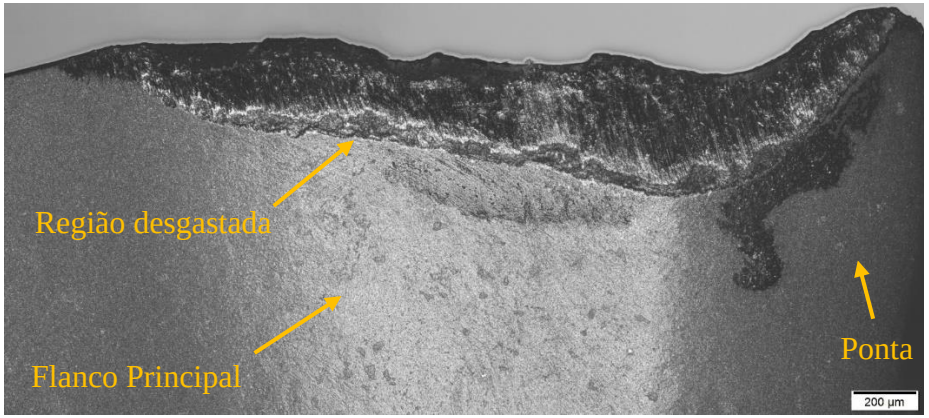
Figura 38: Dureza superficial medida nas quatro superfícies usinadas. (Fonte: Autor)

Verifica-se que o aumento de velocidade de corte e o aumento no avanço resultaram na redução da dureza superficial. Tais aumentos provavelmente causaram maiores temperaturas na zona de corte, o que originou a redução da dureza superficial. Esse comportamento é esperado de acordo com a literatura, até mesmo em materiais de elevada dureza. ŞIRIN *et al.* (2021) mediram a temperatura na zona de corte ao fresar liga de níquel X-750, e verificaram que houve um aumento de temperatura conforme aumentaram a velocidade de corte e avanço. Menor avanço e menor velocidade de corte podem ter deixado a lubrirrefrigeração mais

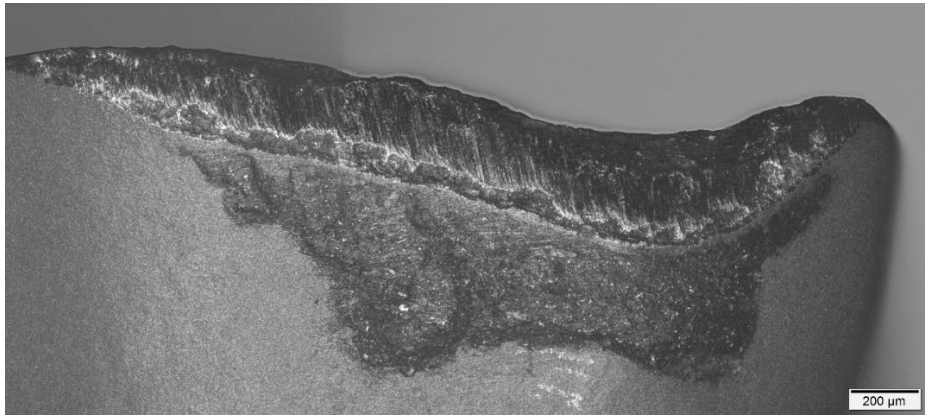
eficiente, fazendo com que a temperatura na zona de corte fosse menor do que com maiores avanços e velocidades de corte, assim, a redução de dureza foi menor.

3.4 Desgaste de ferramenta

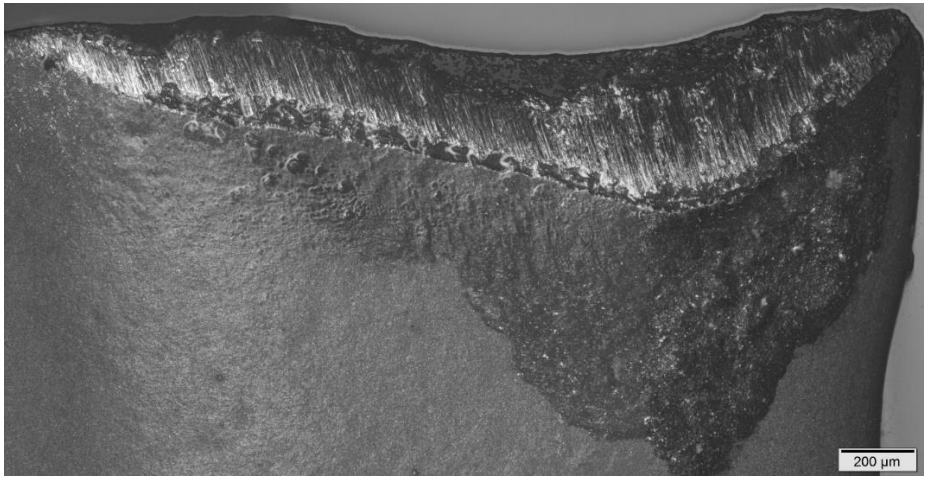
As Figuras 39, 40 e 41 apresentam os desgastes das ferramentas de corte utilizadas nos quatro experimentos vistos no microscópio ótico. Onde (a) corresponde a condição 1, com v_c = 210 m/min e f_z = 0,08 mm; (b) corresponde a condição 2, com v_c = 225 m/min e f_z = 0,08 mm; (c) corresponde a condição 3 com v_c = 210 m/min e f_z = 0,12 mm; e (d) corresponde a condição 4 com v_c = 225 m/min e f_z = 0,12 mm. A Figura 39 mostra o desgaste de ponta com aumento de 100x. A Figura 40 exibe o desgaste da superfície de saída com aumento de 100x. E a Figura 41 apresenta a superfície de saída com aumento de 50x e uma imagem tratada com a junção da imagem de uma ferramenta nova, sem desgaste. Dessa maneira, é possível ter uma noção do desgaste total da ferramenta.



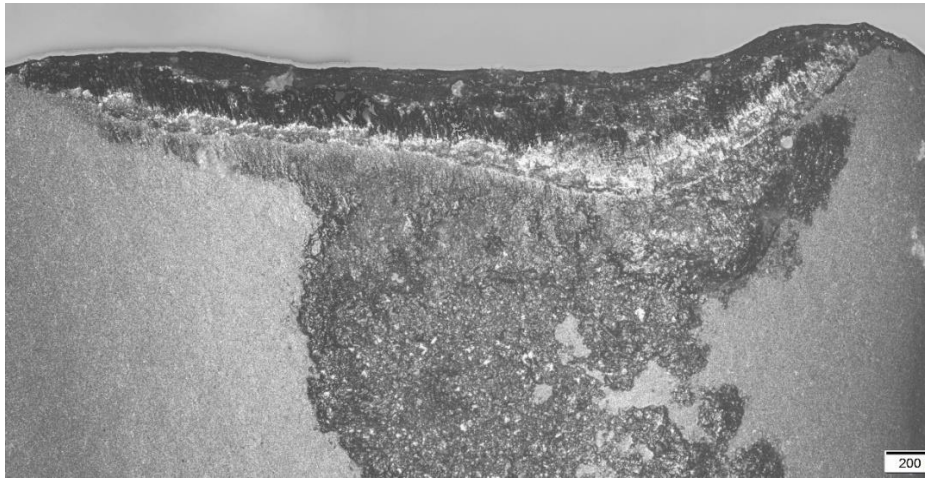
(a) v_c = 210 m/min e f_z = 0,08 mm



(b) v_c = 225 m/min e f_z = 0,08 mm

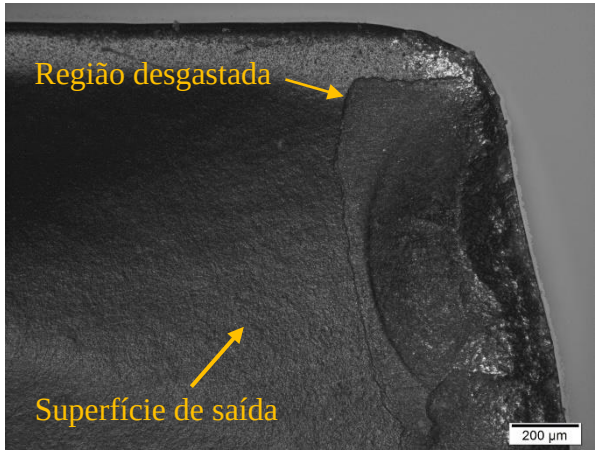


(c) v_c = 210 m/min e f_z = 0,12 mm

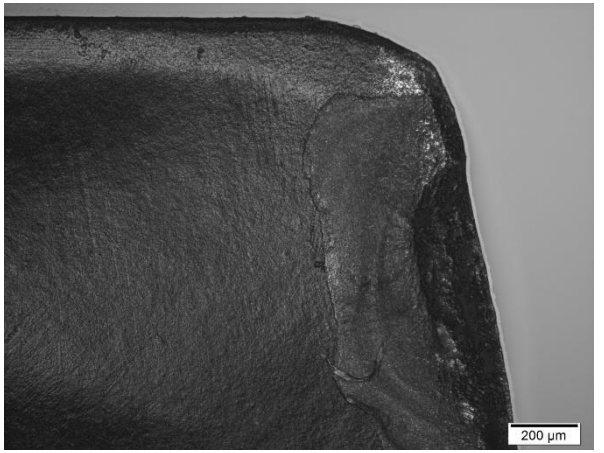


(d) v_c = 225 m/min e f_z = 0,12 mm

Figura 39: Desgaste de ponta das ferramentas de corte utilizadas nos quatro experimentos com aumento de 100x. (Fonte: Autor)



(a) v_c = 210 m/min e f_z = 0,08 mm



(b) v_c = 225 m/min e f_z = 0,08 mm

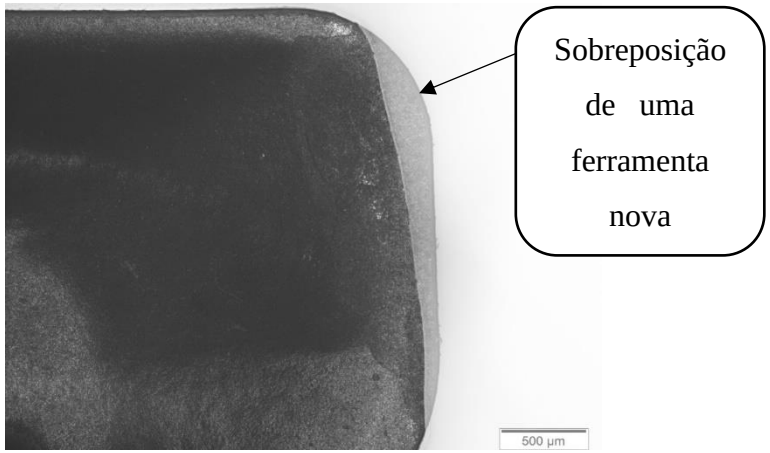


(c) v_c = 210 m/min e f_z = 0,12 mm

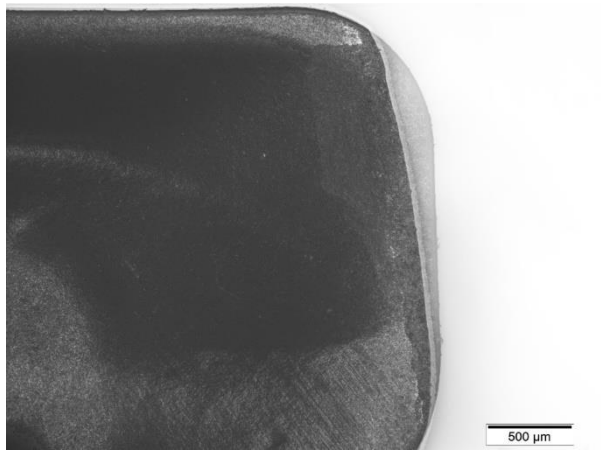


(d) v_c = 225 m/min e f_z = 0,12 mm

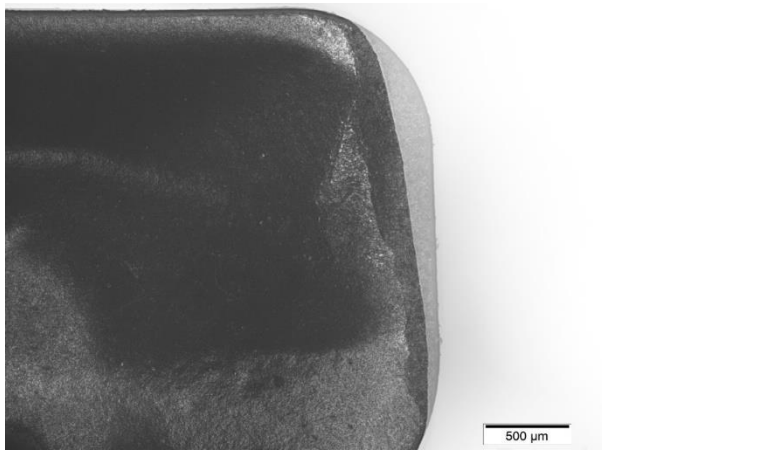
Figura 40: Desgaste da superfície de saída das ferramentas de corte utilizadas nos quatro experimentos com aumento de 100x. (Fonte: Autor)



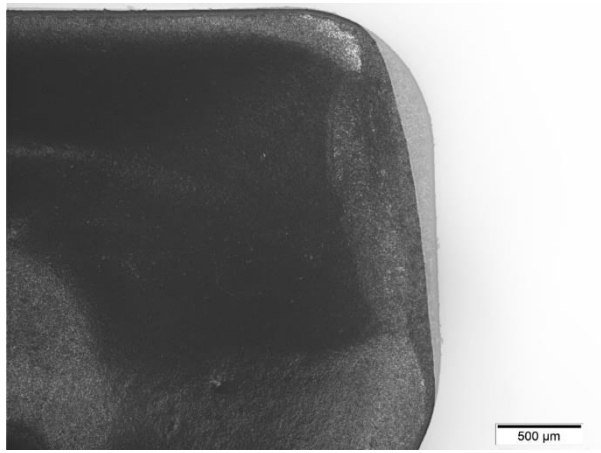
(a) v_c = 210 m/min e f_z = 0,08 mm



(b) v_c = 225 m/min e f_z = 0,08 mm



(c) v_c = 210 m/min e f_z = 0,12 mm



(d) v_c = 225 m/min e f_z = 0,12 mm

Figura 41: Desgaste da superfície de saída das ferramentas de corte utilizadas nos quatro experimentos com aumento de 50x. (Fonte: Autor)

A partir da análise das imagens, verifica-se que as ferramentas apresentaram grande desgaste de maneira geral. A Tabela 5 apresenta os valores de desgaste compilados e a Figura 42 apresenta esses valores de forma gráfica com os critérios de fim de vida normalmente utilizados VB_{Bmax} = 0,6 mm e KT = 0,06 + 0,3f, onde KT = 0,084 mm nas condições com avanço de 0,08 mm (1 e 2) e KT = 0,096 mm nas condições com avanço 0,12 mm (3 e 4).

Tabela 5: Valores de desgaste VB_{Bmax} e KT. (Fonte: Autor)

Experimento	VB_{Bmax} (mm)	KT (mm)
1	0,646	0,180
2	0,561	0,124
3	0,608	0,101
4	0,517	0,098

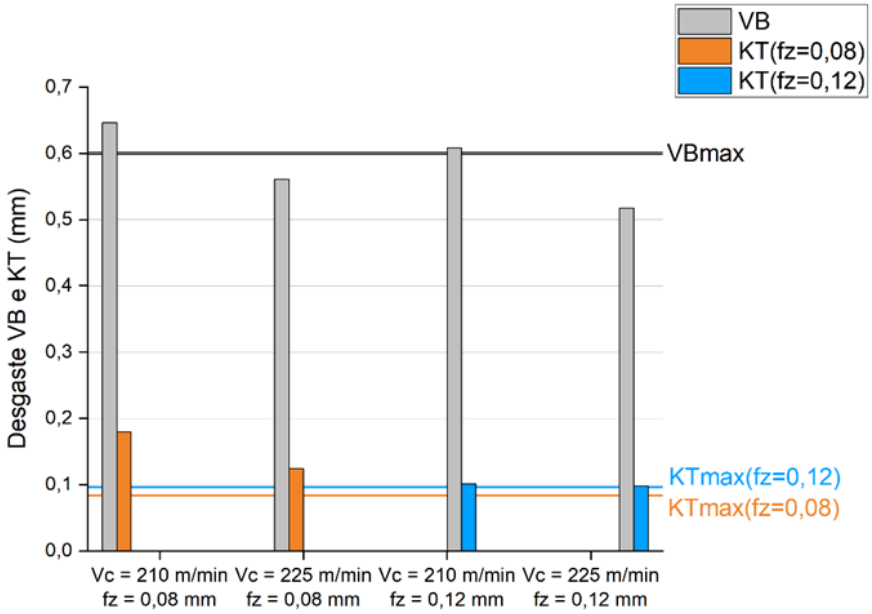


Figura 42: Valores de VB_{Bmax} e KT medidos nas ferramentas de corte. (Fonte: Autor)

Destaca-se a condição 1 (menor velocidade de corte e menor avanço) que apresentou os maiores desgastes de ponta e cratera. As condições 1 e 3 (as de menor velocidade de corte) apresentaram maiores desgastes de flanco em comparação às condições de maior velocidade de

corte. Em relação ao avanço, as condições com menor avanço apresentaram maior desgaste de cratera. Tomando como referência os critérios de fim de vida da ferramenta mais utilizados, todas as condições apresentaram desgaste de flanco máximo próximo ou atingiram o critério fim de vida utilizado normalmente, VB_{Bmax} = 0,6 mm e ultrapassaram o critério quanto ao desgaste de cratera.

Menores velocidades e menores avanços acarretam maior tempo de contato entre ferramenta e peça, possivelmente esse foi o motivo do maior desgaste nessas condições, principalmente na condição 1. As condições de menor velocidade de corte também apresentaram os maiores valores de dureza superficial, o que também justifica o maior desgaste. A condição 4 (maior velocidade de corte e maior avanço) apresentou o menor desgaste de cratera, enquanto a condição 2 (maior velocidade de corte e menor avanço) apresentou o menor desgaste de ponta. Isso também justifica a menor rugosidade medida nessa condição.

Esses resultados estão opostos a estudos que avaliaram o desgaste de ferramenta na usinagem de materiais difíceis de usinar. GUELI *et al*. (2021), ao fresar Inconel 718 com ferramenta de carbeto, encontraram maiores desgastes na medida que o avanço era aumentado nas condições com fluido de corte. LIBORIUS *et al*. (2019) ao tornear revestimento aspergido de FE17CR2NI0.2C com ferramenta de CBN (Nitreto de Boro Cúbico) perceberam um aumento no desgaste na medida que o avanço era aumentado. Nesses dois estudos, a velocidade de corte foi mantida constante em todos os experimentos.

A fim de se entender melhor como se deram os desgastes de ferramenta, foram feitas análises de MEV. A Figura 43 mostra a imagem da ponta da ferramenta utilizada no experimento 1, em destaque as regiões onde foram obtidas as Figuras 44 e 45, que apresentam melhores detalhes dos tipos de desgastes.

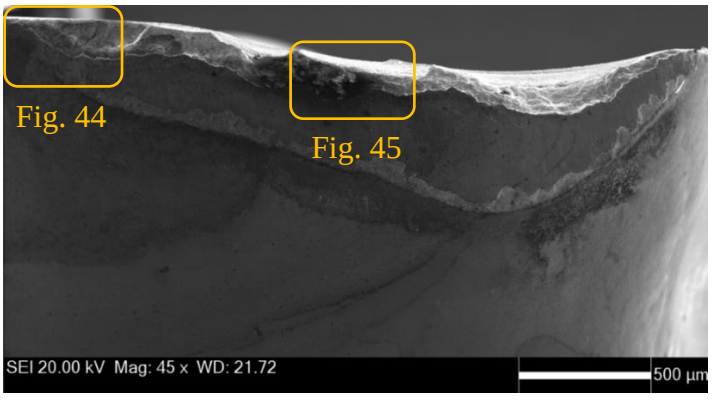


Figura 43: Imagem da ponta da ferramenta usada no experimento 1. MEV (Fonte: Autor)

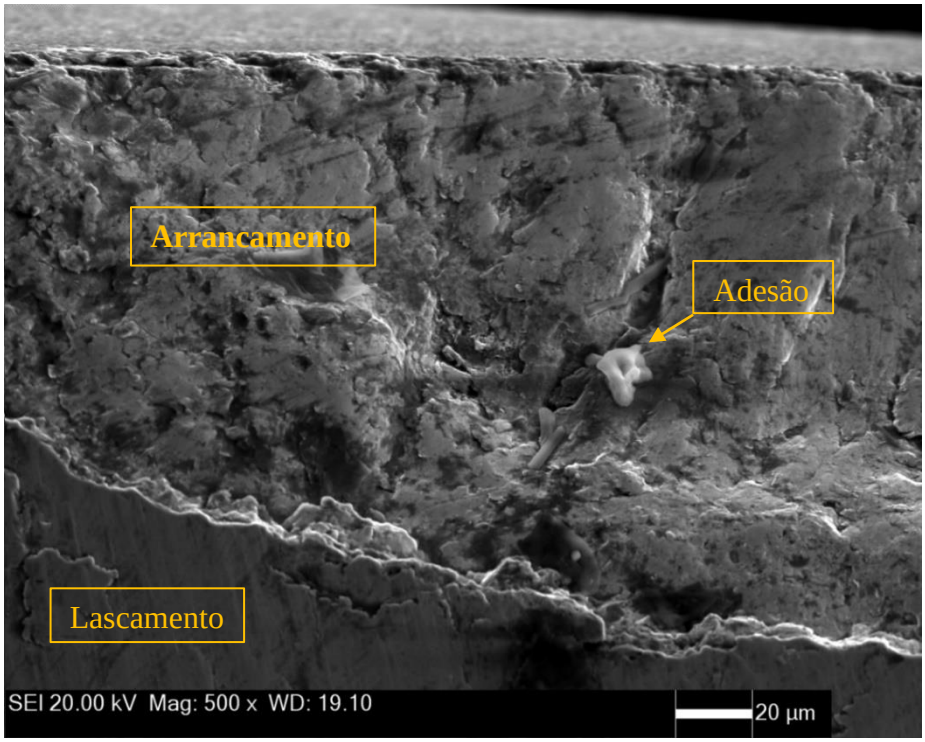


Figura 44: Tipos de desgastes encontrados na ferramenta utilizada no experimento 1. MEV (Fonte: Autor)

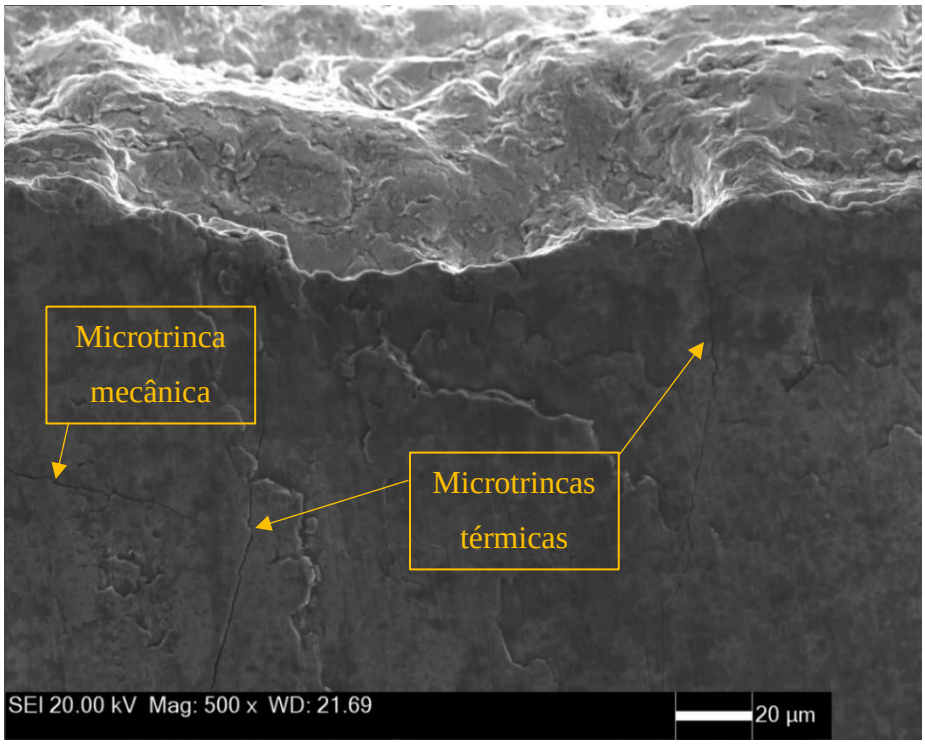


Figura 45: Trincas vistas na ferramenta utilizada no experimento 1. MEV (Fonte: Autor)

As Figuras 43, 44 e 45 mostram que houve grande desgaste abrasivo, com uma região apresentando características de arrancamento (parte superior das imagens) e uma região abaixo apresentando lascamentos. Também é possível ver microtrincas ao longo da ferramenta, algumas com características de trincas térmicas e outras com características mecânicas, inclusive com interação entre elas. As Figuras 46, 47 e 48 apresentam o desgaste da ferramenta utilizada no experimento 2.

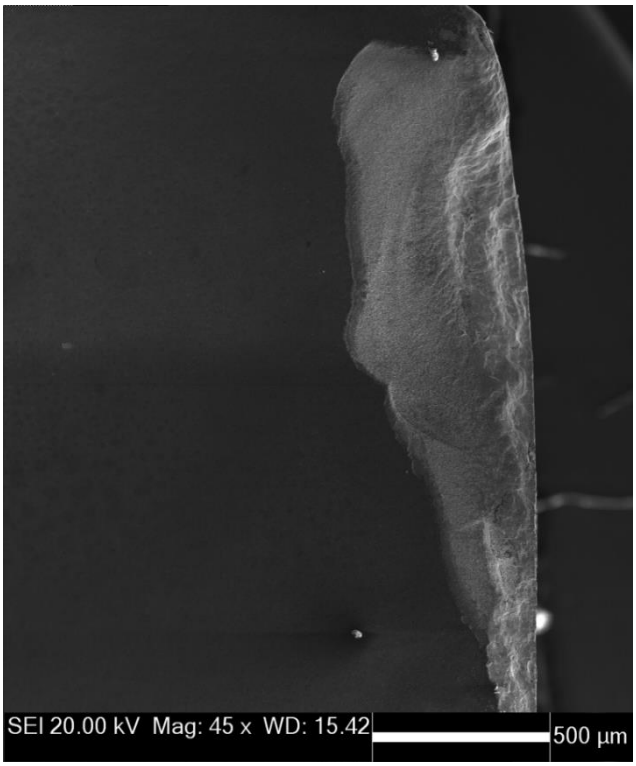


Figura 46: Superfície de saída da ferramenta utilizada no experimento 2. MEV (Fonte: autor)

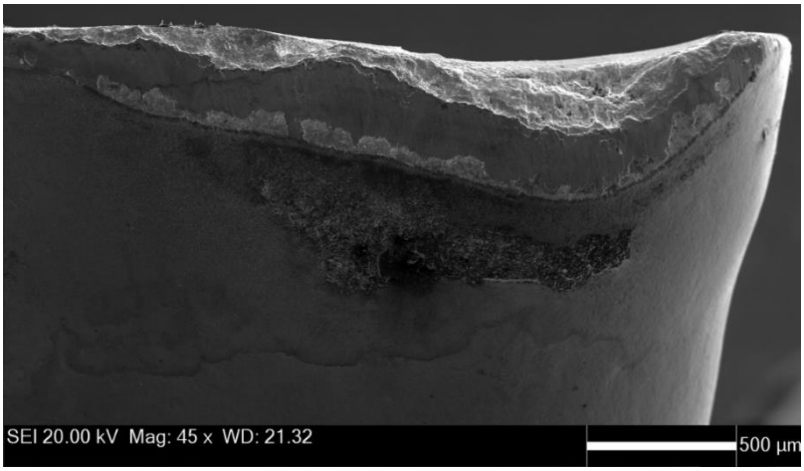


Figura 47: Ponta da ferramenta utilizada no experimento 2. MEV (Fonte: autor)

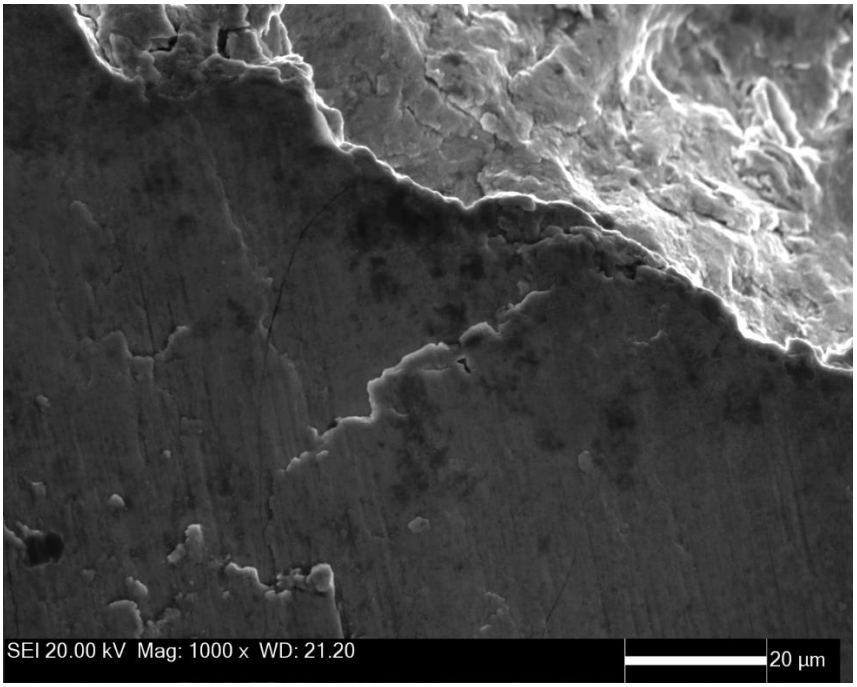


Figura 48: Tipos de desgastes vistos na ferramenta utilizada no experimento 2. MEV (Fonte: autor)

Mais uma vez a ferramenta apresentou grande desgaste abrasivo com a presença de uma região com características de arrancamento e outra com característica de lascamento. Também é possível ver a presença de trincas.

As Figuras 49 e 50 mostram o desgaste da ferramenta utilizada no experimento 3. Essa ferramenta apresentou as mesmas características de desgaste das anteriores. Grande desgaste abrasivo com presença de arrancamento e lascamento. Há também a presença de trincas e de adesão de material da peça usinada.

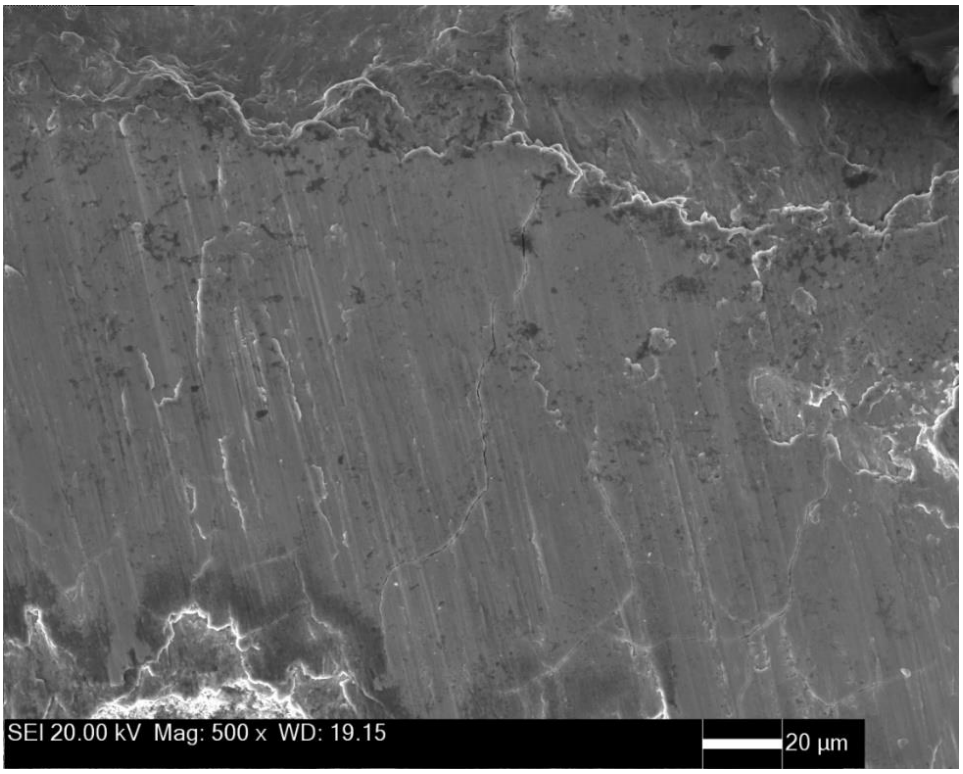


Figura 49: Desgaste da ponta da ferramenta utilizada no experimento 3. MEV (Fonte: Autor)

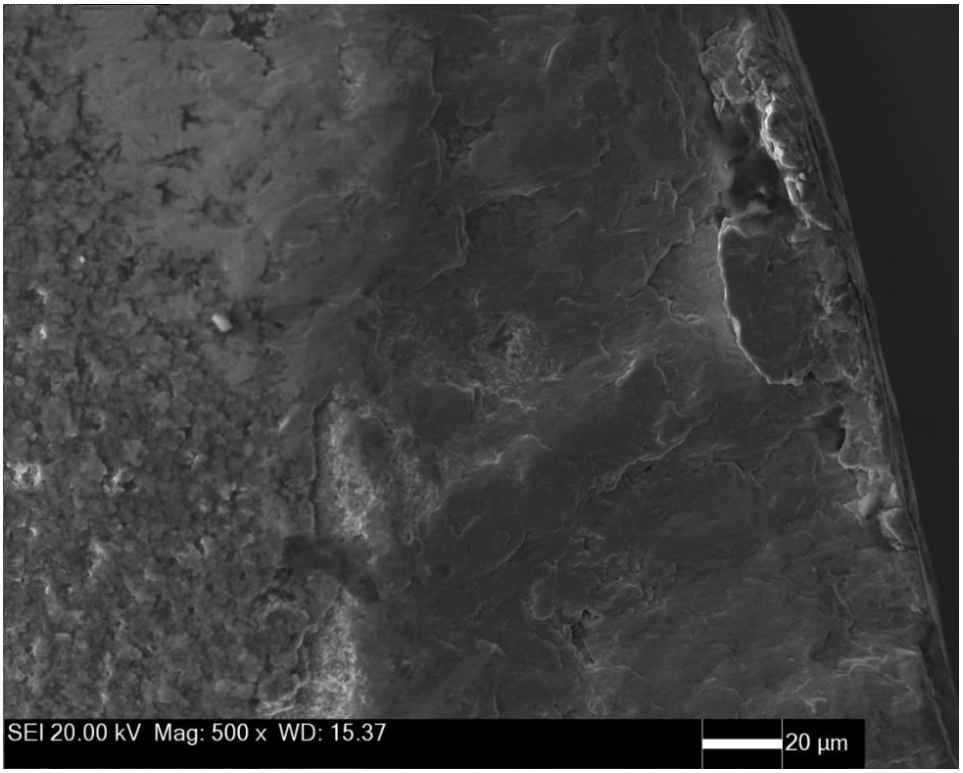


Figura 50: Desgaste da superfície de saída da ferramenta utilizada no experimento 3. MEV (Fonte: Autor)

As Figuras 51, 52 e 53 apresentam as imagens da ferramenta utilizada no experimento 4. Os desgastes vistos são similares aos vistos nas ferramentas anteriores. Entretanto, essa condição foi a que mais apresentou adesão de material.

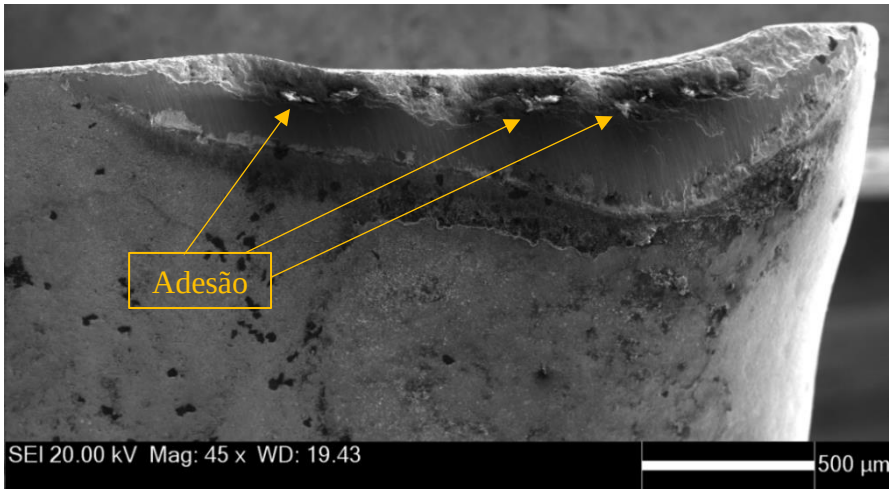


Figura 51: Desgaste da ponta da ferramenta utilizada no experimento 4. MEV (Fonte: Autor)

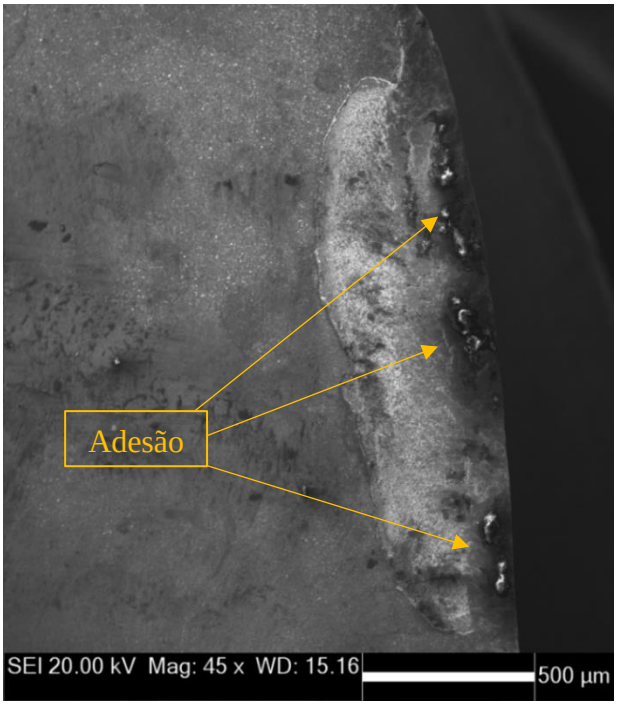


Figura 52: Desgaste da superfície de saída da ferramenta utilizada no experimento 4. MEV (Fonte: Autor)

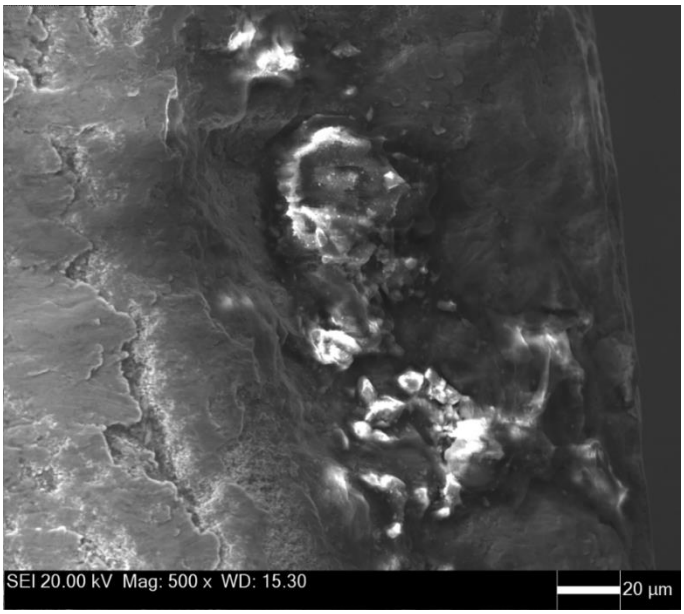


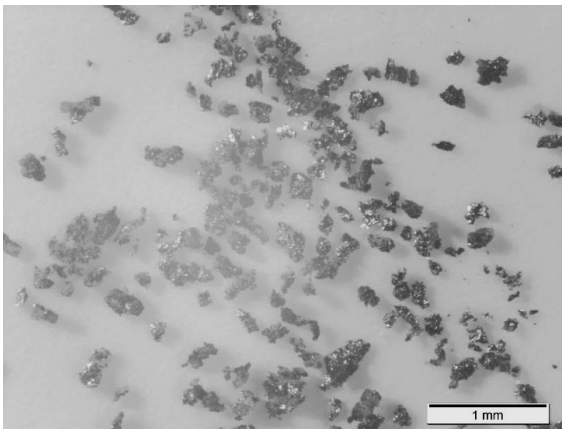
Figura 53: Adesão de material vista na superfície de saída da ferramenta utilizada no experimento 4. MEV (Fonte: Autor)

As imagens das ferramentas feitas no MEV mostraram que todas as condições apresentaram desgastes com características similares. No geral, o desgaste das ferramentas foi abrasivo com uma parte apresentando arrancamento e outra parte com lascamento. Tais características apontam a severidade do processo para a ferramenta de corte. Considerando que o comprimento usinado total foi de 140 mm e que o desgaste de todas as ferramentas atingiu algum dos critérios de fim de vida normalmente utilizados, o material do revestimento aspergido se mostra de baixa usinabilidade do ponto de vista da vida da ferramenta.

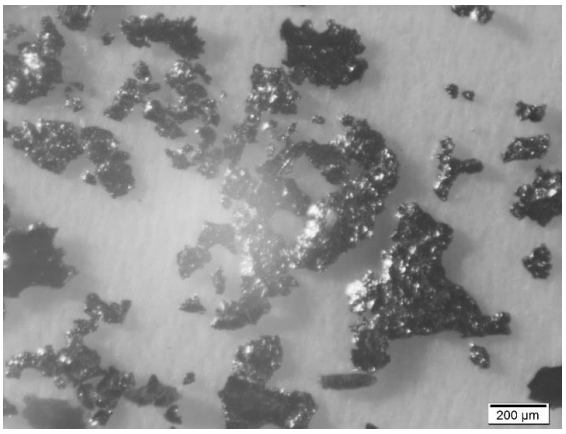
3.5 Geometria dos cavacos

Os cavacos gerados foram colhidos e analisados, eles não tiveram uma geometria definida. Aparentemente, o revestimento aspergido foi cisalhado e saiu fragmentado, isso ocorreu em todas as condições de usinagem. Muitos cavacos não apresentam uma superfície com característica de corte, é possível que eles tenham sido arrancados e não cisalhados. Essas características se deram nos cavacos de todos os experimentos. A Figura 54 apresenta imagens

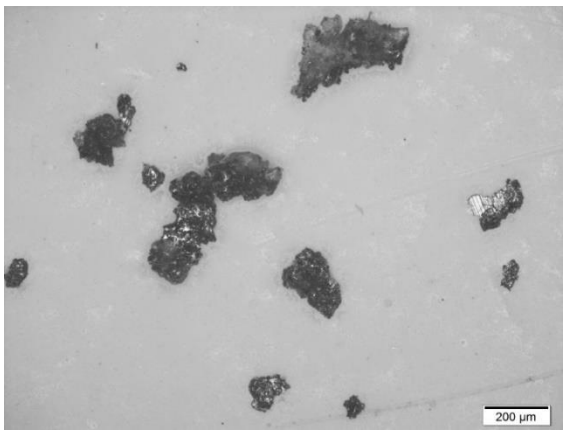
dos cavacos obtidas com estereomicroscópio com aumentos de 16x e 40x, itens (a) e (b), e com microscópio, com aumento de 100x, item (c).



(a)



(b)



(c)

Figura 54: Imagem dos cavacos gerados durante os processos de usinagem. (Fonte: Autor)

3.6 Amostra metalográfica e Microdureza

A partir das duas amostras metalográficas, foi possível traçar um perfil de microdureza do revestimento e fazer imagens do revestimento em cada uma das condições de usinagem. Os valores de microdureza do revestimento medidos são mostrados na Figura 55.

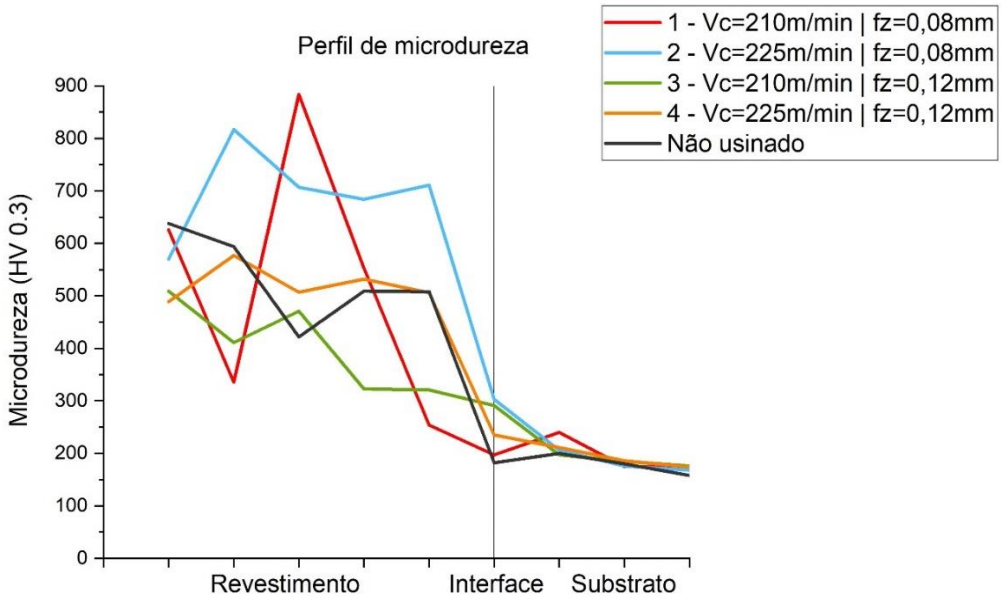


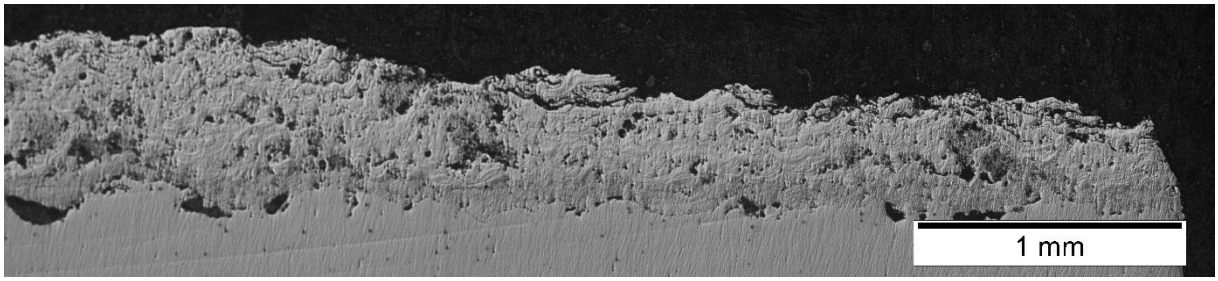
Figura 55: Perfil de microdureza na amostra metalográfica. (Fonte: Autor)

Verifica-se que a condição de usinagem 2 (maior velocidade de corte e menor avanço) apresentou maiores valores no perfil de microdureza no geral. Tal condição causou deformações plásticas que elevaram a dureza no revestimento. Isso explica o motivo de as forças de usinagem serem consideravelmente maiores nessa condição.

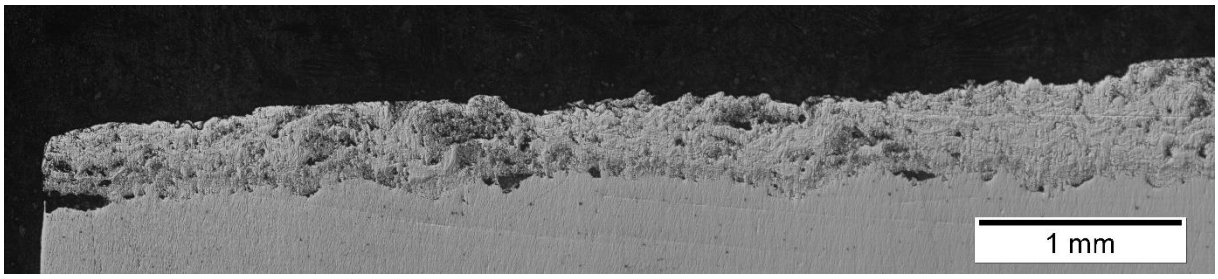
É possível ver a heterogeneidade do revestimento aspergido também pelo perfil de microdureza, nenhum dos perfis apresentou uma tendência clara. Todos apresentaram variações consideráveis, destaca-se a condição de usinagem 1 que teve uma dureza mínima de 254 HV e máxima de 884 HV. Provavelmente a maior dureza foi medida numa partícula dura como um óxido. Somente os pontos do substrato tiveram tendência definida e se aproximaram dos valores normais para o material encontrado na literatura (FREITAS *et al.*, 2016). Também é possível afirmar que substrato não sofreu algum tipo de transformação como uma zona termicamente afetada ou se mistura de alguma forma com o revestimento. KUTSCHMANN *et al.* (2021) traçaram um perfil de microdureza do revestimento aspergido de aço 17Cr e encontraram

valores mínimos de microdureza próximos a 300 HV0.3 e máximos por volta de 500 HV0.3 e perfis de microduzera similares ao deste estudo.

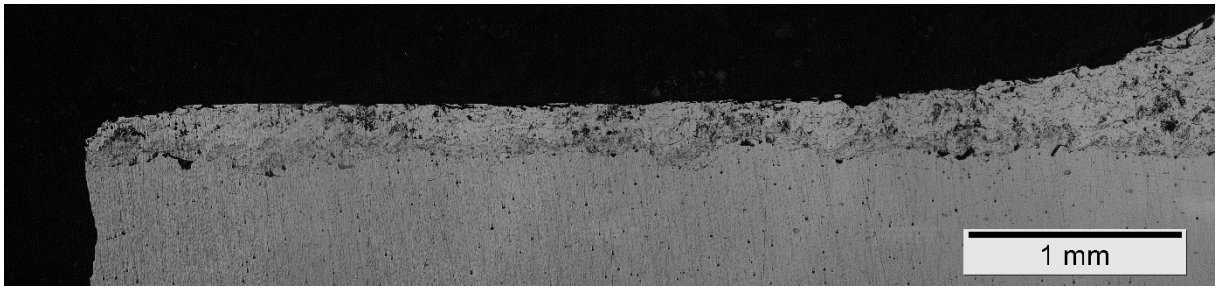
A Figura 56 mostra os perfis de microestrutura do revestimento aspergido de cada condição de usinagem com aumento de 100x. A Figura 57 apresenta uma região do perfil com maiores detalhes com aumento de 200x. Em ambos figuras, (a) corresponde a condição 1, com v_c = 210 m/min e f_z = 0,08 mm; (b) corresponde a condição 2, com v_c = 225 m/min e f_z = 0,08 mm; (c) corresponde a condição 3 com v_c = 210 m/min e f_z = 0,12 mm; e (d) corresponde a condição 4 com v_c = 225 m/min e f_z = 0,12 mm.



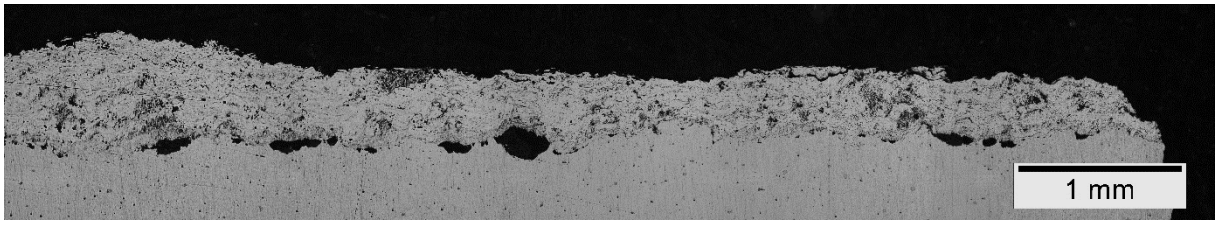
(a) v_c = 210 m/min e f_z = 0,08 mm



(b) v_c = 225 m/min e f_z = 0,08 mm

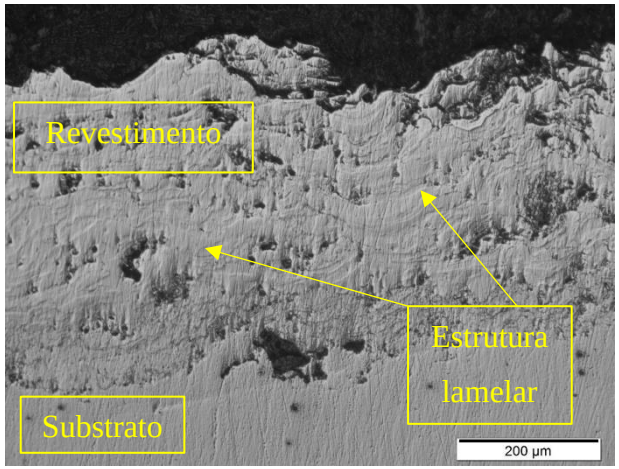


(c) v_c = 210 m/min e f_z = 0,12 mm

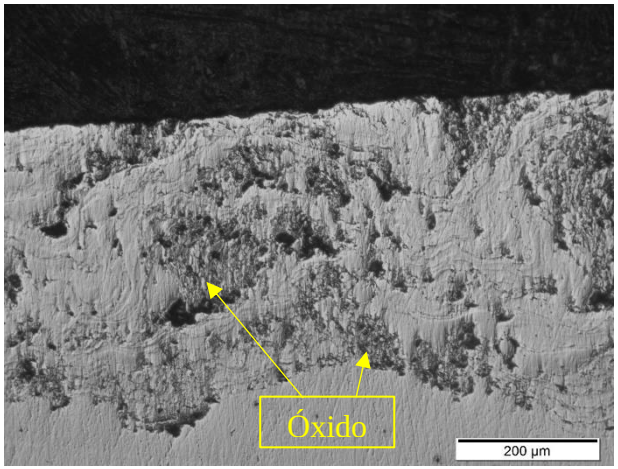


(d) v_c = 225 m/min e f_z = 0,12 mm

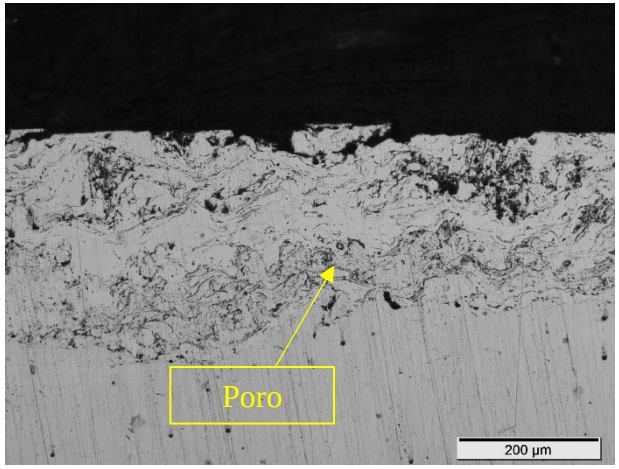
Figura 56: Perfis do revestimento de cada condição de usinagem com aumento de 100x. (Fonte: Autor)



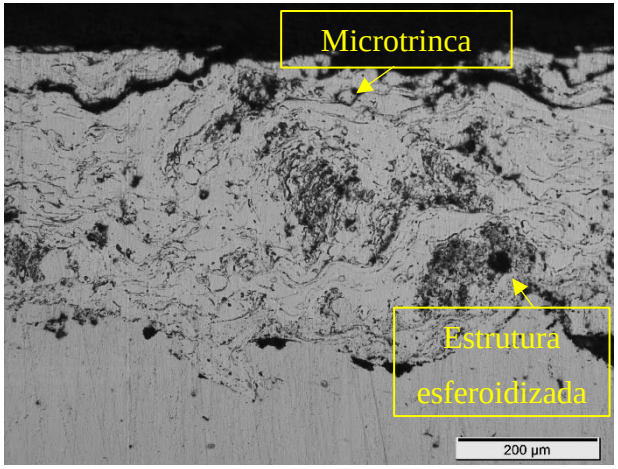
(a) v_c = 210 m/min e f_z = 0,08 mm



(b) v_c = 225 m/min e f_z = 0,08 mm



(c) v_c = 210 m/min e f_z = 0,12 mm



(d) v_c = 225 m/min e f_z = 0,12 mm

Figura 57: Detalhes do revestimento em cada uma das condições de usinagem com aumento de 200x. (Fonte: Autor)

Verifica-se que o revestimento no geral apresentou uma microestrutura lamelar bem definida e uniforme. É possível ver a presença de óxidos e poros, algumas microtrincas entre as lamelas e estruturas esferoidizadas, que são o material que não fundiu durante o processo de aspersão térmica. Essas características estão de acordo com o esperado para um revestimento aspergido. ZHAO *et al*. (2022) encontraram estruturas similares ao analisar um revestimento aspergido por arco elétrico de Al-Ta. Da mesma forma, PAN *et al*. (2022) observaram estruturas parecidas num revestimento aspergido de liga metálica $Fe_{54}Mo_9Cr_{15}C_6P_2Si_2B_3W_9$.

4 Conclusões

Este estudo teve como objetivo avaliar os efeitos da variação dos parâmetros de corte, velocidade de corte e avanço por dente, sobre o processo de usinagem e integridade superficial no fresamento de topo de revestimento aspergido. A partir dos resultados obtidos, é possível chegar às seguintes conclusões:

1) A maior velocidade de corte estudada (225 m/min) resultou em menores durezas superficiais, menores rugosidades e menores desgastes de ferramenta;
2) O menor avanço por dente estudado (0,08 mm) resultou em maiores forças de usinagem, maiores durezas superficiais e menores valores de rugosidade no geral;
3) Destacam-se os parâmetros do experimento 2 (maior velocidade de corte e menor avanço), que resultaram no menor desgaste de ponta e, consequentemente na menor rugosidade. Por outro lado, as forças de usinagem foram consideravelmente maiores, chegando a ser mais que o dobro das forças medidas nos demais experimentos. Isso se deu ao fato de essa condição de usinagem causar deformações subsuperficiais que elevaram a microdureza no revestimento. Portanto, esses parâmetros se mostraram os mais adequados dentre os estudados, devendo-se ter atenção quanto a resistência da ferramenta de corte e a rigidez da máquina operatriz, devido às grandes forças de usinagem;
4) Do ponto de vista da vida da ferramenta, o revestimento aspergido se mostrou de baixa usinabilidade, por causar um grande desgaste de ferramenta com um pequeno comprimento usinado (140 mm), chegando ao fim da vida da ferramenta;
5) O revestimento aspergido, devidos às suas características intrínsecas de heterogeneidade, como óxidos e poros, também se mostra de baixa usinabilidade do ponto de vista da integridade superficial, resultando em valores de rugosidade maiores do que em outros tipos de materiais de mesma faixa de dureza e superiores aos esperados de forma teórica;
6) Por fim, pode-se concluir que, considerando a qualidade do acabamento superficial obtido e o desgaste de ferramenta visto, o fresamento não se mostrou uma boa alternativa aos processos de usinagem normalmente feitos, como a retificação, em revestimentos aspergidos.

5 Sugestões de trabalhos futuros

Como sugestões para trabalhos futuros, pode-se considerar:

- Avaliar a usinagem do revestimento aspergido por fresamento em amostras com e sem selante;

- Avaliar a usinagem do revestimento aspergido por fresamento com valores de velocidade de corte e avanço por dente menores e maiores aos estudados. Além de usinar um número maior de amostras para se ter melhores dados estatísticos;

- Avaliar a usinagem do revestimento aspergido por fresamento com ferramentas de materiais diferentes aos utilizados.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ARAUJO, A. C.; MOUGO, A. L.; CAMPOS, F. de O. **Usinagem para Engenharia: Um curso de mecânica do corte**. Rio de Janeiro: [*s. n.*], 2020. 2020.

BRITO, V. R. dos S. de S. **Caracterização de Revestimentos Metálicos Aspergidos Termicamente por Arco Elétrico**. Dissertação de Mestrado. 2010. 120 f. - CEFET/RJ, [*s. l.*], 2010.

CAMPOS, Y. de P. R. de; SOUSA, T. A. de; FERNANDES, R. S. Estudo Do Módulo De Weibull Aplicado Em Dados De Ensaio De Microdureza Em Cerâmica De Al2O3. **Brazilian Journal of Development**, [*s. l.*], v. 6, n. 9, p. 73840–73852, 2020.

DARUT, G.; DIEU, S.; SCHNURIGER, B.; VIGNES, A.; MORGENEYER, M.; LEZZIER, F.; DEVESTEL, F.; VION, A.; BERGUERY, C.; ROQUETTE, J.; LE BIHAN, O. State of the art of particle emissions in thermal spraying and other high energy processes based on metal powders. **Journal of Cleaner Production**, [*s. l.*], v. 303, 2021.

DINIZ, A. E.; MARCONDES, F. C.; COPPINI, N. L. **Tecnologia da Usinagem dos Materiais**. [*S. l.: s. n.*], 2010. 2010.

FERRARESI, D. **Fundamentos da usinagem dos metais**. [*S. l.: s. n.*], 1977.

FREITAS, B. M.; NETO, J. C. de M.; SILVA, R. de S. da; GUSMÃO, A. R. B.; FREITAS, L. B. Microestrutura e Microdureza do Aço SAE 1020 em Diferentes Tratamentos Térmicos. *Em*: CONGRESSO TÉCNICO CIENTÍFICO DA ENGENHARIA E DA AGRONOMIA - CONTECC'2016, 2016, Foz do Iguaçu, Brasil. **Anais** [...]. Foz do Iguaçu, Brasil: [*s. n.*], 2016.

GENTIL, V. **Corrosão, 3ed**. [*S. l.: s. n.*], 1996.

GEORGE, Pradeep; LEO DEV WINS, K.; EBENEZER JACOB DHAS, D. S.; GEORGE, Pramod; ANUJA BEATRICE, B. Effect of machining parameters on cutting force during dry milling of 2205 DSS and 2507 SDSS materials. *Em*: MATERIALS TODAY: PROCEEDINGS, 2021, [*s. l.*], . **Anais** [...]. [*S. l.*]: Elsevier Ltd, 2021. p. 6614–6617.

GRUND, T.; PACZKOWSKI, G.; LAMPKE, T.; LIBORIUS, H.; NESTLER, A.; SCHUBERT, A. Finish Turning of FeCr17Ni2C0.2 Iron-based Sprayed Coatings: Influences

of Substrate Preparation, Cutting Speed and Feed on the Coating and Surface Properties. **Journal of Thermal Spray Technology**, [*s. l.*], v. 29, n. 1–2, p. 308–318, 2020.

GUELI, M.; MA, J.; COCOCCETTA, N.; PEARL, D.; JAHAN, M. P. Experimental investigation into tool wear, cutting forces, and resulting surface finish during dry and flood coolant slot milling of Inconel 718. *Em*: PROCEDIA MANUFACTURING, 2021, [*s. l.*], . **Anais** [...]. [*S. l.*]: Elsevier B.V., 2021. p. 236–245.

ISO 3685 - ENSAIO DE VIDA DE FERRAMENTA DE PONTA ÚNICA PARA FRESAMENTO. [*s. l.*], 2017.

ISO 4287 - ESPECIFICAÇÕES GEOMÉTRICAS DO PRODUTO (GPS) - RUGOSIDADE: MÉTODO DO PERFIL - TERMOS, DEFINIÇÕES E PARÂMETROS DA RUGOSIDADE. [*S. l.: s. n.*], 2002.

ISO 8501-1. **Preparation of steel substrates before application of paints and related products — Visual assessment of surface cleanliness — Part 1: Rust grades and preparation grades of uncoated steel substrates and of steel substrates after overall removal of previou**. [*S. l.: s. n.*], 2007.

ISO 8688 - ENSAIO DE VIDA DE FERRAMENTAS NO FRESAMENTO. [*S. l.: s. n.*], 2020. 2020.

KUTSCHMANN, P.; LINDNER, T.; LIBORIUS, H.; GRUND, T.; SCHUBERT, A.; LAMPKE, T. Influence of thermochemical treatment on the surface properties of finish turned wire arc sprayed 17cr steel coatings. **Applied Sciences (Switzerland)**, [*s. l.*], v. 11, n. 14, 2021.

LIBORIUS, H.; NESTLER, A.; PACZKOWSKI, G.; SCHUBERT, A.; GRUND, T.; LAMPKE, T. Surface integrity in turning of Fe17Cr2Ni0.2C iron based thermally sprayed coatings with special respect to the influence of the feed. **MM Science Journal**, [*s. l.*], v. 2019, n. November, p. 3220–3227, 2019.

LIU, Z. Q.; AI, X.; ZHANG, H.; WANG, Z. T.; WAN, Y. Wear patterns and mechanisms of cutting tools in high-speed face milling. **Journal of Materials Processing Technology**, [*s. l.*], v. 129, n. 1–3, p. 222–226, 2002.

LIU, D.; LIU, Z.; ZHAO, J.; SONG, Q.; REN, X.; MA, H. Tool wear monitoring through online measured cutting force and cutting temperature during face milling Inconel 718. **International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, [*s. l.*], v. 122, n. 2, p. 729–740, 2022.

MACHADO, A. Rocha.; ABRÃO, A. Mendes.; COELHO, R. Teixeira.; SILVA, M. B. da. **Teoria da usinagem dos materiais**. [*S. l.: s. n.*], 2009. 2009.

MARQUES, B. B. **Avaliação do desempenho de um revestimento metálico obtido por aspersão térmica a arco elétrico nas condições com e sem selante**. Dissertação de Mestrado. 2020. 75 f. - Universidade do Estado do Rio de Janeiro - UERJ, [*s. l.*], 2020.

MELO, A. C. A. de; MACHADO, Á. R.; FRANCO, S. D. Estudo da formação de trincas de origem térmica no fresamento. **CONGRESSO NACIONAL DE ENGENHARIA MECÂNICA**, [*s. l.*], n. April, p. 5–24, 2000.

OLIVEIRA, A. R. F.; DA SILVA, L. R. R.; BALDIN, V.; FONSECA, M. P. C.; SILVA, R. B.; MACHADO, A. R. Effect of tool wear on the surface integrity of Inconel 718 in face milling with cemented carbide tools. **Wear**, [*s. l.*], v. 476, 2021.

PAN, T. J.; LENG, Y.; LIU, S.; JIANG, J.; SHEN, J.; XIANG, J. H. Wear and Corrosion Resistance Performance of Iron-Based Metallic Amorphous Coating Produced by Twin Wire Arc Spraying. **Journal of Materials Engineering and Performance**, [*s. l.*], 2022.

PAREDES, R. S. C. **Aspersão térmica**. Curitiba: [*s. n.*], 2012. 2012.

ŘEHOŘ, J.; GOMBÁR, M.; HARNIČÁROVÁ, M.; KUŠNEROVÁ, M.; HOUDKOVÁ-ŠIMŮNKOVÁ, Š.; VALÍČEK, J.; FULEMOVÁ, J.; VAGASKÁ, A. Prediction Of The Inuence Of Cutting Conditions On Surface Morphology After Its Thermal Spraying With Stellite 6 Alloy. [*s. l.*], 2022. Disponível em: https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-1336218/v1.

RIBEIRO, J. L. S.; ABRAO, A. M.; SALES, W. F. **FORÇAS DE USINAGEM NO FRESAMENTO DE AÇOS PARA MATRIZES**. [*S. l.: s. n.*], 2006. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/242595810. .

SANDVIKCOROMANT. **R390-11 T3 08M-PM 4240**. [*S. l.: s. n.*], [*s. d.*]. Disponível em: https://www.sandvik.coromant.com/en-us/products/pages/productdetails.aspx?c=R390-11 T3 08M-PM 4240. .

ŞIRIN, Ş.; SARIKAYA, M.; YILDIRIM, Ç. V.; KIVAK, T. Machinability performance of nickel alloy X-750 with SiAlON ceramic cutting tool under dry, MQL and hBN mixed nanofluid-MQL. **Tribology International**, [*s. l.*], v. 153, 2021.

VERDIAN, M. M. Finishing and Post-Treatment of Thermal Spray Coatings. *Em*: COMPREHENSIVE MATERIALS FINISHING. [*S. l.*]: Elsevier Inc., 2017. v. 3–3, p. 191–206.

ZHAO, J. R.; HUNG, F. Y.; WU, S. C. Interface Characteristics, Erosion Behavior, and Thermal Shock Resistance of Al-Ta Alloy Coatings Produced by Arc Spraying. **IEEE Transactions on Semiconductor Manufacturing**, [*s. l.*], v. 35, n. 4, p. 698–705, 2022.