



UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
Faculdade de Engenharia Mecânica

XIMENA BLUM GARCIA

**ANÁLISE DO DESGASTE DE FRESAS
DE TOPO DE METAL DURO
REVESTIDO DURANTE A USINAGEM
DA LIGA ASTM F75**

CAMPINAS
2020

XIMENA BLUM GARCIA

ANÁLISE DO DESGASTE DE FRESAS DE TOPO DE METAL DURO REVESTIDO DURANTE A USINAGEM DA LIGA ASTM F75

Dissertação de mestrado apresentada à Faculdade de Engenharia Mecânica da Universidade Estadual de Campinas, como parte dos requisitos exigidos para obtenção do título de Mestra em Engenharia Mecânica, na área de Materiais e Processos de Fabricação

Orientador: Prof. Dr. Amauri Hassui

ESTE EXEMPLAR CORRESPONDE À VERSÃO FINAL DA DISSERTAÇÃO DEFENDIDA PELA ALUNA XIMENA BLUM GARCÍA, E ORIENTADA PELO PROF. DR AMAURI HASSUI

CAMPINAS

2020

Ficha catalográfica
Universidade Estadual de Campinas
Biblioteca da Área de Engenharia e Arquitetura
Rose Meire da Silva - CRB 8/5974

B627a Blum Garcia, Ximena, 1993-
Análise do desgaste de fresas de topo de metal duro revestido durante a usinagem da liga ASTM F75 / Ximena Blum Garcia. – Campinas, SP : [s.n.], 2020.

Orientador: Amauri Hassui.
Dissertação (mestrado) – Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Mecânica.

1. Cobalto, Ligas de. 2. Fresamento. 3. Desgaste mecânico. 4. Aspereza de superfície. 5. Força (Mecânica). I. Hassui, Amauri, 1967-. II. Universidade Estadual de Campinas. Faculdade de Engenharia Mecânica. III. Título.

Informações para Biblioteca Digital

Título em outro idioma: Wear analysis of coated carbide endmills during the machining of ASTM F75 alloy

Palavras-chave em inglês:

Cobalt alloys

Milling

Mechanical wear

Roughness

Force

Área de concentração: Materiais e Processos de Fabricação

Titulação: Mestra em Engenharia Mecânica

Banca examinadora:

Amauri Hassui [Orientador]

Carlos Eiji Hirata Ventura

Daniel Iwao Suyama

Data de defesa: 10-08-2020

Programa de Pós-Graduação: Engenharia Mecânica

Identificação e informações acadêmicas do(a) aluno(a)

- ORCID do autor: <https://orcid.org/0000-0001-5766-3305>

- Currículo Lattes do autor: <http://lattes.cnpq.br/3507503802433254>

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA
DISSERTAÇÃO DE MESTRADO ACADÊMICO

**ANÁLISE DO DESGASTE DE FRESAS DE TOPO DE
METAL DURO REVESTIDO DURANTE A USINAGEM
DA LIGA ASTM F75**

Autora: **Ximena Blum Garcia**

Orientador: **Prof. Dr. Amauri Hassui**

A Banca Examinadora composta pelos membros abaixo aprovou esta Dissertação:

Prof. Dr. Amauri Hassui

DEMM/FEM/UNICAMP

Prof. Dr. Daniel Iwao Suyama

FCA/UNICAMP

Prof. Dr. Carlos Eiji Hirata Ventura

DEMec/ UFSCar

A Ata da defesa com as respectivas assinaturas dos membros encontra-se no processo de vida acadêmica do aluno.

Campinas, 10 de AGOSTO de 2020

DEDICATÓRIA

A Martha L. García por inculcarme su amor a la educación y a las ciencias.

AGRADECIMENTOS

Este trabalho foi realizado graças à ajuda de muitas pessoas com as quais estarei sempre agradecida.

Aos meus pais Raúl e Martha, a meu irmão Fernando, o apoio incondicional emocional e financeiro.

Ao professor Amauri, sua amizade, carinho, orientação, ética na pesquisa e sobretudo por me aceitar no seu grupo de trabalho que foi o primeiro passo para eu conseguir chegar até este ponto.

Ao professor Anselmo, pelas dicas para o trabalho e a vida, e por seu carinho sempre.

Ao professor Daniel, seu apoio técnico, científico e sua abertura.

Ao Luiz C. G. Gonçalves, por sua colaboração na consecução das ferramentas utilizadas neste trabalho e por compartilhar sempre seu amor pela ciência e pelos trabalhos bem feitos.

Ao Ari, sua amizade e sobretudo sua ajuda técnica na realização de todos os ensaios.

Ao professor Carlos Ventura da Universidade Federal de São Carlos, seu tempo para me ensinar a utilizar o Alicona.

Aos técnicos do Laboratório de Materiais da UNICAMP, Claudenete, Márcia e Eduardo, a ajuda com as análises do material dos ensaios.

Às empresas: Fundimazza pela doação do material utilizado nos ensaios, RODER Ferramentas Industriais pela doação das fresas de topo e Oerlikon Balzers por revestir as fresas de topo.

Aos meus colegas do laboratório: Victor, Rêner, Monica, Taty, Luciano, Fernando, Gildeones, Pedro, Sarah, Daimer. Agradeço a amizade sincera, a cultura brasileira, a cumplicidade, o apoio neste país e sobretudo seus aportes com visão científica para meu trabalho de pesquisa.

Ao Carlos J. Gonzalez, agradeço seu amor e sua presença nesta aventura.

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001.

*¡Qué triste sería el mundo si todo en él estuviera hecho, si no hubiera rosal que
plantar, una empresa que acometer!*

Gabriela Mistral

RESUMO

As ligas a base de cobalto cromo começaram a ser utilizadas na indústria biomédica em meados de 1930 para a fabricação de próteses dentárias, tornando-se numa alternativa interessante para as existentes produzidas em ouro. De maneira similar, nas últimas décadas estas ligas ganharam espaço na produção de juntas artificiais (joelho e quadril) tradicionalmente elaboradas em aço inoxidável. A liga ASTM F75 é um material que resiste a ação de ambientes altamente corrosivos e agressivos, como o interior do corpo humano, e apresentam uma resistência ao desgaste superior à dos aços inoxidáveis o que confere maior vida às próteses. Porém as propriedades que garantem o sucesso da utilização deste material nesta aplicação são as mesmas que dificultam os processos produtivos necessários para a produção das próteses nas formas e com os acabamentos desejados. Assim sendo, o objetivo deste trabalho é contribuir à compreensão dos fenômenos que acontecem durante a usinagem da liga ASTM F75, identificando a influência da velocidade de corte e do avanço no desgaste de fresas de topo de metal duro revestidas com AlTiN e AlCrN, assim como a evolução dos esforços de corte ao longo da vida das ferramentas. Verificou-se que o aumento tanto da velocidade de corte quanto do avanço prejudicou a vida das ferramentas utilizadas e que o principal mecanismo de desgaste observado em todas as condições foi a adesão. Confirmou-se a superioridade do revestimento de AlCrN que permitiu a obtenção de vidas maiores. Por fim, em relação aos esforços de corte observou-se o aumento gradativo destes com o aumento do desgaste das ferramentas.

PALAVRAS CHAVE: *Usinagem; Fresamento; Fresas de topo; AlTiN; AlCrN; Desgaste; Vida ferramentas; Liga ASTM F75; cobalto-cromo-molibdênio.*

ABSTRACT

Cobalt chromium alloys were first used in the biomedical industry in the mid-1930s to manufacture dental prostheses, thus becoming an interesting alternative to the existing ones produced in gold. Similarly, in recent decades these alloys have gained space in the production of artificial joints (knee and hip), traditionally made with stainless steel. The ASTM F75 alloy is a material that resists the action of highly corrosive and aggressive environments, such as the interior of the human body, and has a wear resistance superior to stainless steels, increasing the prostheses lives. However, the properties that guarantee the successful use of this material in this application are the same ones that hinder the productive processes necessary for the fabrication of prostheses in the forms and with the desired finishes. Therefore, the objective of this work is to contribute to the understanding of the phenomena that occurs during the machining of the ASTM F75 alloy, identifying the influence of cutting speed and feed on the wear of carbide end mills coated with AlTiN and AlCrN, as well as the evolution of the cutting forces over the life of tools. It was found that the increase in both cutting speed and feed rate impaired the tool lives and that the main wear mechanism observed in all conditions was adhesion. The superiority of the AlCrN coating was confirmed, which allows tools longer lives. Finally, in relation to the cutting forces, a gradual increase was observed with the increase in tool wear.

KEY WORDS: *Machining; Milling; Endmills; AlTiN; AlCrN; Wear; Tool life; ASTM F75 alloy; cobalt-chromium-molybdenum.*

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1. Aplicações das ligas metálicas.....	19
Figura 2. Aplicações das ligas de cobalto na indústria biomédica.....	20
Figura 3. Dureza com respeito à temperatura para diferentes revestimentos	30
Figura 4. Categorias usinabilidade	32
Figura 5. Diagramas DTCR.....	33
Figura 6. Corpo de prova	40
Figura 7. Fresas de topo de metal duro revestido usadas nos testes	42
Figura 8. Contagem de carbonetos com ImageJ.....	47
Figura 9. Trajetórias fresas procedimento experimental	48
Figura 10. Medição de desgaste em fresas de topo.....	49
Figura 11. Aquisição dos sinais forças de corte	50
Figura 12. FFT sinais de força condição 1, $vc = 90\text{ m/min}$	51
Figura 13. Filtro Butterworth utilizado	51
Figura 14. Distribuição para medição de rugosidade	52
Figura 15. MEV Liga ASTM F75.....	54
Figura 16. Identificação da Microestrutura da Liga ASTM F75	55
Figura 17. Contagem por tamanho dos carbonetos	57
Figura 18. Curva log-log tensão-deformação liga ASTM F75.....	58
Figura 19. Microestrutura aço 1045.....	59
Figura 20. Curva log-log tensão-deformação aço 1045	60
Figura 21. Usinabilidade ASTM F75.....	62
Figura 22. EDS Revestimento AlTiN, $vc = 90\text{ m/min}$, $fz = 0,03\text{ mm}$	68
Figura 23. EDS Réplica 1 Revestimento AlTiN, $vc = 110\text{ m/min}$, $fz = 0,02\text{ mm}$	70
Figura 24. EDS Réplica 2 Revestimento AlTiN, $vc = 110\text{ m/min}$, $fz = 0,02\text{ mm}$	70
Figura 25. EDS Réplica 1 Revestimento AlTiN, $vc = 110\text{ m/min}$, $fz = 0,03\text{ mm}$	72
Figura 26. EDS Réplica 2 Revestimento AlTiN, $vc = 110\text{ m/min}$, $fz = 0,03\text{ mm}$	72
Figura 27. EDS Revestimento AlCrN, $vc = 90\text{ m/min}$, $fz = 0,02\text{ mm}$	74
Figura 28. EDS Réplica 1 Revestimento AlCrN, $vc = 90\text{ m/min}$, $fz = 0,03\text{ mm}$	76
Figura 29. EDS Réplica 2 Revestimento AlCrN, $vc = 90\text{ m/min}$, $fz = 0,03\text{ mm}$	76
Figura 30. EDS Réplica 2 Revestimento AlCrN, $vc = 110\text{ m/min}$, $fz = 0,02\text{ mm}$	78

Figura 31. MEV Revestimento AlCrN, $vc = 110 \text{ m/min}$, $fz = 0,03 \text{ mm}$	80
Figura 32. EDS Revestimento AlCrN, $vc = 110 \text{ m/min}$, $fz = 0,03 \text{ mm}$	80
Figura 33. Vida das ferramentas	81
Figura 34. ANOVA vida da ferramenta (volume de cavaco removido) $\alpha=0,05$	82
Figura 35. Gráfico efeitos principais para vida da ferramenta	83
Figura 36. Rugosidade média inicial	85
Figura 37. ANOVA Rugosidade média (ferramentas novas) $\alpha=0,05$	86
Figura 38. Gráfico efeitos principais para Ra (ferramentas novas)	87
Figura 39. Rugosidade média final	88
Figura 40. ANOVA Rugosidade média (ferramentas desgastadas) $\alpha=0,05$	89
Figura 41. Gráficos fatoriais para rugosidade média (ferramentas desgastadas)	90
Figura 42. Exemplificação fração estável do sinal (um segundo)	91
Figura 43. Força de usinagem ferramentas novas	92
Figura 44. ANOVA Força de usinagem ferramentas novas $\alpha=0,05$	93
Figura 45. Gráficos fatoriais para força de usinagem (ferramentas novas)	94
Figura 46. Força de usinagem com respeito ao desgaste de flanco $vc = 90 \text{ m/min}$	95
Figura 47. Força de usinagem com respeito ao desgaste de flanco $vc = 110 \text{ m/min}$	96
Figura 48. Evolução da força de usinagem com o desgaste de flanco condição 1 ...	97
Figura 49. Forças de corte, duas revoluções, AlTiN, $fz = 0,02 \text{ mm}$, $vc = 90 \text{ m/min}$	98

LISTA DE QUADROS

Quadro 1. Propriedades mecânicas de diferentes ligas de Co-Cr.....	22
Quadro 2. Composição química liga ASTM F75 % em massa.....	23
Quadro 3. Propriedades térmicas da liga ASTM F75	24
Quadro 4. Desgastes na superfície de folga	26
Quadro 5. Desgastes na superfície de saída	26
Quadro 6. Avarias	27
Quadro 7. Equipamentos utilizados nos ensaios.....	39
Quadro 8. Composição química da liga utilizada nos ensaios, % em massa.....	41
Quadro 9. Propriedades mecânicas da liga utilizada nos ensaios	41
Quadro 10. Especificações técnicas revestimentos	42
Quadro 11. Parâmetros de corte da bibliografia.....	44
Quadro 12. Fatores e níveis utilizados	46
Quadro 13. Condições ensaios	46
Quadro 14. Área ocupada pelos carbonetos	56
Quadro 15. Propriedades para avaliar a usinabilidade.....	61
Quadro 16. Revestimento AlTiN, $vc = 90\text{ m/min}$, $fz = 0,02\text{ mm}$	65
Quadro 17. EDS Revestimento AlTiN, $vc = 90\text{ m/min}$, $fz = 0,02\text{ mm}$	66
Quadro 18. Revestimento AlTiN, $vc = 90\text{ m/min}$, $fz = 0,03\text{ mm}$	67
Quadro 19. Revestimento AlTiN, $vc = 110\text{ m/min}$, $fz = 0,02\text{ mm}$	69
Quadro 20. Revestimento AlTiN, $vc = 110\text{ m/min}$, $fz = 0,03\text{ mm}$	71
Quadro 21. Revestimento AlCrN, $vc = 90\text{ m/min}$, $fz = 0,02\text{ mm}$	73
Quadro 22. Revestimento AlCrN, $vc = 90\text{ m/min}$, $fz = 0,03\text{ mm}$	75
Quadro 23. Revestimento AlCrN, $vc = 110\text{ m/min}$, $fz = 0,02\text{ mm}$	77
Quadro 24. Revestimento AlCrN, $vc = 110\text{ m/min}$, $fz = 0,03\text{ mm}$	79

SUMARIO

1	INTRODUÇÃO	15
1.1	Objetivo geral	16
1.2	Objetivos específicos.....	16
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	17
2.1	A liga ASTM F75 e a indústria biomédica.....	17
2.2	Desgastes e avarias das fresas de topo.....	25
2.3	Revestimentos para ferramentas de corte.....	28
2.4	Usinabilidade da liga ASTM F75	31
3	MATERIAIS E MÉTODOS	39
3.1	Equipamentos	39
3.2	Materiais e ferramentas.....	40
3.2.1	Corpos de prova	40
3.2.2	Ferramentas de corte	41
3.3	Planejamento experimental	42
3.4	Procedimento experimental.....	47
3.4.1	Análise metalográfica e quantificação de partículas abrasivas da liga	47
3.4.2	Ensaio de vida e medição do desgaste de flanco.....	48
3.4.3	Aquisição do sinal de força.....	49
3.4.4	Medição de rugosidade	51
3.4.5	Identificação dos mecanismos de desgaste das ferramentas	52
3.4.6	Medição do raio da aresta de corte	53
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES	54
4.1	Avaliação da usinabilidade da liga ASTM F75	54
4.2	Mecanismos de desgaste presentes	64

4.3	Vida das ferramentas	81
4.4	Acabamento das superfícies fresadas.....	84
4.4.1	Rugosidade média aritmética com ferramentas novas.....	84
4.4.2	Rugosidade média aritmética com ferramentas desgastadas	87
4.5	Análise sinais de força.....	90
4.5.1	Influência do desgaste de flanco na força de usinagem	95
5	CONCLUSÕES	100
6	TRABALHOS FUTUROS	102
	REFERÊNCIAS	103
	ANEXO A: COMPARAÇÃO ENTRE OS BIOMATERIAIS EXISTENTES.....	109
	ANEXO B: SINAIS DE FORÇAS DE CORTE	110

1 INTRODUÇÃO

O mercado dos dispositivos médicos implantáveis foi avaliado em 42,7 bilhões de dólares no ano 2018 e se espera continue crescendo até atingir os 55 bilhões de dólares no ano 2025. (UGALMUGALE; SWAIN, 2019). Essa tendência se deve principalmente ao aumento da população idosa ao redor do mundo, pois doenças como artrite e osteoporose criam uma demanda significativa por diferentes implantes e dispositivos ortopédicos. Segundo a OMS a quantidade de pessoas com mais de 60 anos estará ao redor dos 2 bilhões no 2050, mas em 2015 essa cifra era de 900 milhões. (WORLD HEALTH ORGANIZATION, 2018).

Além do aumento da expectativa de vida, outras tendências globais como a pouca atividade física que desencadeiam em sobrepeso e diabetes, e, a prática de esportes mais exigentes, resultam de igual forma na aplicação de esforços excessivos nas articulações, aumentando assim a necessidade de implantes ortopédicos. (IPEREM; ZANDERS, 2018).

Dessa maneira, a inovação em materiais, processos de fabricação e a inclusão de novas tecnologias que melhorem a relação custo-benefício na produção de dispositivos ortopédicos, poderiam representar um grande impacto em nossas sociedades. (UGALMUGALE; SWAIN, 2019).

Esse é o contexto ótimo para o estudo das ligas de cobalto-cromo-molibdênio, pois são materiais que apresentam boa compatibilidade com os tecidos do corpo humano, e, embora estejam sendo utilizados na indústria biomédica desde a década de 1930, foi nos últimos vinte anos que se viu a utilidade desses na fabricação de dispositivos médicos implantáveis como as próteses de joelho, quadril, cotovelo e tornozelo. (MURPHY; BLACK, 2016).

A geometria e os acabamentos que exigem esse tipo de implantes criam um contexto desafiador para a área da usinagem, hoje parte fundamental na produção das próteses. Principalmente em termos de produtividade, pois as ligas de cobalto cromo são materiais duros e abrasivos, com alto módulo de elasticidade e baixa condutividade térmica, características pelas quais são catalogados como materiais difíceis de cortar. (IPEREM; ZANDERS, 2018).

Em pesquisas como as de AHEARNE et al., (2016); AYKUT et al., (2007); FERREIRA; SIMÕES; RELVAS, (2014), os autores observaram curta vida das ferramentas utilizadas e acabamento péssimo durante a usinagem de ligas de cobalto-cromo-molibdênio devido a fatores como o encruamento, a abrasividade e a geração de calor.

Porém os trabalhos relacionados com a usinagem desta liga ainda são poucos, o que torna o assunto interessante, pois este material está sendo bastante utilizado comercialmente porque por um lado tem propriedades mecânicas melhores quando comparados com os aços inoxidáveis, que são as ligas tradicionalmente usadas neste campo. E por outro, os custos de fabricação de próteses com este material são menores se são comparados com os custos de manufatura de implantes em Titânio Ti_6Al_4V .

1.1 Objetivo geral

Contribuir para a compreensão dos fenômenos que acontecem durante a usinagem da liga de cobalto cromo molibdênio baseada na norma ASTM F75, principalmente em relação aos tipos e mecanismos de desgaste no fresamento com fresas de metal duro inteiriças. Isso visando melhorar a eficiência na produção de próteses de juntas artificiais utilizando este material.

1.2 Objetivos específicos

- Avaliar dois tipos diferentes de revestimento em fresas de metal duro inteiriço, a saber $AlTiN$ e $AlCrN$;
- Determinar qual a influência da velocidade de corte e avanço por dente no desgaste das fresas inteiriças;
- Analisar os esforços de corte ao longo da vida da ferramenta.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo são expostos os conceitos básicos necessários para o desenvolvimento desta dissertação. Deste modo, são definidas as propriedades físicas e mecânicas da liga ASTM F75 e posteriormente é explorado o conceito de usinabilidade com o intuito de compreender a mecânica do fresamento deste material.

2.1 A liga ASTM F75 e a indústria biomédica

Os materiais utilizados na indústria biomédica, também chamados de biomateriais, são definidos como substâncias utilizadas no interior do corpo humano ou em conjunto com este, que são concebidas para suprir parcial ou totalmente as funções dos órgãos e tecidos que estão doentes. Estas substâncias devem ter propriedades que combinem com às do sistema biológico e ser suficientemente estáveis no uso pretendido. Deste modo, um material que se pretenda utilizar no interior do corpo humano deve cumprir os seguintes requisitos: ser biocompatível, ser esterilizável, ter propriedades físicas e químicas comparáveis com às do tecido que está substituindo, contar com propriedades mecânicas apropriadas para a aplicação que vai ter no interior do corpo e apresentar tempos de vida em serviço aceitáveis dependendo de sua finalidade. (HASIRCI; HASIRCI, 2018).

Durante as últimas décadas, os biomateriais vêm sendo amplamente desenvolvidos graças ao aumento da pesquisa interdisciplinar, que incentivou a integração da engenharia com a ciência dos materiais e a medicina. Antigamente, os cirurgiões e médicos eram os únicos interessados em estudar e experimentar novos materiais, com o objetivo de diminuir a dor dos pacientes, de curar doenças e de substituir partes do corpo que não funcionavam mais. Assim, os avanços neste âmbito estão relacionados com a utilização de polímeros biodegradáveis, cerâmicas bioativas e ligas metálicas com altas resistências ao desgaste no interior do corpo humano. (NARAYAN; PILLIAR, 2009).

As fontes de biomateriais são numerosas, estes podem ser obtidos de materiais naturais (polímeros naturais), polímeros sintéticos, metais, cerâmicos ou ainda compósitos, formados pela aglutinação de dois dos tipos de materiais já mencionados. Esta variedade permite a projeção de diferentes propriedades físicas, químicas e mecânicas, além de vantagens em termos de custos e de processos de fabricação, dependendo da necessidade de cada corpo e de cada doença que está sendo tratada (HASIRCI; HASIRCI, 2018). Em vista disso, no Anexo A estão sumarizados alguns biomateriais com suas principais aplicações, além das vantagens e desvantagens de sua utilização.

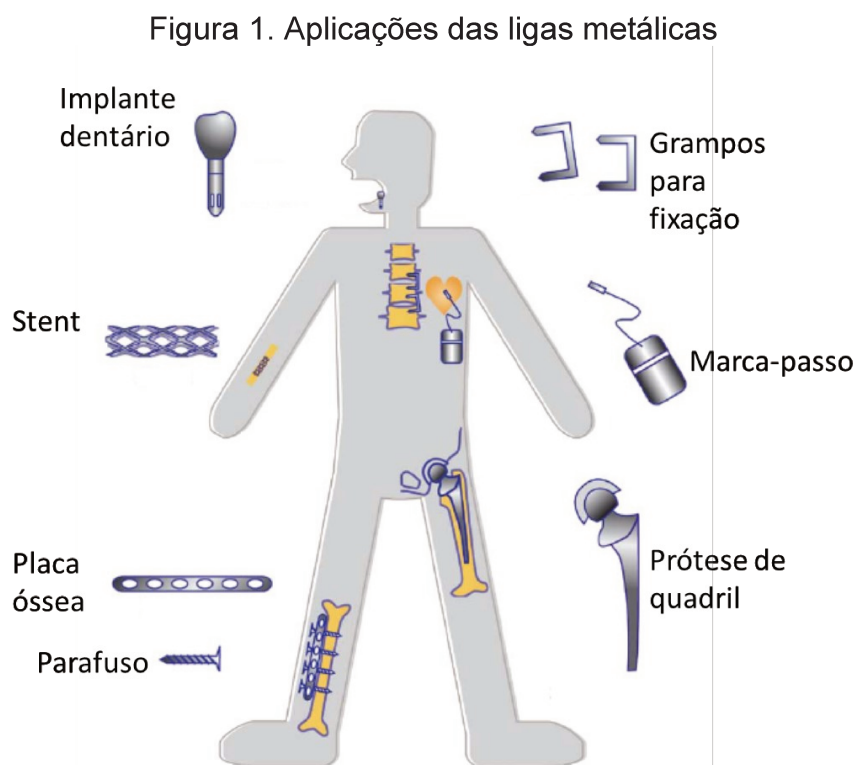
Os metais apresentam densidade e resistência mecânica altas comparadas às dos polímeros, isto promove sua utilização na indústria biomédica com duas finalidades principais, a primeira é substituir partes do corpo como: articulações, ossos longos e placas cranianas, e a segunda, a produção de dispositivos de fixação para estabilizar ossos fraturados. Além disso, os metais possuem outras propriedades mecânicas próprias como: maleabilidade e ductilidade, que permite a criação das geometrias complexas necessárias aos implantes usados no interior do corpo. (HASIRCI; HASIRCI, 2018).

Uma das maiores restrições na hora de se utilizar metais como biomateriais é a tendência à corrosão, isso ocorre porque os elétrons localizados no nível mais externo dos átomos não estão fortemente ligados à estrutura, sendo facilmente perdidos em reações químicas formando cátions. Além de cátions e ânions, as interações eletrostáticas formam sais solúveis em meio aquoso, e a ocorrência destes fenômenos aumenta a toxicidade e o risco para a saúde, além do enfraquecimento da prótese, causando falhas prematuras. Portanto, o uso de metais está restrito àqueles que têm a possibilidade de formar uma fina camada de óxido que acontece quando o metal é exposto ao oxigênio, pois esta camada é capaz de reduzir a corrosão in vivo. (HASIRCI; HASIRCI, 2018; NARAYAN; PILLIAR, 2009; PARK; LAKES, 2007).

Desse modo, o desenvolvimento de ligas metálicas como biomateriais exige que estas possuam características como resistência à corrosão, resistência ao desgaste e resistência mecânica, além, de ter cores desejáveis e permitir excelente polimento. Como exemplo destas ligas estão os aços inoxidáveis, as ligas de titânio

e as ligas de cobalto-cromo, entre outros. (HASIRCI; HASIRCI, 2018; NARAYAN; PILLIAR, 2009).

Na Figura 1 se observam algumas das principais aplicações dos materiais metálicos no interior do corpo humano.

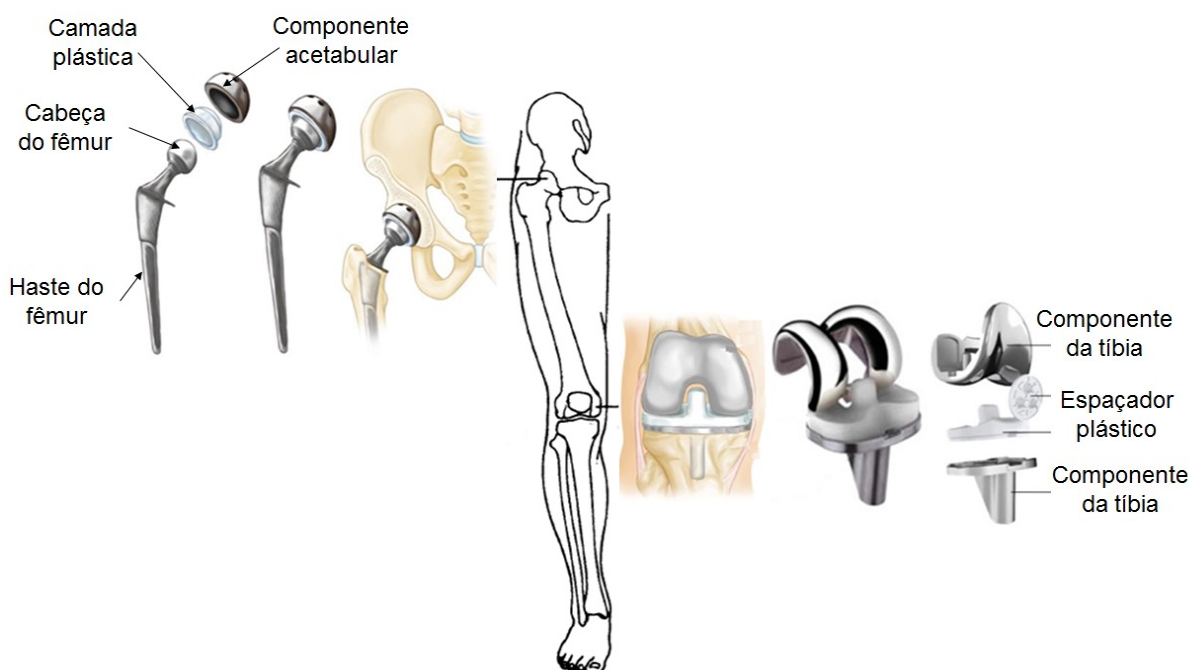


Fonte: Adaptado de (SUMITA et al., 2003)

As ligas de cobalto começaram a ser utilizadas no início do século XX, pois neste momento houve interesse industrial em sua utilização, ressalta-se que o cobalto, em sua forma pura, não tem resistência à corrosão e não é dúctil. Durante o período de 1907 a 1913, Haynes desenvolveu algumas ligas a partir de cobalto-cromo e cobalto-cromo-tungstênio, obtendo boa resistência à corrosão. Já na década de 1930 uma liga, comercialmente denominada Vitallium, composta por 30% de cromo, 7% de tungstênio e 0,5% de carbono em cobalto, foi usada para fabricação de próteses dentárias metálicas, como alternativa às ligas de ouro utilizadas tradicionalmente nesta aplicação. (BHAT, 2002).

Em adição, nas últimas décadas este material encontrou novas aplicações, a mais recente é a utilização em juntas artificiais como o joelho e quadril. Isto porque as ligas de cobalto-cromo-molibdênio apresentam uma resistência ao desgaste maior do que a dos aços inoxidáveis, materiais tradicionalmente utilizados com este fim (BHAT, 2002). A figura 2 mostra essas duas juntas.

Figura 2. Aplicações das ligas de cobalto na indústria biomédica



Fonte: Adaptado de (AAOS, 2019; DAVIS, 2003)

Os dois elementos básicos que formam estas ligas são uma solução sólida de cerca de 65% de cobalto e o restante cromo, sendo o molibdênio adicionado para produzir grãos mais finos, o que resulta numa maior resistência mecânica, seja a liga fundida ou forjada. Como estas ligas contêm elementos adicionais como carbono, níquel, tungstênio e molibdênio não podem ser consideradas isoladas em termos de sistemas ternários e quaternários, e, as propriedades físicas e mecânicas destas dependem da composição química, do processo de manufatura e dos tratamentos térmicos. (BHAT, 2002; PARK; LAKES, 2007).

As principais ligas de cobalto utilizadas em aplicações biomédicas são produzidas por fundição ou forjamento, as ligas fundidas são feitas pelo processo de

cera perdida (também conhecido como microfusão), no qual é feito um modelo de cera que depois é coberto com materiais cerâmicos. Este modelo é levado até o forno onde a cera é derretida e o modelo cerâmico permanece com a forma do implante, assim é possível verter a liga metálica neste e depois do resfriamento obter as próteses. (BHAT, 2002).

O processo de fundição gera grãos grandes e imperfeições metalúrgicas, consequentemente propriedades mecânicas piores quando comparadas com as ligas forjadas. As propriedades das ligas fundidas podem ser melhoradas por meio de tratamentos como a aplicação de pressão isostática a quente, pois os tratamentos térmicos oferecem um benefício bem limitado à melhora da fundição. (BHAT, 2002).

Por outro lado, o forjamento das ligas de cobalto lhes confere uma microestrutura com grãos finos que também permite o aumento de sua resistência mecânica por meio de trabalho a frio. Não obstante, o forjamento de ligas de cobalto-cromo-molibdênio demanda prensas sofisticadas e ferramentas especiais, o que faz com que seja mais cara a produção dos implantes por forjamento do que por fundição. (BHAT, 2002).

A resistência ao desgaste abrasivo das ligas forjadas e das ligas fundidas é similar, porém, as próteses feitas com as ligas forjadas têm resistência à fadiga e resistência à tração superiores quando comparadas com as fundidas, deste modo são as preferidas em aplicações como a fabricação das hastes das próteses da articulação do quadril, devido à dificuldade para trocar este tipo de implante. Assim, é interessante que possuam longo tempo de vida sem sofrer fraturas ou falhas por fadiga. Apesar disso, as ligas forjadas não são recomendáveis para as superfícies das próteses sujeitas a rolamento, em especial nos pontos de articulações porque suas propriedades relacionadas ao atrito são pobres, tanto com outros materiais como consigo mesma, assim, nestes casos as ligas fundidas são preferidas. Em adição, tanto as ligas forjadas como as fundidas apresentam excelente resistência à corrosão, e de maneira similar a outras ligas, quando a resistência mecânica aumenta sua ductilidade diminui. (PARK; LAKES, 2007).

Não obstante, o módulo de elasticidade destas ligas apresenta valores ligeiramente maiores do que o dos aços inoxidáveis, mas muito superiores aos do osso cortical, e os tratamentos térmicos e físicos não influenciam de maneira

significativa esta propriedade. Esta diferença no módulo de elasticidade, entre o implante e os ossos, tem implicações para os diferentes modos de transferência de carga para o osso e, por conseguinte a maioria das cargas são absorvidas pela prótese de forma que os ossos adjacentes sofrem uma perda de densidade, dado que estes precisam de estímulos para seguir se regenerando. Portanto, caso pretenda-se reduzir a rigidez dos implantes, este material pode ser substituído por ligas de titânio que possuem densidade e módulo de elasticidade cerca de 50% menores do que apresentam as ligas de cobalto (NAVARRO et al., 2008; PARK; LAKES, 2007).

Por fim, as ligas de cobalto-cromo são especialmente úteis quando é necessário um material com alta rigidez ou altamente polido e extremamente resistente ao desgaste, e também são as menos dúcteis em comparação com as ligas a base de ferro ou titânio (HASIRCI; HASIRCI, 2018).

As propriedades mecânicas de algumas ligas de cobalto-cromo utilizadas na indústria biomédica são exibidas no Quadro 1, a primeira liga que aparece no quadro é o material que será estudado neste trabalho.

Quadro 1. Propriedades mecânicas de diferentes ligas de Co-Cr

Liga	Limite de escoamento [MPa]	Limite de resistência [MPa]	Alongamento [%]	Fadiga em ciclos [10 ⁷]	Módulo de Young [GPa]
F75 fundida	448-517	655-889	8	400-500	210-234
F75 fundida + recozida em solução	450-530	655-890	11-17	207-310	
F75 fundida + cobertura porosa	490	735	11	150-207	
F799 forjada (baixo carbono)	875-995	1320-1450	19-26	670-800	
F799 forjada (alto carbono)	1175	1510	10	-	
F1537 forjada	1403	-	29	-	
F90 forjada	448-648	951-1220	-	-	7-30
Osso humano	-	50-150	-	-	

Fonte: (DAVIS, 2003; MARTINEZ ANTUNEZ, 2017; NARAYAN; PILLIAR, 2009; PARK; LAKES, 2007)

A liga ASTM F75 é caracterizada por ter o maior conteúdo de carbono quando comparada com as demais ligas à base de cobalto utilizadas em implantes biomédicos e por ser produzida pelo processo de fundição por cera perdida. Também é o biomaterial metálico com a maior resistência ao desgaste dentre os mais utilizados, isto graças à formação dos carbonetos $M_{23}C_6$, M_7C_3 e M_6C durante a solidificação, nos quais o M é principalmente cromo. A formação destes carbonetos contribui para a alta taxa de encruamento da liga e para a alta resistência ao desgaste. Isso ocorre como resultado do endurecimento destes ao redor da matriz de cobalto quando aplicada uma carga durante a operação do componente. (NARAYAN; PILLIAR, 2009).

Esta liga se funde entre 1350 e 1450°C dependendo de sua composição química e apresenta uma estrutura de fundição típica, formada por camadas com diferentes características, solidificando preferencialmente na estrutura austenítica cúbica de face centrada, sendo as fases γ e α com zonas interdendríticas enriquecidas com cromo, molibdênio e carbono. A fase γ é formada em temperaturas acima de 890°C enquanto a estrutura hexagonal compacta é estável abaixo desta temperatura. Porém, devido ao fato de a transformação da estrutura cúbica de face centrada para a estrutura hexagonal compacta ser lenta, a liga geralmente é capaz de manter a estrutura cúbica de face centrada à temperatura ambiente. (NARAYAN; PILLIAR, 2009). Por outro lado, essa liga tem uma alta resistência à corrosão por causa do grande conteúdo de cromo que incentiva a formação de uma camada superficial de Cr_2O_3 . (MARTINEZ ANTUNEZ, 2017).

Quadro 2. Composição química liga ASTM F75 % em massa

Elemento	Min	Max	Elemento	Min	Max
Cr	27,0	30,0	P	-	0,02
Mo	5,0	7,0	S	-	0,01
Ni	-	0,50	N	-	0,25
Fe	-	0,75	Al	-	0,1
C	-	0,35	Ti	-	0,1
Si	-	1,0	Bo	-	0,01
Mn	-	1,0	Co*	balanço	balanço
W	-	0,2			
* Aproximadamente igual à diferença para 100% da soma da percentagem dos outros elementos especificados.					

Fonte: (ASTM INTERNATIONAL, 2015)

Os elementos que compõem esta liga são apresentados no Quadro 2. Cada elemento e seu teor confere diferentes propriedades físicas e mecânicas ao material.

Assim sendo, o cromo melhora a resistência à corrosão e à oxidação. Com objetivo similar é adicionado o alumínio, pois este também favorece a resistência à oxidação devido à formação do composto intermetálico CoAl. No caso do níquel, esse ajuda na estabilidade da matriz com estrutura cúbica de face centrada e em adição melhora a forjabilidade do material graças à formação do composto intermetálico Ni₃Ti. (KLARSTROM, 1993).

Elementos como o molibdênio, o tungstênio e o carbono aumentam a resistência mecânica da liga, aliás, o molibdênio também é adicionado para diminuir o tamanho dos grãos após a fundição. No caso do titânio a resistência mecânica da liga aumenta graças à formação de carbonetos e do composto intermetálico Co₃Ti. Finalmente a presença de boro produz também aumento da resistência mecânica da liga por efeito da formação de precipitados e pelos contornos do grão. (KLARSTROM, 1993).

Além da resistência à corrosão em ambientes agressivos, a liga de Co-Cr apresenta um bom comportamento em termos da resistência ao desgaste, inclusive quando são utilizadas em próteses que combinam partes metálicas e de polietileno (NAVARRO et al., 2008). Por esta razão, quando a prótese é utilizada em regiões como joelhos ou quadris nas quais a solicitação mecânica é significativa, a liberação de partículas metálicas da liga vai ser muito menor em comparação com as que são liberadas quando se emprega a liga de aço inoxidável F138, por exemplo. (MARTINEZ ANTUNEZ, 2017).

Por último, no Quadro 3 são mostradas as propriedades térmicas da liga ASTM F75. A relevância destas últimas está relacionada com seu efeito nos processos de usinagem e no estudo da usinabilidade do material que será feito no item 2.4.

Quadro 3. Propriedades térmicas da liga ASTM F75

Propriedade	Unidades	ASTM F75
Condutividade térmica k	[W/m K]	13
Calor específico C_p	[J/kg K]	450
Difusividade térmica	[m ² /s]	3,00*10 ⁻⁶

Fonte: (BARON; DESMOND; AHEARNE, 2019)

2.2 Desgastes e avarias das fresas de topo

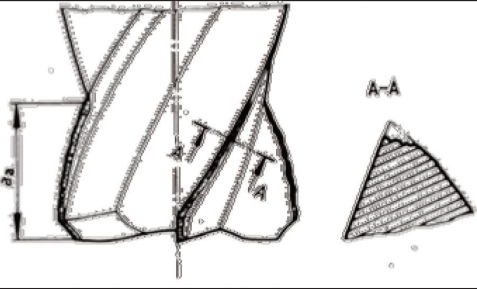

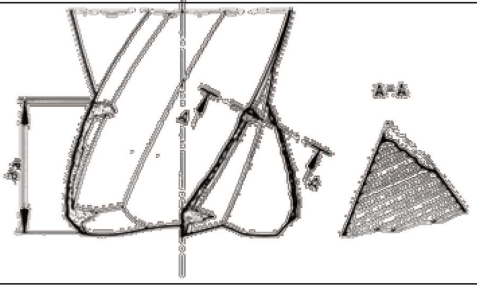
Devido à natureza dos processos de usinagem as ferramentas de corte sofrem desgaste e avarias. Quando se fala de desgaste refere-se à perda constante de partículas microscópicas da ferramenta, enquanto o termo avarias é utilizado quando ocorre a perda repentina de uma grande porção de material. (DINIZ; MARCONDES; COPPINI, 2014)

Segundo DINIZ; MARCONDES; COPPINI, (2014), a vida da ferramenta é considerada como o tempo total ou o volume de material removido até o qual a capacidade da ferramenta para usinar é afetada de acordo com o critério de fim de vida definido antecipadamente. Portanto, é possível delimitar os valores de desgaste permitidos nas ferramentas a partir dos parâmetros e características próprias de cada processo de usinagem.

Assim por exemplo em um processo de desbaste embora exista o risco de quebra da ferramenta é permitido atingir valores de desgaste muito altos, já que não são exigidas tolerâncias apertadas nem bom acabamento superficial. Por outro lado, para operações de acabamento o desgaste pode não ser um bom fator de limite, posto que é mais importante obter tolerâncias apertadas e baixa rugosidade.

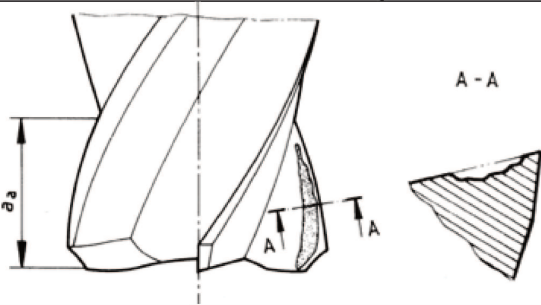
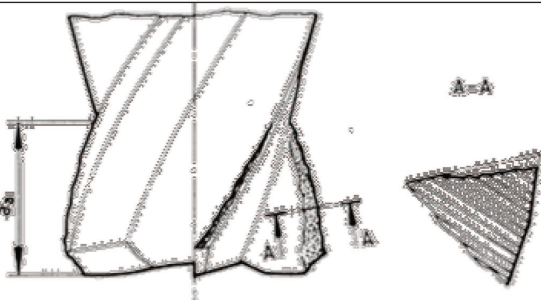
Segundo a Norma ISO 8688-2:1989, que padroniza o teste de vida das ferramentas de fresamento e especificamente na segunda parte em que se refere às fresas de topo, a determinação da vida da ferramenta deve ser feita a partir da medição de valores de desgaste. Além disso, sempre que ocorrer alguma avaria ou a quebra da aresta esse instante deve determinar o fim de vida da ferramenta. Os valores de desgaste escolhidos para determinar o fim de vida da ferramenta dependem da quantidade de material existente para fazer os testes e do custo do teste. Assim, quando são escolhidos valores de desgaste elevados o custo dos ensaios ultrapassa o benefício alcançado com os resultados obtidos, porém se é definido um limite muito baixo os resultados não serão confiáveis, pois a resposta do teste pode estar ainda nos estágios iniciais do desenvolvimento do desgaste para as condições dos ensaios. Desse modo as fresas de topo segundo a Norma ISO 8688-2:1989 podem exibir os desgastes do Quadro 4 na superfície de folga, os desgastes do Quadro 5 na superfície de saída e avarias como as mostradas no Quadro 6.

Quadro 4. Desgastes na superfície de folga

	V_{B1} ; desgaste de flanco uniforme
	V_{B2} ; desgaste de flanco não uniforme
	V_{B3} ; desgaste de entalhe

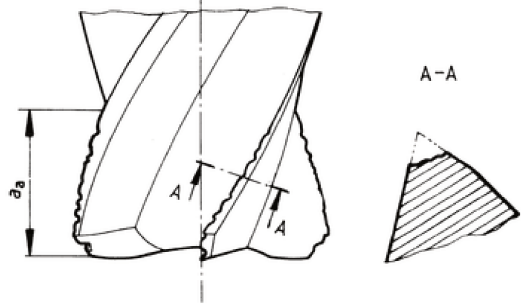
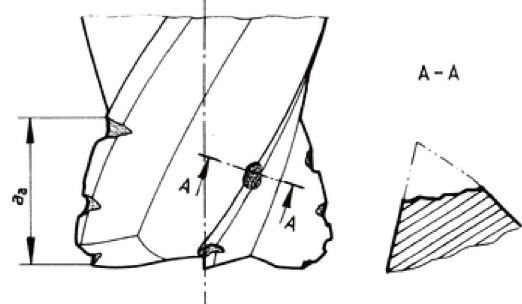
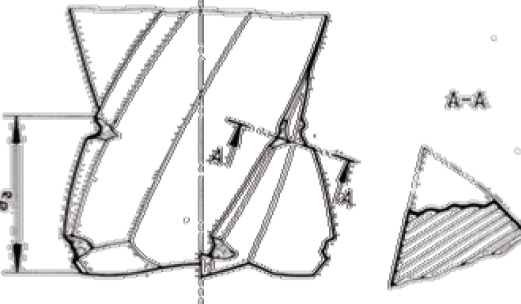
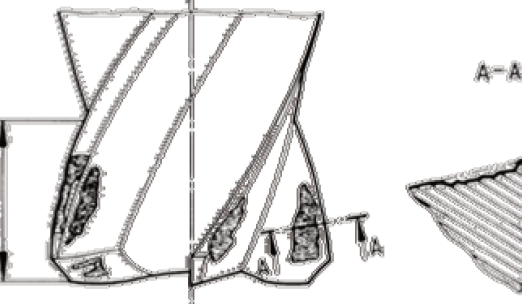
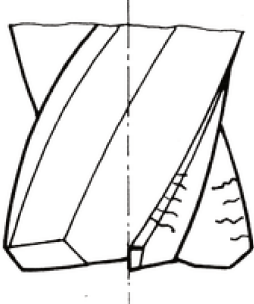
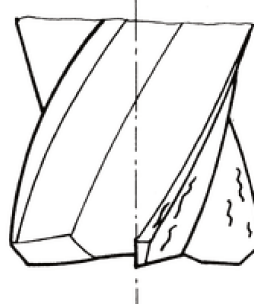
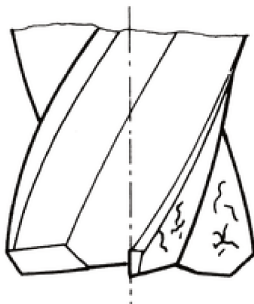
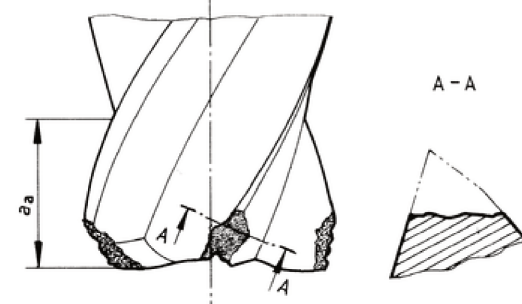
Fonte: Adaptado de (INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION, 2016)

Quadro 5. Desgastes na superfície de saída

	K_{T1} ; desgaste de cratera
	K_{T2} ; desgaste da face em forma de escada

Fonte: Adaptado de (INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION, 2016)

Quadro 6. Avarias

	
Lascamento uniforme	Lascamento não uniforme
	
Lascamento localizado	Descamação
	
Trincas perpendiculares à aresta de corte	Trincas paralelas à aresta de corte
	
Trincas irregulares	Falha catastrófica

Fonte: Adaptado de (INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION, 2016)

2.3 Revestimentos para ferramentas de corte

O desenvolvimento dos revestimentos para ferramentas de corte tem como objetivo principal diminuir o desgaste nas ferramentas de corte durante a usinagem. Isso é possível porque os materiais duros empregados na fabricação destes revestimentos aumentam a resistência ao desgaste, diminuem o coeficiente de atrito e têm uma maior estabilidade química. Portanto, se for considerado que a ferramenta continua com a tenacidade do material da base, será possível obter um melhor desempenho e diminuir as paradas devido às falhas prematuras. (DINIZ; MARCONDES; COPPINI, 2014; SUSKI; OLIVEIRA, 2013).

Existem diferentes técnicas para a aplicação dos revestimentos nas ferramentas. A primeira que se utilizou industrialmente foi a técnica de Deposição Química de Vapor, CVD do inglês *Chemical Vapor Deposition*. Seus primeiros usos, na década de 1960, foram para aplicar nitreto de titânio (TiN) e carbonitreto de titânio (TiCN) em ferramentas de metal duro, pois as temperaturas utilizadas neste processo são da ordem dos 1000° C. Uma década depois, surgiu a técnica de Deposição Física de Vapor, PVD, do inglês *Physical Vapor Deposition*, que foi desenvolvida de maneira simultânea pela Balzers na Europa e ULVAC e Sumitomo no Japão. Essa técnica é um processo em que os materiais para revestir estão em estado de vapor e são condensados para formar uma fase sólida sobre o objeto a recobrir. São utilizadas baixas temperaturas de deposição em torno de 400° a 500° C. (MALSHÉ; JIANG; DHAMDHARE, 2002; SUSKI; OLIVEIRA, 2013).

Além destas duas técnicas, existem outros tratamentos de superfície utilizados em ferramentas de corte como a deposição química de vapor assistida por plasma (PCVD) e a deposição química de vapor com média temperatura (MT-CVD) que trabalham em faixas de temperaturas menores do que as empregadas no CVD, 600° a 900° e 750° a 900° C respectivamente. (DINIZ; MARCONDES; COPPINI, 2014).

Os revestimentos realizados por PVD oferecem uma espessura muito uniforme e bom controle da estequiometria, além de temperaturas relativamente baixas de deposição e a possibilidade de aplicar simultaneamente o revestimento na peça inteira. Como este processo necessita de temperaturas menores para aplicar as coberturas duras nas ferramentas quando comparado com o processo CVD, permitiu

o revestimento do aço rápido sem ocasionar a perda da dureza da matriz, suprimindo a necessidade de um novo tratamento térmico. (BOBZIN, 2018; MALSHE; JIANG; DHAMDHERE, 2002).

Além disso, o desenvolvimento da técnica PVD permitiu que as ferramentas fossem recobertas com múltiplas camadas, com controle da espessura e da ordem em que essas eram aplicadas. A estrutura multicamada alterna entre altas e baixas tensões resultando em revestimentos com durezas muito altas, boa adesão entre as camadas, boa tenacidade e baixa tendência à fadiga, o que reduz a presença de fraturas se comparada com os revestimentos monocamada. (SUSKI; OLIVEIRA, 2013).

A utilização da PVD aumentou consideravelmente graças ao desenvolvimento de novos processos que permitiram a deposição dos revestimentos em grandes proporções e da crescente demanda por materiais e revestimentos de alto desempenho. Os revestimentos feitos com este processo apresentam desempenho similar ao dos revestimentos aplicados pela técnica de CVD na maioria das aplicações, inclusive nas ferramentas de metal duro utilizadas para corte interrompido. (SUSKI; OLIVEIRA, 2013).

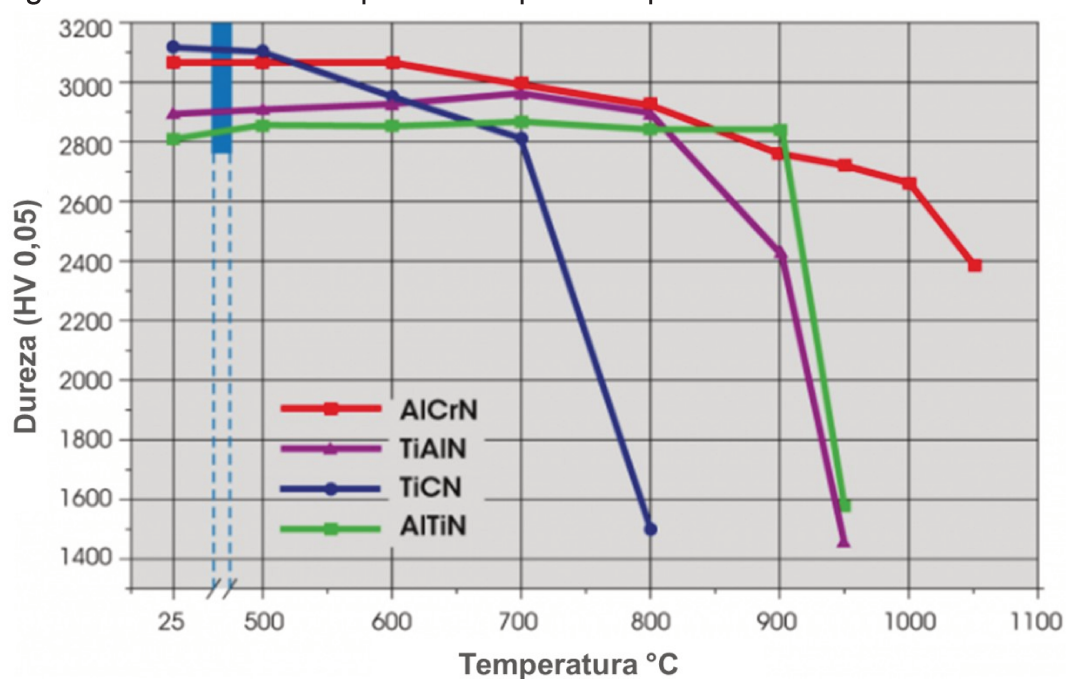
Atualmente são revestidas mais da metade das ferramentas de corte que possuem aresta de corte definida. Estes revestimentos são principalmente carboneto de titânio TiC, carbonitreto de titânio TiCN, nitreto de titânio TiN, óxido de alumínio Al_2O_3 e nitreto de titânio alumínio TiAlN, que são a base para a criação dos revestimentos modernos chamados de alto desempenho, porém existe ainda um grande potencial de melhora do desempenho destes. São exemplos das últimas coberturas introduzidas com sucesso no mercado, o diamante, o diboreto de titânio TiB_2 e o nitreto de alumínio cromo AlCrN. (BOBZIN, 2018).

Segundo OERLIKON BALZERS, (2018) a escolha do método do revestimento usado nas ferramentas de corte é determinada principalmente pelo mecanismo de desgaste que está causando o fim da vida da ferramenta, assim como da diminuição do coeficiente de atrito e do aumento da resistência à corrosão desejados. Desse modo, os revestimentos de tipo PVD protegem na mesma proporção contra os mecanismos de desgaste de abrasão e de adesão e numa proporção menor contra o mecanismo de desgaste por corrosão. Enquanto os revestimentos do tipo CVD protegem as ferramentas contra o desgaste por abrasão numa maior proporção do

que os PVD, porém a proteção contra o desgaste por adesão é bem menor e contra o desgaste por corrosão está no mesmo nível do que a proteção oferecida pelos revestimentos de tipo PVD.

A resistência dos revestimentos contra os mecanismos de desgaste depende da dureza a quente destes (OERLIKON BALZERS, 2018). Na Figura 3 é mostrada a dureza de diferentes revestimentos e seu comportamento à medida que as temperaturas aumentam.

Figura 3. Dureza com respeito à temperatura para diferentes revestimentos



Fonte: Adaptado de (OERLIKON BALZERS, 2018)

No gráfico é possível perceber que o revestimento de AlCrN é o que apresenta maior estabilidade da dureza com o aumento da temperatura seguido pelo revestimento de AlTiN.

2.4 Usinabilidade da liga ASTM F75

O conceito de usinabilidade indica a facilidade com que um material pode ser usinado por uma ferramenta de corte, de maneira que sejam atingidos certos níveis de forma, tamanho e rugosidade.

Sabendo-se que os processos de usinagem dependem de muitos fatores, incluindo as ferramentas de corte, a peça a fabricar, a máquina-ferramenta, o operador da máquina, a manutenção e os equipamentos periféricos. De todos estes, o que mais influencia a usinabilidade é a peça a ser fabricada, que englobaria o conjunto material-geometria, e como a geometria da peça não é uma condição comumente avaliada na determinação da usinabilidade, esta grandeza tecnológica é estabelecida a partir das características próprias do material sendo estudado. (STAHL et al., 2012).

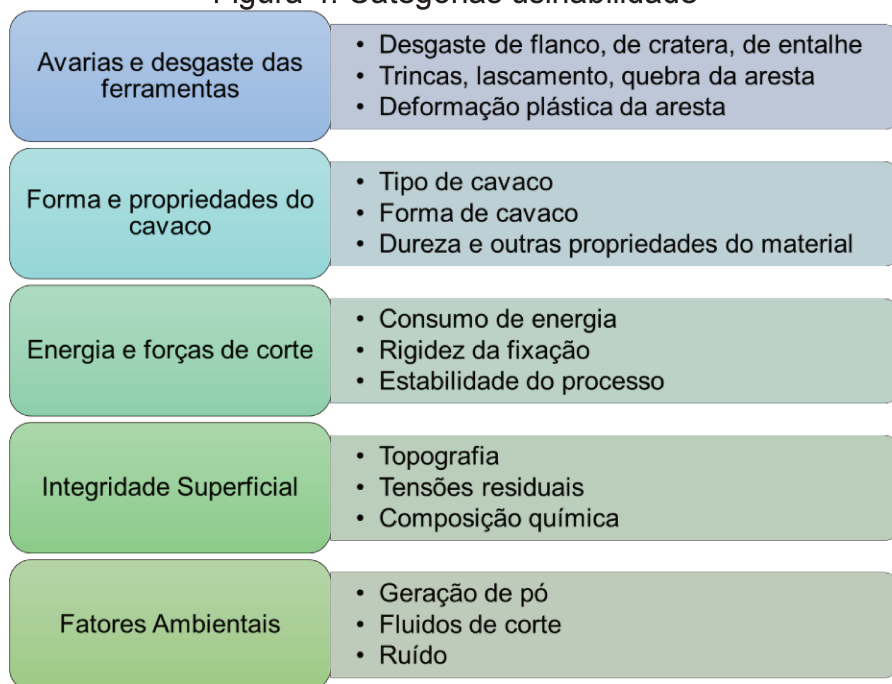
Dessa maneira, a usinabilidade pode ser especificada como o resultado da comparação de um conjunto de propriedades físicas e mecânicas entre diferentes materiais, obtendo-se como resultado um valor numérico ou um diagrama polar também conhecido como diagrama DTCR (*Difficult to cut rating*) pelo trabalho do autor YAMANE; SEKIYA, (2004, apud FERREIRA; SIMÕES; RELVAS, 2014)

Assim as propriedades que têm influência no grau de usinabilidade de um material são aquelas que modificam os resultados desejados do processo, como vida da ferramenta, acabamento da peça, temperatura de corte, potência de corte, produtividade, características do cavaco, entre outras. Portanto, pode acontecer de se ter um material com boa usinabilidade levando em conta o acabamento da peça usinada, mas com má usinabilidade em relação à vida da ferramenta. (DINIZ; MARCONDES; COPPINI, 2014).

Segundo STAHL et al., (2012), podem ser diferenciadas cinco categorias principais que representam a base do estudo do conceito tradicional da usinabilidade, a saber, integridade superficial, forma e propriedades do cavaco, avarias e desgaste das ferramentas, consumo de energia e forças de corte e fatores ambientais. Estas categorias se relacionam com vários eventos físicos que acontecem durante a usinagem e que são dependentes entre si, tais como a

resistência ao corte, a temperatura de usinagem, a formação de aresta postiça de corte, entre outros.

Figura 4. Categorias usinabilidade

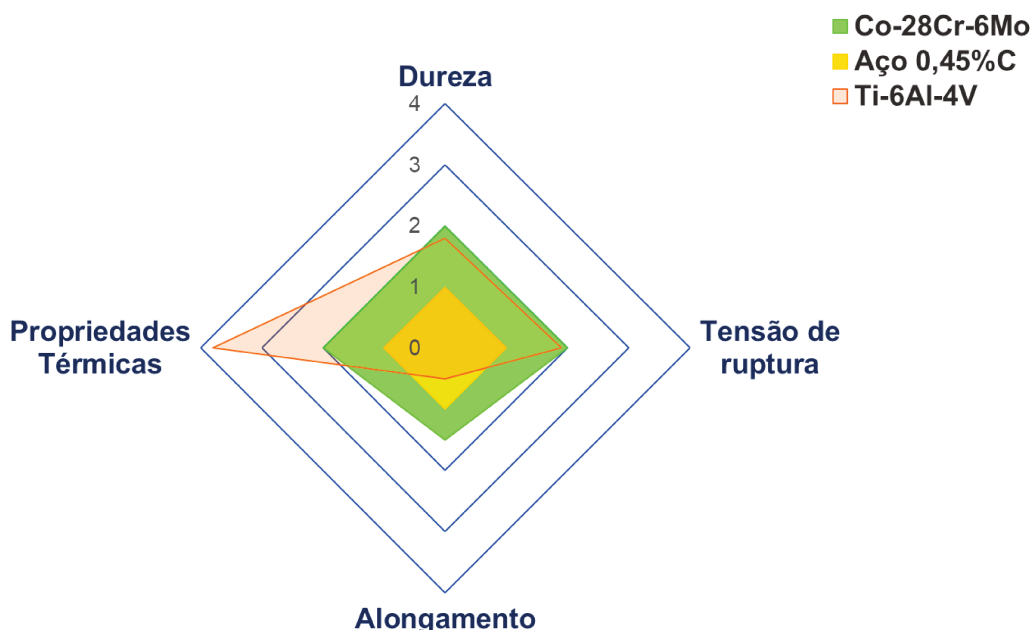


Fonte: Adaptado de (STAHL et al., 2012)

No trabalho de YAMANE; SEKIYA, (2004, apud FERREIRA; SIMÕES; RELVAS, 2014) foi proposta a avaliação da usinabilidade de uma liga de cobalto e de uma liga de titânio a partir da comparação entre propriedades como dureza, resistência mecânica e condutividade térmica, mediante a utilização de diagramas DTCCR, conforme os mostrados na Figura 5.

Essas propriedades foram escolhidas porque são as que influenciam de forma significativa a vida das ferramentas, as forças e temperaturas da região de corte, o acabamento da peça usinada e a forma do cavaco. Estes gráficos são construídos por meio da normalização das propriedades de um material em relação às propriedades do outro considerado de boa usinabilidade, neste caso um aço com 0,45%C, para o qual todas as propriedades serão consideradas como tendo o valor igual a 1. Deste modo, quanto menor é a área ocupada no gráfico, melhor será a usinabilidade do material em questão.

Figura 5. Diagramas DTCR



Fonte: Adaptado de (KOIKE et al., (2009, apud FERREIRA; SIMÕES; RELVAS, 2014))

Assim a partir da Figura 5, é previsível um aumento das forças de corte durante a usinagem das ligas de titânio e cobalto se comparadas com as forças de corte necessárias para cortar o aço em questão, pois a dureza e a tensão de ruptura dos primeiros são bem maiores. Além disso, devido ao alongamento, o controle do cavaco para a liga de cobalto vai ser mais difícil enquanto para a liga de titânio vai ser mais fácil com respeito ao aço. (FERREIRA; SIMÕES; RELVAS, 2014)

Quando analisada a usinabilidade devido às propriedades térmicas, é muito provável que a temperatura de corte durante a usinagem das ligas de cobalto e titânio atinja valores muito superiores aos da usinagem do aço. Como a condutividade térmica destes materiais é baixa e será difícil retirar o calor da região de corte, podem se apresentar altas taxas de desgaste nas ferramentas, além, de uma baixa qualidade das superfícies usinadas, devido a tensões residuais e alterações na microestrutura e na dureza. (FERREIRA; SIMÕES; RELVAS, 2014).

Embora sejam poucos os trabalhos já publicados em relação à usinagem das ligas de cobalto, em seguida serão expostos os resultados obtidos por diferentes pesquisadores que permitem obter algumas informações prévias relacionadas com a usinabilidade destes materiais.

AYKUT et al., (2007) avaliaram o desgaste das ferramentas, as forças de corte e a morfologia do cavaco, durante o fresamento frontal a seco de uma superliga de cobalto empregando fresas de metal duro com e sem revestimento. Os resultados mostraram vida curta das ferramentas devido ao encruamento e às propriedades abrasivas da liga, assim como, acabamento ruim da peça usinada graças à geração de calor e à deformação plástica próprias deste material. Além disso, os autores também observaram que a usinabilidade destas superligas não melhora com a utilização de ferramentas novas, portanto para beneficiar o corte é necessário diminuir a profundidade de corte, a área de contato entre a ferramenta e o cavaco, e as velocidades de corte e avanço. Em adição os autores recomendaram a utilização de ferramentas com cobertura, já que o calor gerado na zona de corte incentiva a perda de afiação da aresta de corte devido às tensões térmicas.

De maneira similar SHOKRANI; DHOKIA; e NEWMAN, (2016), durante o fresamento de alta velocidade de uma liga a base de cobalto utilizada na fabricação de implantes dentários, observaram como a baixa condutividade térmica e a alta tendência ao encruamento do material dificultaram o processo da usinagem. Assim, a partir da comparação entre os diferentes ambientes estudados, os autores concluíram que para uma velocidade de corte de 200 m/min é mais efetivo o uso de criogenia e fluido abundante para refrigerar o processo em comparação com o MQL, o que ressalta a importância da refrigeração mais do que da lubrificação quando se usina este tipo de superliga.

Por outro lado, FERREIRA; SIMÕES; RELVAS, (2014), mediram a temperatura e as forças de corte durante o fresamento de duas ligas biomédicas muito utilizadas comercialmente na fabricação de próteses médicas, uma a base de titânio Ti-6Al-4V e a outra a base de cobalto Co-28Cr-6Mo. Os autores registraram que para todas as velocidades de corte testadas (50, 65, 80, 100 m/min) as forças de corte sempre foram maiores durante a usinagem da liga à base de cobalto. Os maiores esforços encontrados foram a uma velocidade de corte de 65 m/min devido à adesão do material da peça na aresta de corte, este fenômeno diminuiu com a mudança da velocidade de corte e, portanto, as forças de corte também decresceram. Por outro lado ocorreu um aumento da dureza para todas as amostras, além disto, no caso da liga de cobalto o aumento da velocidade de usinagem também aumentou a dureza obtida na superfície, enquanto para a liga de titânio os resultados da dureza com a

variação da velocidade de corte, não apresentaram diferenças significativas. Finalmente, o acabamento nas duas ligas foi similar e não se encontrou evidência de que o aumento da velocidade seja benéfico para diminuir a rugosidade.

Do mesmo modo, BARON et al., (2015) compararam a usinabilidade de uma liga de cobalto (ASTM F1537), empregada na indústria biomédica e conhecida por ser de difícil usinabilidade, com a tradicional liga de titânio Ti-6Al-4V. No decorrer dos ensaios foram medidas as forças de corte, se verificou o estado da aresta de corte e se avaliou o cavaco obtido. Os autores observaram que a energia específica de corte para usinar a liga de cobalto foi maior ou igual à energia necessária para usinar a liga de titânio, e ressaltaram que a morfologia do cavaco obtido para as duas ligas apresentou características de cavaco segmentado.

Em um trabalho posterior BARON e AHEARNE, (2017), fizeram outros ensaios com o objetivo de determinar os coeficientes para calcular as forças de corte da liga de cobalto ASTM F1537 e compará-las com as forças de corte necessárias para usinar a liga de titânio Ti-6Al-4V. A partir dos testes foi evidente que os esforços de corte aumentaram com o aumento da espessura de corte e para todos os casos os esforços foram maiores para a liga de cobalto. Além disso, durante a usinagem da liga ASTM F1537 perceberam um aumento acelerado tanto da força tangencial como da força de apoio quando eram utilizadas velocidades de corte altas e uma influência importante da espessura de corte empregada, o que foi atribuído ao encruamento deste material.

Além disso, estes autores também estudaram e determinaram os coeficientes para calcular as forças de corte da liga de cobalto ASTM F75 e fizeram uma comparação desta com a ASTM F1537 e com a liga de titânio Ti-6Al-4V (F136). Assim, AHEARNE e BARON, (2017) encontraram que as forças de corte medidas durante a usinagem do material F75 foram maiores quando comparadas com as dos outros dois materiais. Para a velocidade de 20 *m/min* os esforços foram entre 30 e 60% maiores em relação à F136 e entre 20 e 40% no tocante à F1537, por outro lado para a velocidade de 60 *m/min* os esforços foram maiores entre 60 e 80% em relação à F136 e entre 20 e 40% no tocante à F1537. Além disso, quando comparadas as duas ligas de cobalto, a liga F75 apresentou durezas e resistências maiores (entre 18 e 52%). Finalmente os autores notaram uma mudança da

morfologia do cavaco quando utilizaram espessuras de corte entre 60 e 80 μm a uma velocidade de 40 m/min .

Num trabalho posterior, BARON e AHEARNE, (2018) estudaram os mecanismos fundamentais da formação de cavaco na usinagem da liga biomédica ASTM F75. Para isto realizaram um experimento fatorial completo para avaliar a dependência da morfologia do cavaco quando eram variados fatores como a espessura teórica do cavaco e a velocidade de corte. Como resultado obtiveram que a segmentação do cavaco, a frequência de segmentação e o ângulo de deformação deste são fortemente dependentes dos parâmetros de controle e também do tamanho do grão do material. Em todos os níveis estudados se evidenciou a presença de cavaco dente de serra e houve indícios de que a fratura foi fundamental para o mecanismo de formação do cavaco.

BORDIN et al., (2014) em conformidade com os autores anteriores tornearam duas ligas de cobalto, uma produzida por manufatura aditiva e outra forjada, e afirmam que estas ligas de cobalto apresentam altas taxas de encruamento que se incrementam com o aumento dos parâmetros de corte. Além disso, eles concluíram que o processo de torneamento, para a liga produzida por forjamento, causou refinamento dos grãos e deformação da camada subsuperficial.

Por outro lado, em pesquisas relacionadas com o desgaste das ferramentas como a desenvolvida por AHEARNE et al., (2016) em que foi avaliado o desgaste durante o fresamento da liga ASTM F75, observou-se um desgaste de flanco progressivo e avarias como lascamento e quebra da aresta. Uma outra pesquisa deste tipo é a de MCPARLAND et al., (2017), para a qual foi projetado um conjunto de experimentos que permitisse a estimativa do desgaste das ferramentas a partir do avanço e da velocidade de corte, utilizando um modelo de processo Gaussiano hierárquico Bayesiano. Os resultados mostraram que as taxas de desgaste nas ferramentas não têm um comportamento linear e o modelo utilizado permitiu identificar parâmetros de corte experimentais que poderiam otimizar a vida da ferramenta. Foi observada adesão do material da peça tanto na superfície de saída quanto na superfície de folga das ferramentas, e em adição, quando testadas velocidades de corte altas, as ferramentas apresentaram lascamento na aresta de corte.

Para dar continuidade à última pesquisa aqui exposta, BARON; DESMOND e AHEARNE, (2019) buscaram estudar de forma mais aprofundada os mecanismos de desgaste presentes durante o torneamento da liga ASTM F75, utilizando ferramentas de metal duro sem cobertura. A partir dos resultados obtidos propuseram uma hipótese de que o mecanismo de desgaste primário acontece porque os carbonetos de tungstênio são arrancados da ferramenta com o fluxo do cavaco devido ao cobalto do material sendo usinado ficar diluído no metal duro. Além disso, como mecanismo de desgaste secundário aparece a abrasão que depende das condições do processo como temperatura e pressão específica de corte.

De acordo com o já falado por todos estes autores, AKBAR et al., (2017) fizeram uma revisão bibliográfica sobre a usinabilidade das ligas de cobalto e concluíram que a usinagem deste tipo de material está enfrentando muitos desafios e dificuldades, devido principalmente às propriedades que os fazem tão interessantes para as aplicações biomédicas e da indústria aeroespacial, sua resistência mecânica e a resistência ao desgaste inclusive em altas temperaturas.

Adicionalmente, o estudo da integridade superficial das ligas de cobalto utilizadas na indústria biomédica é de grande interesse porque esta é crítica na hora de garantir a qualidade e a segurança ao usuário final.

Assim, a superfície acabada de qualquer componente, do ponto de vista da engenharia, está influenciada pelos diferentes processos físicos e químicos que foram atravessados para a obtenção da peça, pois são estes os que finalmente fornecem as propriedades funcionais da superfície. (GRZESIK, 2017).

Dessa maneira, as características obtidas na superfície são particularmente diferentes do que às do núcleo do material. Essa diferença pode ser observada na microestrutura e no comportamento mecânico da peça, em propriedades como resistência à corrosão/oxidação, redução do coeficiente de atrito, resistência à fadiga, dureza, isolamento térmico, entre outros. Consequentemente, o estudo da integridade superficial obtida a partir de processos de usinagem, oferece informação relacionada com o desempenho futuro da peça que está sendo fabricada. (DAVIM, 2010).

Dessa forma, autores como Bordin; Bruschi; Ghiotti, (2014) estudaram os efeitos da velocidade de corte e do avanço na integridade superficial da liga ASTM

F1537 durante o torneamento a seco, com o intuito de diminuir a quantidade de etapas de limpeza para retirar os resíduos de fluido das peças. Estes autores encontraram que o avanço é o parâmetro que mais influencia a rugosidade enquanto o aumento da velocidade de corte propicia a obtenção de superfícies mais uniformes. Em adição, após a análise de difração por raios X observaram que todas as condições de corte ensaiadas geraram tensões residuais compressivas na superfície do material devido à alta taxa de deformação e que o aumento da velocidade de corte tinha um efeito reverso a esta condição devido ao aumento da temperatura de corte.

De outra parte, Yingfei; Muñoz De Escalona; Galloway, (2017), fresaram uma liga a base de cobalto conhecida como Stellite 6 e avaliaram a influência dos parâmetros de corte e do desgaste da ferramenta na integridade superficial obtida. Eles concluíram que os parâmetros de corte têm uma influência maior do que o desgaste no estado da superfície, porém o incremento do desgaste produz a alongação dos grãos que estão próximos da superfície usinada, também observaram que quando aumentavam o tempo de corte as tensões que originalmente eram compressivas passaram a ser trativas.

Karpuschewski; Döring, (2016), de forma similar, analisaram a influência de diferentes classes de cerâmicas e diferentes geometrias de ferramentas, na vida destas e na integridade superficial de uma liga de cobalto usada na fabricação de cabeças femorais. Esses autores obtiveram os seguintes resultados, no quesito da integridade superficial, quando era mantido o mesmo inserto e testado em diferentes velocidades de corte, as forças de corte eram menores à medida que a velocidade de corte aumentava o que fazia com que não fosse afetada na mesma profundidade a camada superficial. Com respeito à vida da ferramenta, os autores recomendaram a utilização de ferramentas com pequenos raios de aresta e pequenos chanfros, mas com ângulos de chanfro grandes.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 Equipamentos

Os equipamentos que seguem fazem parte do Laboratório de Usinagem da Faculdade de Engenharia Mecânica da UNICAMP.

Quadro 7. Equipamentos utilizados nos ensaios

Máquina-ferramenta	Os ensaios foram realizados no centro de usinagem vertical modelo SV-40 de três eixos, do fabricante Mori Seiki. A máquina-ferramenta tem 22 kW de potência, uma rotação máxima de 12.000 RPM e está equipada com o comando CNC GE Fanuc MSC-518. Durante a usinagem foi utilizado o fluido de corte VASCO 6000 da Blaser, em uma proporção de 10% de óleo e 90% de água. Foi utilizada refrigeração convencional.
Microscópio óptico	O acompanhamento do desgaste das ferramentas foi realizado utilizando um microscópio óptico Quimis Q714ZT2 conectado a uma câmera digital Motic de 1.3 megapixels. A aquisição e o processamento das imagens foram feitos com o software Motic Image plus da mesma câmera.
Dinamômetro	Para a medição dos sinais de força foi utilizado um dinamômetro piezoelétrico KISTLER modelo 9257B e um amplificador multicanal KISTLER modelo 5019B. Os dados dos sinais brutos foram coletados por meio do software LabVIEW e posteriormente tratados com Python.
Rugosímetro	Os valores das rugosidades obtidas durante os ensaios foram medidos utilizando o rugosímetro portátil Mitutoyo modelo Surftest SJ-201P.

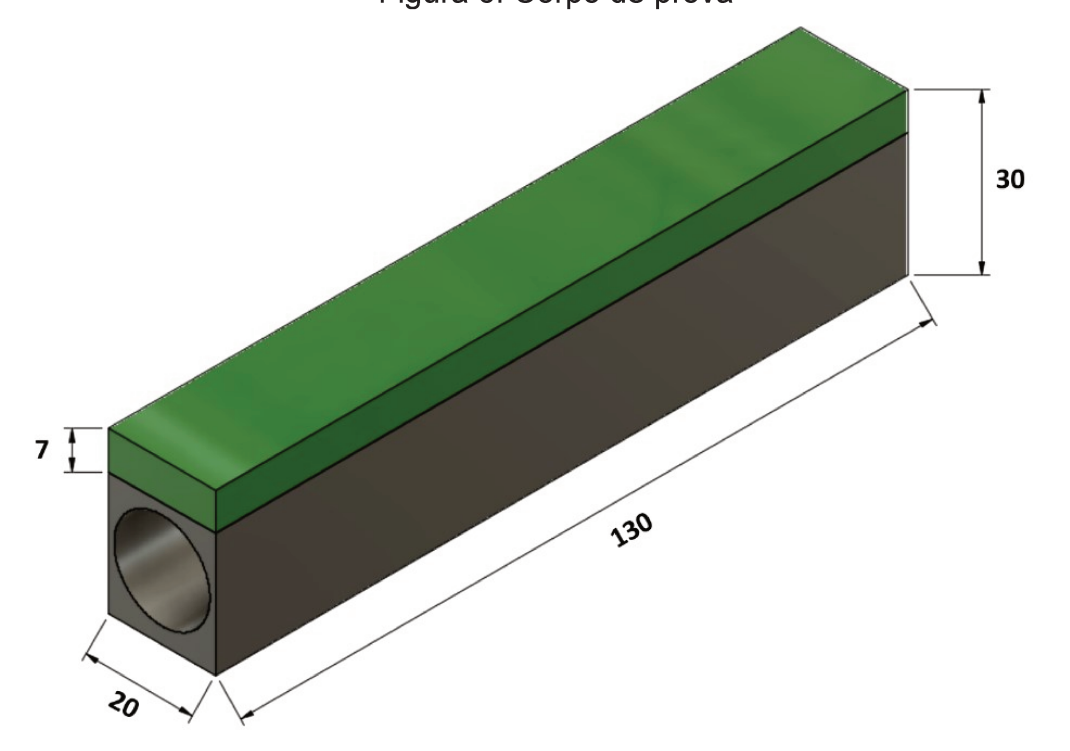
Fonte: Autora

3.2 Materiais e ferramentas

3.2.1 Corpos de prova

Os corpos de prova utilizados foram obtidos por microfusão e correspondem aos canais principais das árvores para fundição das próteses. Após a fundição o material foi preparado e os canais ficaram com formato de prisma retangular reto, porém só era aproveitável a parte superior destes devido a um furo que estes apresentavam na parte inferior. Para entender melhor o corpo de prova, este é mostrado na Figura 6, todas as dimensões estão em *mm*, o volume assinalado com a cor verde corresponde ao volume usinado durante os ensaios. O material não foi submetido a nenhum tratamento térmico.

Figura 6. Corpo de prova



Fonte: Autora

Nos seguintes quadros são apresentadas a composição química da liga utilizada durante os testes, assim como as propriedades mecânicas medidas a partir do ensaio de tração. Essas informações foram fornecidas pela empresa doadora do material.

Quadro 8. Composição química da liga utilizada nos ensaios, % em massa

Elemento	%	Elemento	%
Cr	28,268	P	0,002
Mo	5,793	S	0,003
Ni	0,341	N	0,160
Fe	0,315	Al	0,000
C	0,177	Ti	0,001
Si	0,735	B	0,002
Mn	0,511	Co	63,463
W	0,129	V	0,009
Cu	0,009	Nb	0,003
Sn	0,003	Zr	0,078

Fonte: Empresa doadora dos corpos de prova

Quadro 9. Propriedades mecânicas da liga utilizada nos ensaios

Propriedade	Unidades	ASTM F75
Resistência à tração	[MPa]	730,03
Limite de escoamento	[MPa]	519,63
Alongamento à ruptura	[%]	18,85

Fonte: Empresa doadora dos corpos de prova

3.2.2 Ferramentas de corte

Para os testes foram utilizadas fresas de topo de metal duro classe K30-K40 (CTS30D da Ceratizit) com dois revestimentos PVD diferentes, AlTiN e AlCrN. As ferramentas foram fornecidas pela empresa RODER Ferramentas Industriais e revestidas pela Oerlikon Balzers.

As fresas tinham um diâmetro de 8 mm, comprimento total de 50 mm e comprimento útil de 10 mm, apresentavam raio de ponta de 1 mm, possuíam 4 arestas de corte e o ângulo de hélice era de 30°.

Figura 7. Fresas de topo de metal duro revestido usadas nos testes



Fonte: Autora

As principais propriedades físicas dos revestimentos empregados são apresentadas no Quadro 10.

Quadro 10. Especificações técnicas revestimentos

Material	AlTiN	AlCrN
Cor do revestimento	Cinza-violeta	Cinza-claro
Dureza do revestimento [GPa]	33 +/- 3	38 +/- 3
Temperatura máx. de operação [°C]	900	> 1100

Fonte: (OERLIKON BALZERS, 2019)

3.3 Planejamento experimental

Com o intuito de avaliar os dois tipos de revestimento propostos e pesquisar os mecanismos de desgaste das ferramentas, assim como as forças de corte e as rugosidades obtidas durante a usinagem da liga de Co-Cr-Mo ASTM F75, foi proposta a realização de um experimento fatorial completo de três fatores em dois níveis. Esse tipo de experimento permite explorar todas as combinações possíveis dos níveis dos fatores propostos e avaliar os efeitos principais das variáveis, bem como as interações entre essas e os termos de erro. (MONTGOMERY, 2018). Como

fatores selecionaram-se o revestimento da ferramenta, o avanço por dente e a velocidade de corte.

A escolha desses fatores decorreu dos conceitos básicos da usinagem e das possíveis hipóteses que podem ser propostas a partir destes. Em vista disso, a velocidade de corte é um parâmetro que influencia os diferentes mecanismos de desgaste presentes no processo, como a abrasão, oxidação e difusão, pois com o aumento da velocidade de corte e consequentemente da temperatura, as propriedades mecânicas das ferramentas diminuem deixando-as mais susceptíveis tanto ao desgaste como às avarias, estas últimas também incentivadas pelo aumento da força de impacto da aresta de corte com o material. (DINIZ; MARCONDES; COPPINI, 2014).

Por outro lado o avanço por dente é uma grandeza que não é diretamente proporcional à potência consumida. Pois quando esse sobe, a pressão específica de corte diminui devido a dois fenômenos principalmente, o primeiro é o aumento da velocidade de avanço que torna o corte mais dinâmico devido à diminuição do coeficiente de atrito; o segundo fenômeno que acontece, é a diminuição do fluxo lateral de cavaco pois um maior volume de material está sendo transformado em cavaco realmente. (DINIZ; MARCONDES; COPPINI, 2014).

Além da contribuição à variação da potência de corte, o avanço por dente também contribui de maneira significativa para o acabamento das superfícies fresadas. Dado que a rugosidade real de uma superfície depende principalmente de três fatores: a deformação plástica do material, a presença de vibrações e uma contribuição geométrica, neste último têm influencia o avanço por dente e o raio de ponta da aresta de corte como pode ser observado na Equação (1). (DINIZ; MARCONDES; COPPINI, 2014; MACHADO et al., 2009).

$$R_{a(teor)} = 0,5 \left(r_{\varepsilon} - \sqrt{r_{\varepsilon}^2 - 0,25 f_z^2} \right) \quad (1)$$

Por fim, o revestimento das ferramentas também foi proposto como fator experimental, pois hoje em dia mais da metade das ferramentas de metal duro com geometria definida são cobertas com camadas de materiais duros. O que melhora

suas propriedades principalmente em termos de dureza a quente e como mencionado anteriormente a liga ASTM F75 é considerada difícil de cortar, devido entre vários fatores a sua baixa condutividade térmica.

Para definir os níveis dos fatores escolhidos e também dos parâmetros de corte a usar, foi tomada informação de pesquisas similares como a de Ahearne et al., (2016); Baron et al., (2015) e Ferreira; Simões e Relvas, (2014), ver Quadro 11, que já usinaram este material utilizando fresas de topo de metal duro. Em adição, foram seguidas as recomendações dos fabricantes de ferramentas, como a utilização de velocidades de corte entre 40 e 60 m/min pois esses são os valores normalmente utilizados industrialmente na usinagem deste tipo de liga. Também foi considerada uma experiência prévia fresando esta liga (BLUM GARCÍA et al., 2019), e os resultados de três ensaios preliminares sob as mesmas condições em que iam ser feitos os ensaios finais.

Quadro 11. Parâmetros de corte da bibliografia

Publicação	Revestimento ferramentas	Características fresas de topo	v_c	f_z	a_p	a_e
			[m/min]	[mm]	[mm]	[mm]
(FERREIRA; SIMÕES; RELVAS, 2014)	TiAlN PVD	$\varnothing = 8 \text{ mm}$ 4 arestas	50	0,02	1	6
			65			
			80			
			100			
(AHEARNE et al., 2016)	TiAlN PVD	$\varnothing = 8 \text{ mm}$ 6 arestas	20	0,015	2	2,4
			60			
(BARON et al., 2015)	TiAlN PVD	$\varnothing = 8 \text{ mm}$ 6 arestas	45	0,014	1	4
			60	0,028		
			75	0,056		

Fonte: (AHEARNE et al., 2016; BARON et al., 2015; FERREIRA; SIMÕES; RELVAS, 2014; NARAYAN, 2009)

Assim, em ensaios preliminares foram testadas velocidades de corte de 60, 90, 110 e 120 m/min em conjunto com um avanço por dente fixo de 0,02 mm e fresas revestidas com AlTiN por ser a cobertura que apresenta as menores propriedades físicas e mecânicas se comparado com o revestimento de AlCrN. Foi realizada uma

réplica só para cada condição e o propósito destes testes foi determinar qual seria a melhor faixa de velocidades de corte para os testes definitivos.

Com a velocidade de corte de 60 m/min foi removido um volume de cavaco igual a 15.456 mm^3 e o valor do desgaste de flanco V_B máximo obtido foi de 0,0726 mm. Como esse desgaste é praticamente imperceptível e essa quantidade de material corresponde ao volume total de um dos 14 corpos de prova disponíveis para os testes, decidiu-se interromper esse ensaio e experimentar uma velocidade de corte maior.

Desse modo, a segunda velocidade de corte a ser testada foi a de 120 m/min, inicialmente foram removidos 2.436 mm^3 de sobremetal e o valor do desgaste de flanco obtido foi de 0,121 mm, como o critério de fim de vida foi definido para um desgaste de flanco de 0,2 mm se deu continuidade ao ensaio. Mas no começo do ensaio a presença de faíscas tornou-se muito intensa e o ensaio foi detido antes de que ferramenta retirasse muito material. Após retirar a fresa, esta estava toda lascada.

A terceira velocidade testada foi a de 90 m/min, foram retirados 16.380 mm^3 e o V_B máximo foi de 0,23 mm. Nesse ensaio já foi possível observar o aumento progressivo do desgaste de flanco.

Realizou-se um último teste utilizando uma velocidade de corte de 110 m/min a fim de melhorar o comportamento brusco que apresentou a fresa quando estava cortando com a velocidade de corte de 120 m/min. A ferramenta chegou em 0,169 mm de desgaste de flanco após retirar 4.706 mm^3 . Os resultados obtidos foram um pouco melhores pois permitiu acompanhar o desgaste de flanco de forma menos acelerada.

Enquanto ao avanço por dente não se fizeram testes adicionais variando os níveis deste, a definição do parâmetro se fundamentou principalmente nas recomendações do fabricante das ferramentas e portanto dos avanços por dente utilizados normalmente a nível industrial. Já a profundidade de corte radial a_e foi definida de forma que o centro da fresa ficasse dentro dessa largura e que o contato entre a ferramenta e o material fosse favorável.

Dessa forma, a partir dos resultados obtidos nos ensaios prévios e da informação fornecida por outros autores foram ajustados os níveis dos fatores propostos para os ensaios segundo o apresentado no Quadro 12.

Quadro 12. Fatores e níveis utilizados

Fatores	Símbolo	Unidade	Níveis	
			Menor	Maior
Revestimento	-	-	AlTiN	AlCrN
Avanço por dente	f_z	mm	0,02	0,03
Velocidade de corte	v_c	m/min	90	110

Fonte: Autora

Todas as combinações possíveis dos fatores nos níveis propostos foram realizadas com duas réplicas, resultando assim em 16 ensaios. Utilizando Excel foi estabelecida a ordem aleatória para a realização dos testes. As condições a serem testadas e a ordem dos ensaios é apresentada no Quadro 13.

Durante todos os ensaios foram utilizadas a mesma profundidade radial a_e de 5,6 mm que corresponde a 70% do diâmetro da fresa, e a mesma profundidade axial a_p de 1 mm.

Quadro 13. Condições ensaios

Condição	Ordem de Execução	Fatores		
		Revestimento	Avanço por dente	Velocidade de corte
C1	5	AlTiN	0,02	90
C2	2	AlCrN	0,02	90
C3	10	AlTiN	0,03	90
C4	11	AlCrN	0,03	90
C5	9	AlTiN	0,02	110
C6	13	AlCrN	0,02	110
C7	6	AlTiN	0,03	110
C8	3	AlCrN	0,03	110
C9	15	AlTiN	0,02	90
C10	14	AlCrN	0,02	90
C11	1	AlTiN	0,03	90
C12	8	AlCrN	0,03	90
C13	4	AlTiN	0,02	110
C14	16	AlCrN	0,02	110
C15	12	AlTiN	0,03	110
C16	7	AlCrN	0,03	110

Fonte: Autora

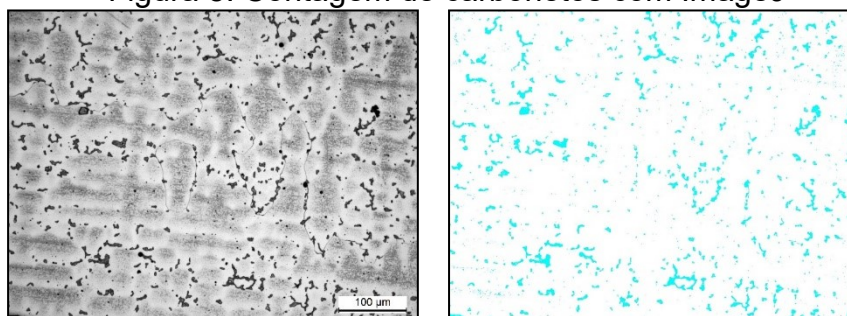
3.4 Procedimento experimental

3.4.1 Análise metalográfica e quantificação de partículas abrasivas da liga

Prévio à usinagem foram preparadas quatro amostras a fim de caracterizar o material a ser usinado. Dessa forma, no Laboratório Multiusuário de Caracterização de Materiais da Faculdade de Engenharia Mecânica da UNICAMP foram retiradas porções de material com 5 X 7 X 5 *mm* utilizando a serra de disco. Após isso o material foi embutido em baquelite para facilitar o manuseio. Em seguida se realizaram várias etapas de lixamento e polimento até que a superfície ficasse com qualidade suficiente para as análises posteriores. Por fim as amostras foram submetidas a um ataque eletrolítico com ácido oxálico (10 g ácido oxálico em 100 *ml* água) e uma tensão de 6 volts durante 7 segundos. Finalmente as amostras foram levadas ao microscópio eletrônico de varredura e ao microscópio óptico para explorar o material.

Para determinar a porcentagem de partículas abrasivas presentes no material foi utilizado o software ImageJ. Primeiro, foram tiradas duas fotos com uma ampliação de 100 vezes no microscópio óptico MD IL LED da Leica. Em seguida, após o tratamento necessário da imagem no software (calibração do tamanho, calibração do limite das cores) se utilizou a função de contagem de partículas e se determinou a porcentagem da área total ocupada pelos carbonetos e o tamanho médio de cada um desses em μm^2 . Ver Figura 8.

Figura 8. Contagem de carbonetos com ImageJ

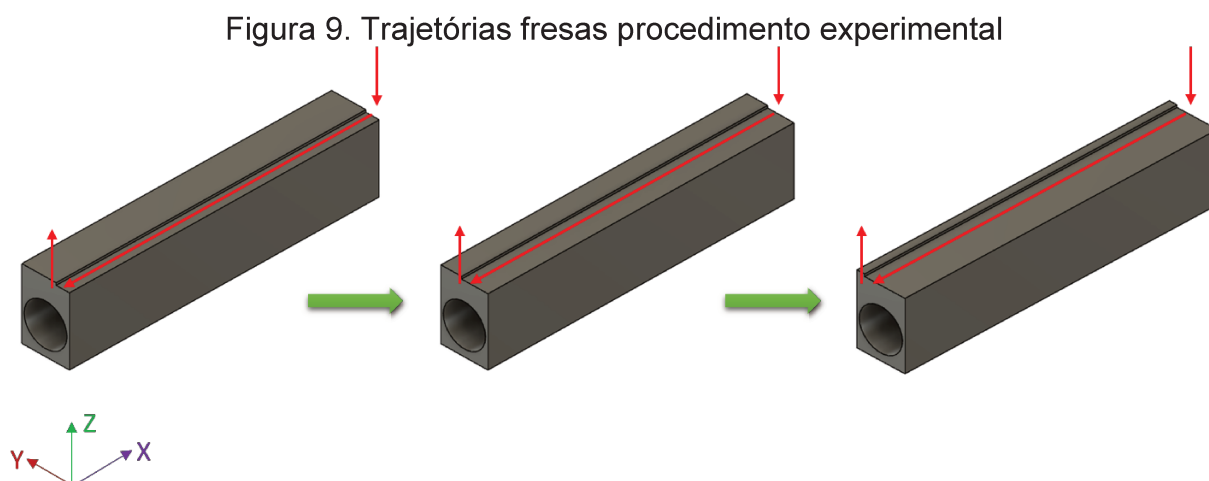


Fonte: Autora

3.4.2 Ensaios de vida e medição do desgaste de flanco

Durante os testes preliminares se determinou o volume de cavaco que era necessário remover para que as fresas apresentassem um desgaste de flanco perceptível. Assim sendo, eram realizadas de 3 a 6 passadas que correspondem a um volume de sobremetal removido de 2.184 a 4.368 mm³, dependendo da velocidade de corte sendo estudada. As trajetórias que seguiram as ferramentas durante os ensaios são mostradas na Figura 9.

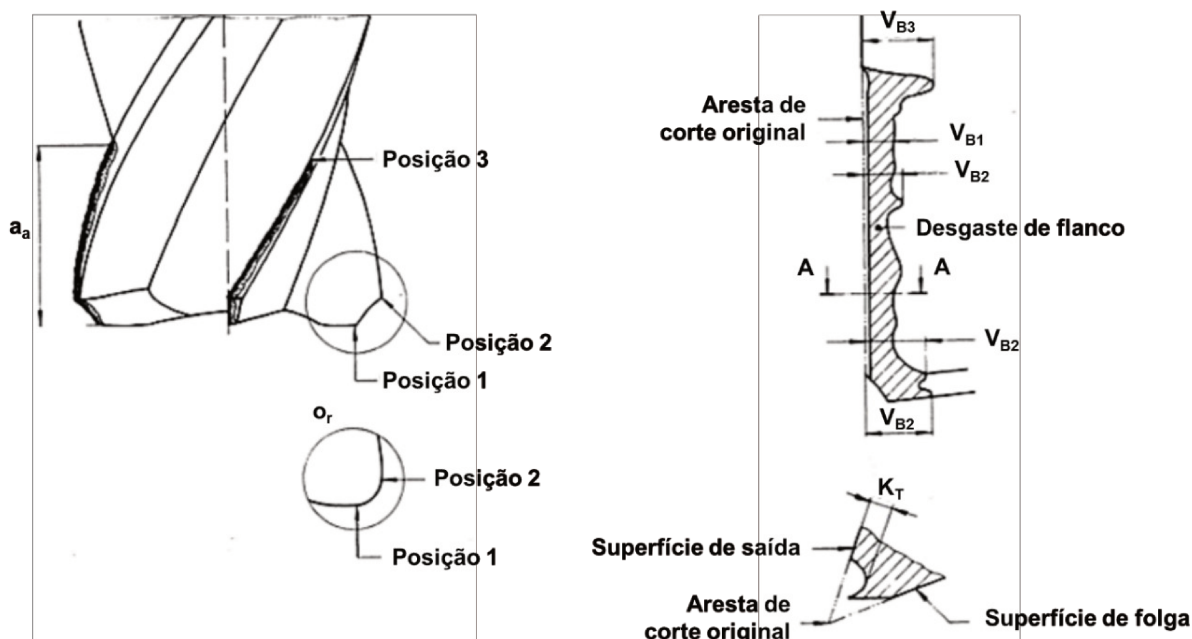
Em seguida a ferramenta era retirada para tirar as fotos correspondentes das superfícies de folga das quatro arestas, imediatamente se media o desgaste de flanco na superfície de folga das fresas e o valor do V_B máximo obtido entre as quatro arestas era adotado como o valor do desgaste para esse ponto. Esse procedimento foi realizado até que era alcançado o V_B de 0,2 mm ou até quando se suspeitava a quebra iminente da ferramenta.



Fonte: Autora

Conforme a Norma ISO 8688-2 (INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION, 2016), o desgaste de flanco deve ser medido na superfície de folga e em direção perpendicular à aresta de corte original, é importante observar se o desgaste é uniforme ou se apresenta variações para medir essas variações também.

Figura 10. Medição de desgaste em fresas de topo



Fonte: Adaptado de (INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION, 2016)

Na Figura 10 é ilustrada a forma de realizar a medição do desgaste nas fresas de topo. Na superfície de folga mensura-se o desgaste de flanco V_B e na superfície de saída a profundidade da cratera K_T .

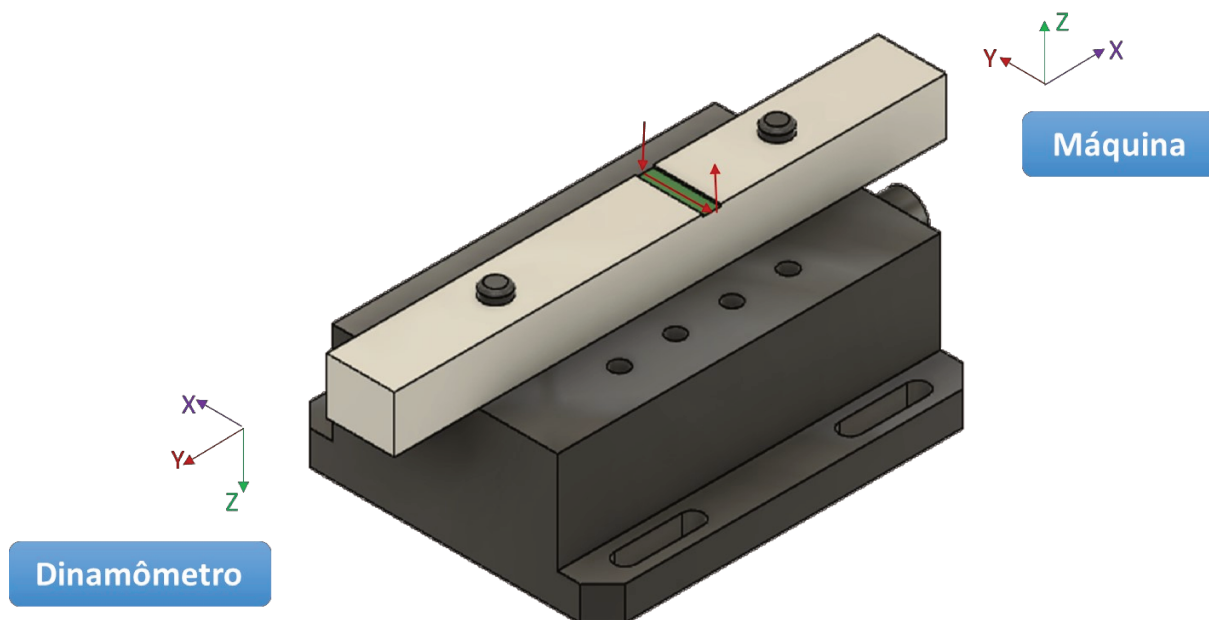
3.4.3 Aquisição do sinal de força

Para a aquisição dos sinais das forças de corte utilizou-se o mesmo corpo de prova para todas as condições. Para a medição era feito um canal de comprimento de 30 mm, a profundidade axial sempre foi de 1 mm, a velocidade de corte e o avanço por dente dependiam da matriz de ensaios do experimento proposto. A trajetória da ferramenta é apresentada na Figura 11.

Desta forma, os dados das forças foram obtidos para a maioria das condições testadas com as ferramentas novas, depois quando as ferramentas apresentaram um desgaste de flanco próximo de 0,1 mm e por fim quase no final da vida das

ferramentas, para algumas condições só foi possível esse procedimento com a ferramenta quando esta estava nova.

Figura 11. Aquisição dos sinais forças de corte



Fonte: Autora

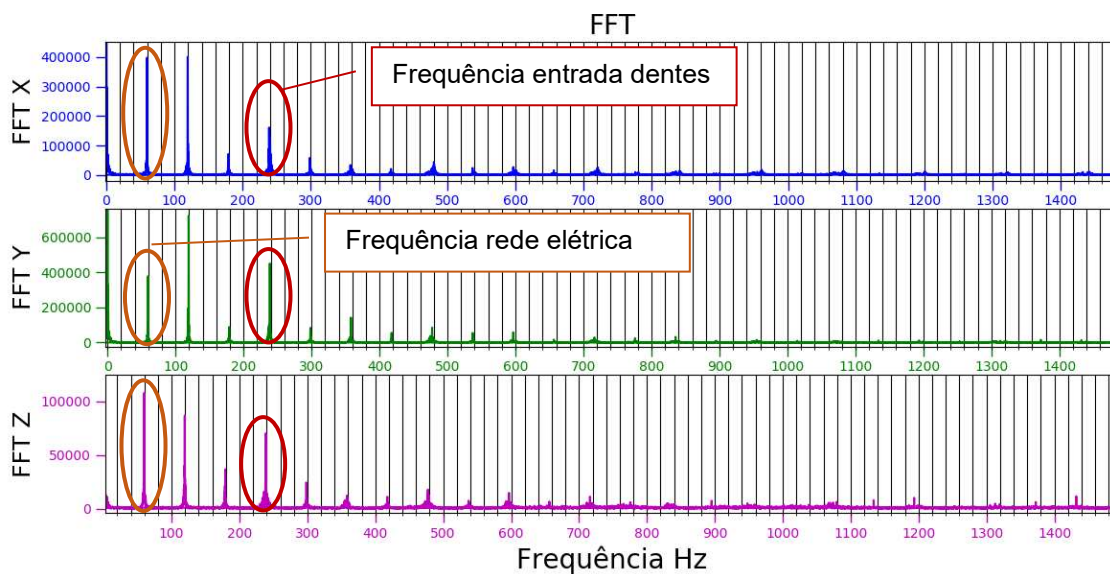
A taxa de aquisição de dados usada foi de 5.000 Hz, respeitando o teorema de Nyquist/Shanon que ajuda a determinar a taxa de amostragem que deve ser utilizada para ter uma boa representação do sinal. (VIEIRA, 2020).

Para fazer as análises posteriores, todos os sinais brutos foram filtrados usando um filtro Butterworth passa banda que só permite o passo dos sinais que estão dentro de uma faixa de frequência determinada.

Essa faixa foi definida a partir da aplicação da transformada rápida de Fourier FFT aos sinais mensurados e levando em conta as frequências de entrada de dentes que para a velocidade de corte de 110 *m/min* foi igual a 292 Hz e para a velocidade de corte de 90 *m/min* foi de 239 Hz. Assim, neste caso particular foram removidas as frequências abaixo dos 150 Hz, como a da rede elétrica 60 Hz, e as frequências acima dos 1500 Hz.

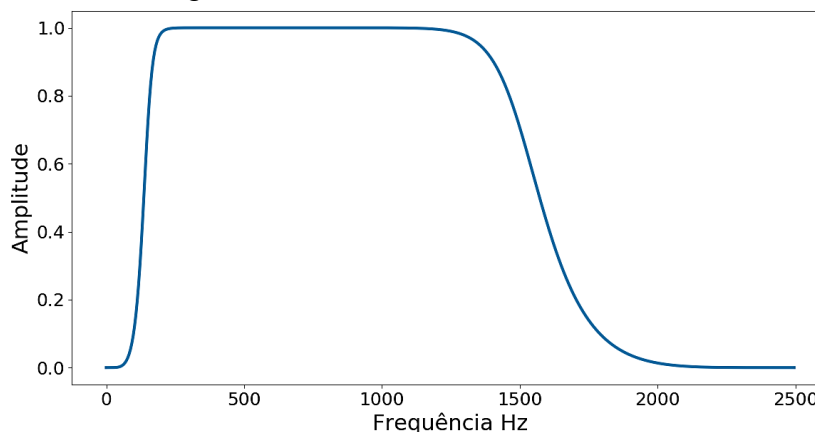
Nas Figura 12 e Figura 13 são apresentados os resultados da aplicação da FFT para um dos sinais obtidos e o filtro Butterworth utilizado.

Figura 12. FFT sinais de força condição 1, $v_c = 90 \text{ m/min}$



Fonte: Autora

Figura 13. Filtro Butterworth utilizado



Fonte: Autora

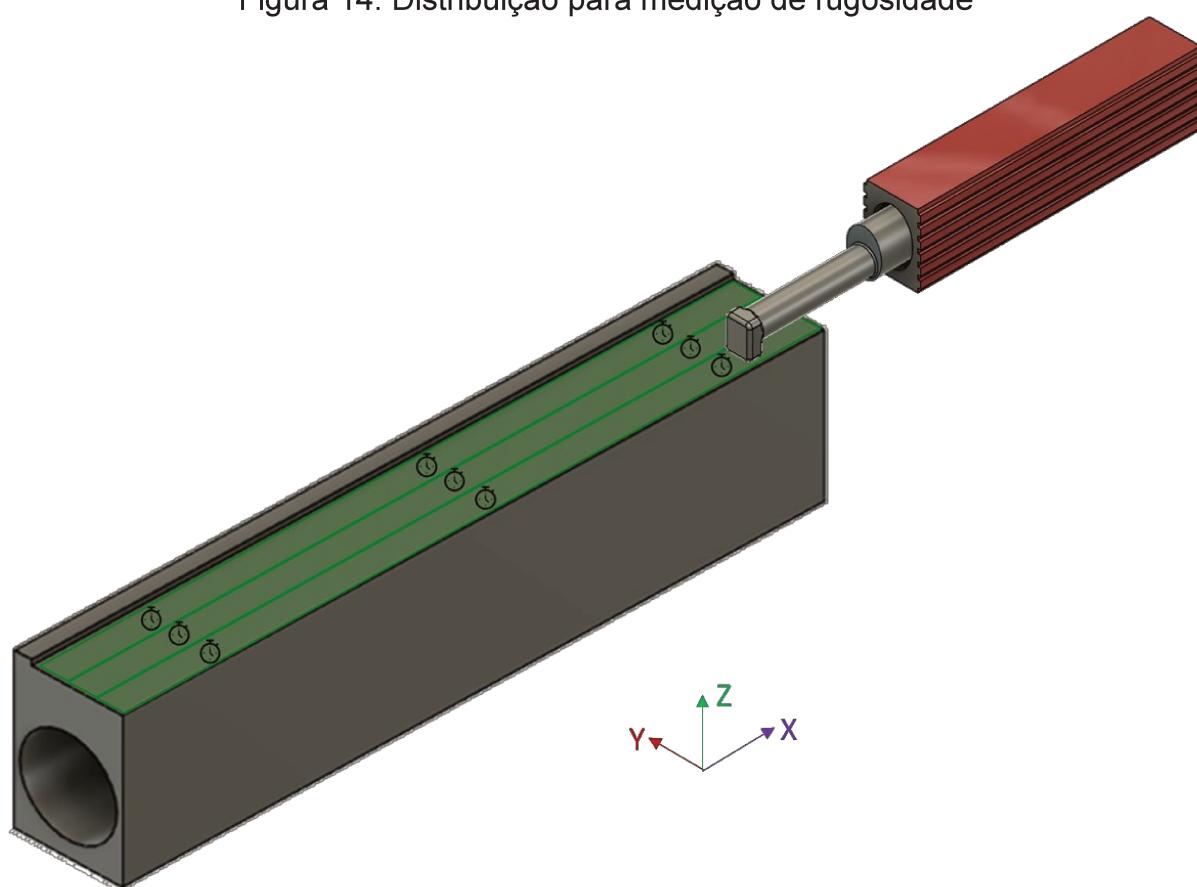
3.4.4 Medição de rugosidade

Após a realização de 3 a 6 passadas, que correspondem a um volume de sobremetal removido de 2.184 a 4.368 mm³, a ferramenta era retirada para avaliação do desgaste e era realizada a medição da rugosidade do corpo de prova que ficava preso na máquina-ferramenta.

A distribuição dos pontos de medição de rugosidade e a posição do apalpador são mostrados na Figura 14, os relógios do gráfico representam a posição de mensuração.

Na entrada e na saída tomou-se o cuidado de fazer a medição após a estabilização do corte. Assim como para todas as posições de fazer a medição na região central do passe de modo que a rugosidade obtida correspondesse à deixada pelo valor do avanço por dente definido.

Figura 14. Distribuição para medição de rugosidade



Fonte: Autora

3.4.5 Identificação dos mecanismos de desgaste das ferramentas

Após a realização de todos os ensaios, todas as fresas foram levadas para fazer análise por microscopia eletrônica de varredura (MEV) e espectroscopia de

energia dispersiva (EDS) visando obter uma ideia mais clara de quais foram os mecanismos de desgaste presentes e predominantes.

O equipamento utilizado foi um microscópio ZEISS modelo EVO MA15 que faz parte do Laboratório de Microscopia Eletrônica de Varredura da Faculdade de Engenharia Mecânica da UNICAMP.

3.4.6 Medição do raio da aresta de corte

Os raios de todas as arestas de corte foram medidos utilizando microscopia confocal no equipamento Alicona Infinite Focus SL, pertencente ao Laboratório de Processos de Fabricação do Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade Federal de São Carlos.

Para a aquisição das imagens foi utilizada uma lente com ampliação objetiva de 10 vezes. Os raios foram obtidos a partir do perfil da aresta que resultava da medição de 100 contornos consecutivos de uma área selecionada.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

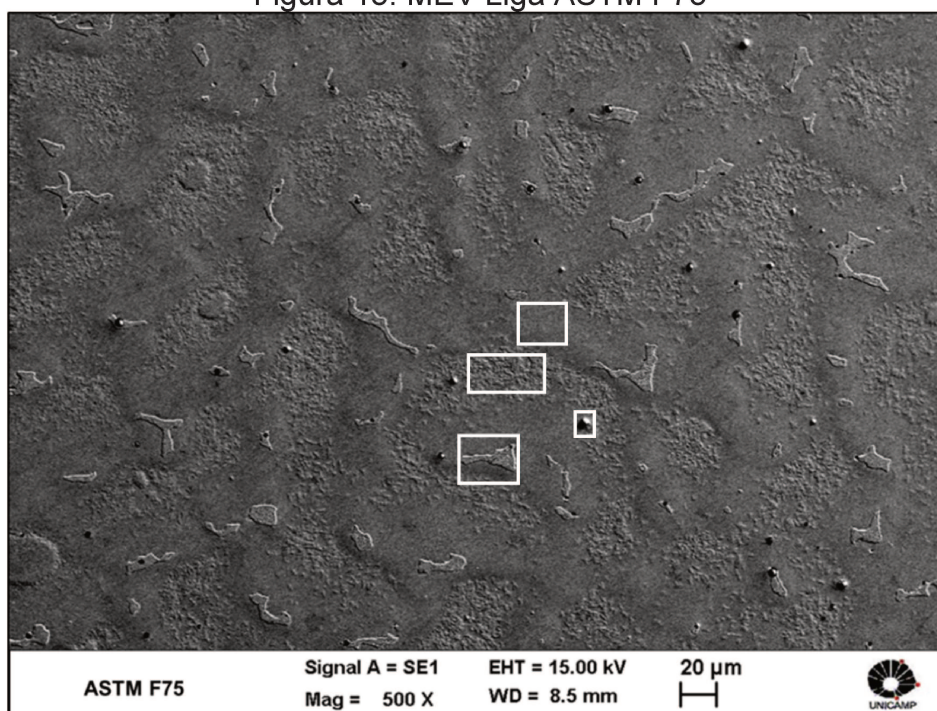
4.1 Avaliação da usinabilidade da liga ASTM F75

Como dito anteriormente na revisão bibliográfica, a usinabilidade de um material é uma grandeza tecnológica determinada a partir da comparação das propriedades físicas e mecânicas desse material com as de um material padrão. Esse material padrão geralmente apresenta boa usinabilidade.

Assim, para fazer a análise da usinabilidade da liga ASTM F75 serão comparadas as propriedades desta liga com as de um aço 1045, um aço de baixa liga e com um teor de carbono ideal em termos de usinabilidade.

As propriedades da liga ASTM F75 foram obtidas a partir da análise metalográfica da liga antes da usinagem e da informação fornecida pelo fabricante da liga. Os dados do aço 1045 para fazer a comparação entre os dois materiais foram tomados das pesquisas de GALLO, (2006) e LI et al., (2019).

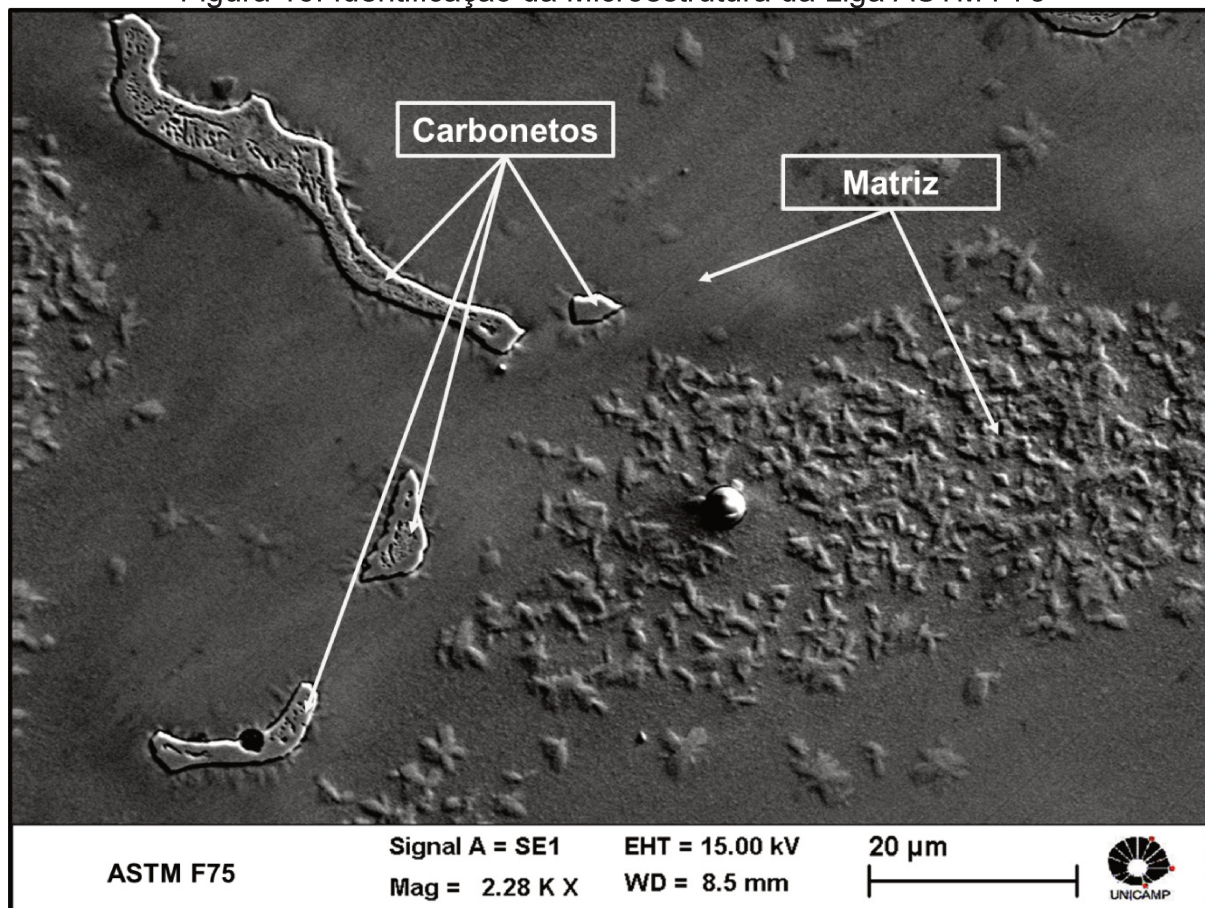
Figura 15. MEV Liga ASTM F75



Fonte: Autora

Como pode ser observado na Figura 15 é possível diferenciar quatro tipos de formações no material (retângulos brancos). Assim sendo, foi realizada uma análise de espectroscopia por dispersão de energia (EDS) para identificar a composição química de tais estruturas e poder definir quais são os carbonetos e quais a matriz.

Figura 16. Identificação da Microestrutura da Liga ASTM F75



Fonte: Autora

Na Figura 16 são apresentados os resultados obtidos durante o EDS. Para a análise foram escolhidos 7 pontos, as estruturas marcadas como carbonetos na imagem apresentaram altos conteúdos de cromo e de molibdênio e baixa quantidade de cobalto se comparados com a porcentagem que estes devem apresentar em geral no material, o que é um indicativo para definir os carbonetos sendo que a leitura do carbono no equipamento utilizado não é confiável por causa do peso atômico deste. Por outro lado, os pontos enunciados como matriz, mostraram uma composição muito similar à da liga, sendo 60% de cobalto, 28% de

cromo e 6% de molibdênio. Finalmente, foi analisada a estrutura esférica que aparece no meio da imagem, mas os resultados mostraram que esta é composta principalmente por manganês e silício, razão pela qual se prevê que é material que não se diluiu completamente durante o processo da fusão.

A partir dessa identificação foi possível determinar a quantidade de carbonetos por unidade de área presentes no material assim como o tamanho destes. Isto para estimar a abrasividade desta liga seguindo a abordagem proposta por STAHL et al., (2012) que também propõe a quantificação dos elementos da liga que são capazes de formar carbonetos como uma alternativa para definir a abrasividade do material.

Os resultados obtidos para a área ocupada pelos carbonetos são apresentados no Quadro 14, no qual se determina a média para as duas amostras e se determinam os valores do desvio padrão e do coeficiente de variação. Na Figura 17 são mostrados os histogramas que indicam a distribuição dos carbonetos por tamanho na liga sendo estudada.

Quadro 14. Área ocupada pelos carbonetos

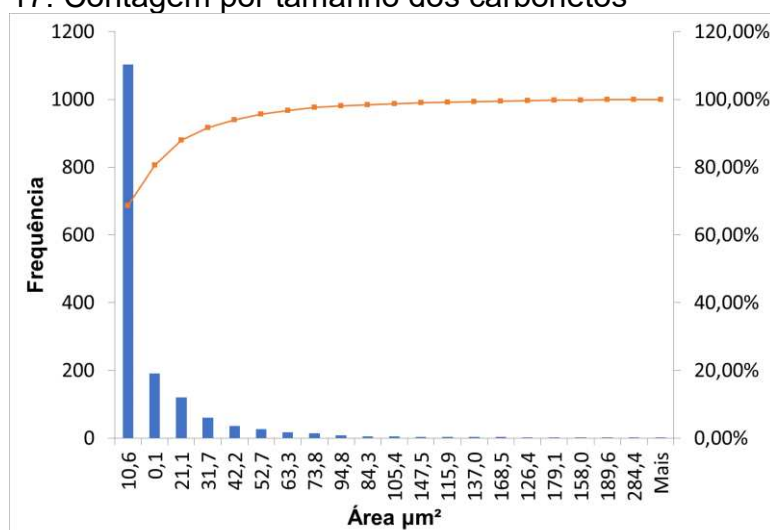
Amostra	Contagem	Área total [um ²]	Carbonetos	
			Tamanho médio [um ²]	% Área
F75_100_001	1607	15012,06	9,3	5,58
F75_100_002	1232	14129,39	11,5	5,25
Média	1419,50	14570,72	10,41	5,42
Desvio Padrão	265,17	624,14	1,50	0,23
Coef. Variação	18,68	4,28	14,45	4,28

Fonte: Autora

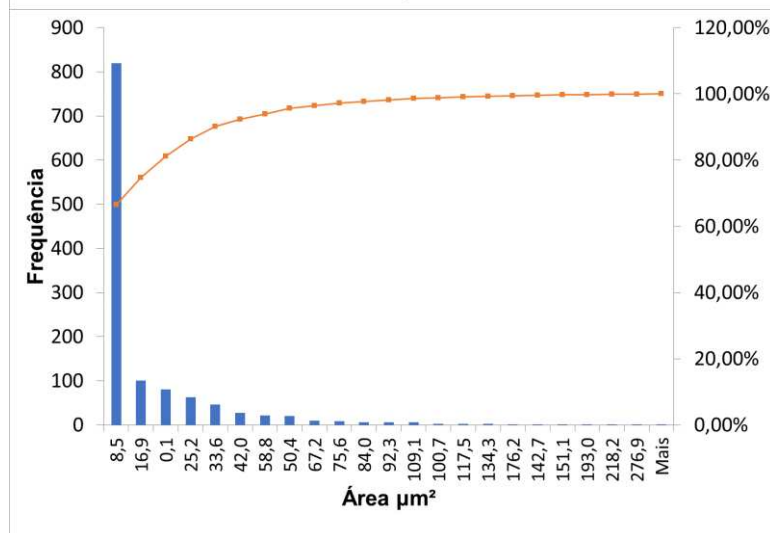
Dos resultados obtidos é possível afirmar que os carbonetos presentes na liga ASTM F75 representam 5,42% da área total e que o tamanho médio destes é de 10,41 μm^2 . O coeficiente de variação que está no final do Quadro 14 corresponde à razão entre o desvio padrão e a média vezes cem. Foi calculado para verificar que os dados analisados podiam ser considerados homogêneos estatisticamente.

Figura 17. Contagem por tamanho dos carbonetos

F75_100_001



F75_100_002



Fonte: Autora

Como visto na Figura 17 o tamanho da maioria dos carbonetos está entre 8,5 e 10,5 μm^2 e representaram ao redor de 75% da contagem total de carbonetos para cada amostra. Da mesma forma é importante ressaltar a presença de carbonetos maiores entre 30 e 280 μm^2 pois embora sejam poucos em comparação com os já discutidos, o tamanho destes também afeta de maneira negativa a usinabilidade do material pois a vida das ferramentas sofrerá quedas consideráveis.

Posteriormente, foi analisado o coeficiente de encruamento do material dada sua importante influência no estudo da usinabilidade. Este pode ser calculado como a razão entre a resistência à tração final e a resistência ao escoamento (ver equação (3)), ambas obtidas da curva tensão-deformação do material. Essa relação permite determinar o aumento da resistência ao escoamento após a deformação plástica. A

tensão de escoamento inicial é definida para o alongamento $\varepsilon = 0,2\%$. (STAHL et al., 2012).

$$\sigma = k\varepsilon^n \quad (2)$$

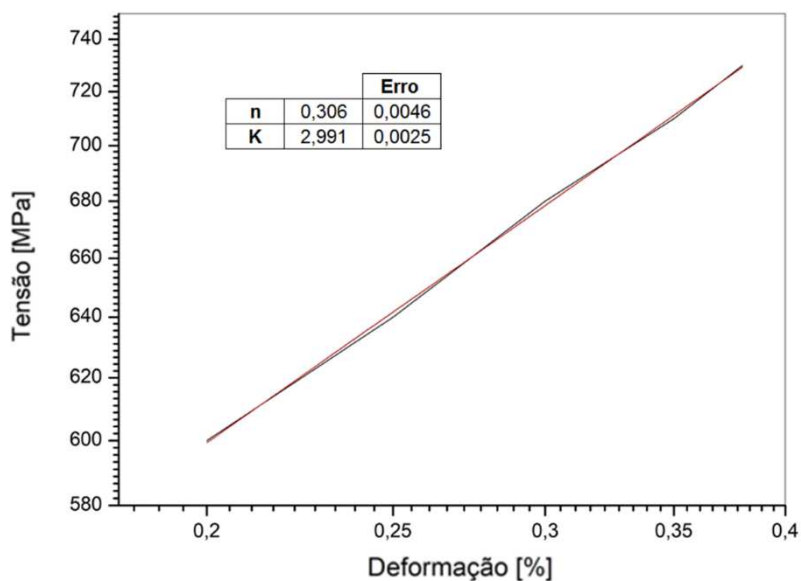
$$D_n = \frac{\varepsilon_b^n}{0,002^n} \quad (3)$$

Nas equações σ representa a tensão, ε_b é o alongamento à ruptura, n é o expoente de encruamento estimado e k é o coeficiente de tensão.

Assim, a partir da informação do ensaio de tração fornecido pela empresa doadora do material foram determinados os valores para o expoente de encruamento e o alongamento à ruptura da liga ASTM F75.

Para fazer o cálculo do expoente de encruamento, o gráfico que se tinha da curva tensão-deformação foi plotado em coordenadas logarítmicas e se determinou o valor do coeficiente angular dessa nova curva, este valor corresponde ao expoente de encruamento n . (UIJL; CARLESS, 2012).

Figura 18. Curva log-log tensão-deformação liga ASTM F75

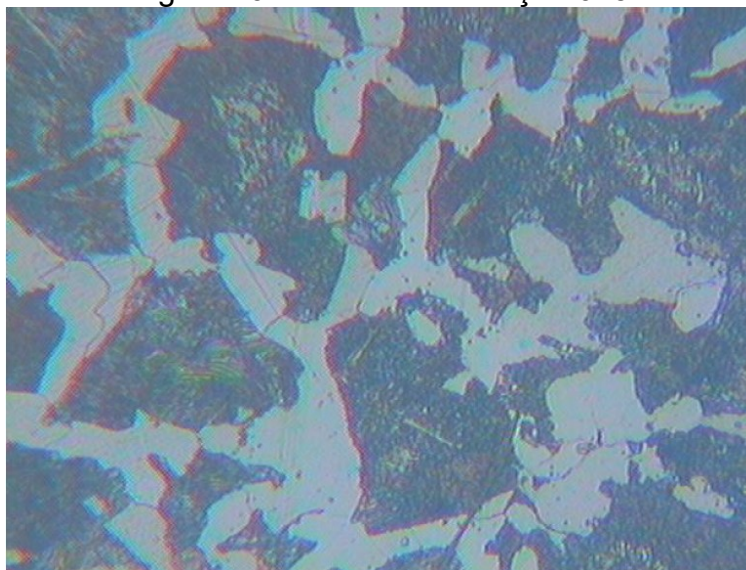


A linha vermelha da Figura 18 corresponde ao ajuste da curva obtida para o cálculo do expoente de encruamento. Assim, usando-se a equação (3) o coeficiente de encruamento para a liga ASTM F75 é igual a 4,02.

$$D_n = \frac{0,1885^{0,306}}{0,002^{0,306}} = 4,02$$

Em seguida procurou-se a caracterização microestrutural do aço 1045 para determinar a abrasividade deste material, assim como a curva tensão-deformação do aço para calcular o coeficiente de encruamento, seguindo o mesmo procedimento já realizado com a liga ASTM F75.

Figura 19. Microestrutura aço 1045



Fonte: (GALLO, 2006)

Segundo o autor GALLO, (2006) o resultado da micrografia realizada ao aço 1045 como fornecido, indica a presença de ferrita (tonalidade cinza clara) e perlita (tonalidade cinza escuro).

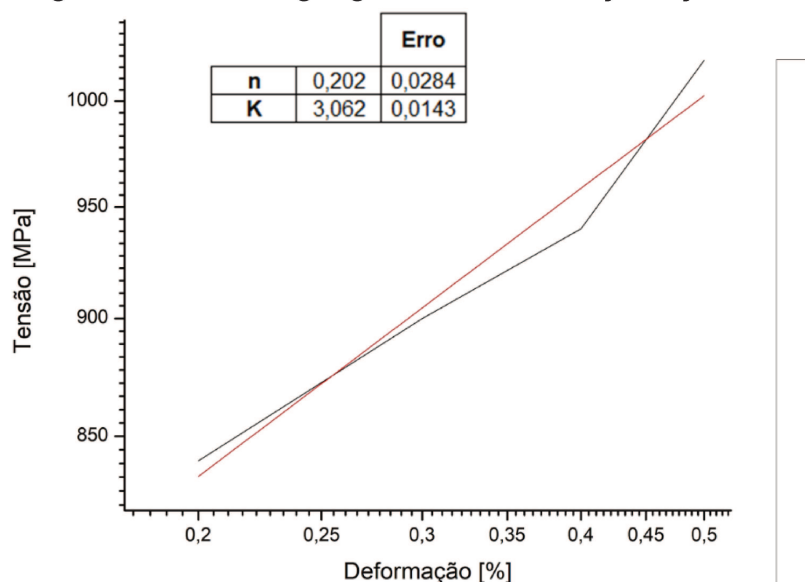
As características típicas destas estruturas nos aços são baixa dureza e resistência à tração para a ferrita e valores intermediários destas mesmas

propriedades para a perlita, isso devido a que a perlita é uma mistura de 88,5% de ferrita com um 11,5% de cementita. (GALLO, 2006). Realizou-se o mesmo procedimento já explicado anteriormente para a contagem das partículas duras presentes no material e assim assignar um determinado valor de abrasividade para este material.

Assim, após a análise feita utilizando o software ImageJ foi determinado que a área ocupada pela perlita (tonalidade cinza escura) é igual ao 61,631%. Porém como a porcentagem de cementita e portanto de partículas duras presentes nessa região é de 11,5%, a abrasividade da amostra corresponde a 7,08% da área total analisada.

Logo após, plotando a curva de tensão-deformação fornecida no trabalho de LI et al., (2019) em coordenadas logarítmicas e fazendo o ajuste da nova curva (linha vermelha) foi determinado o valor do expoente de encruamento para o aço 1045. Utilizando a Equação (3) o coeficiente de encruamento resultante para o aço 1045 é igual a 2,45.

Figura 20. Curva log-log tensão-deformação aço 1045



Fonte: Adaptado de (LI et al., 2019)

$$D_n = \frac{0,17^{0,202}}{0,002^{0,202}} = 2,45$$

Juntando as informações obtidas das propriedades mecânicas do aço 1045 e da liga de cobalto ASTM F75, foram feitos o Quadro 15 e a Figura 21. Isso com o intuito de fazer a comparação entre estes dois materiais e entender melhor o comportamento da liga de cobalto durante os processos de usinagem.

No quadro, são apresentadas as magnitudes das propriedades mecânicas escolhidas neste trabalho para analisar a usinabilidade. Já na Figura 21, é mostrado o gráfico de radar que resultou de traçar as magnitudes padronizadas dessas propriedades.

Quadro 15. Propriedades para avaliar a usinabilidade

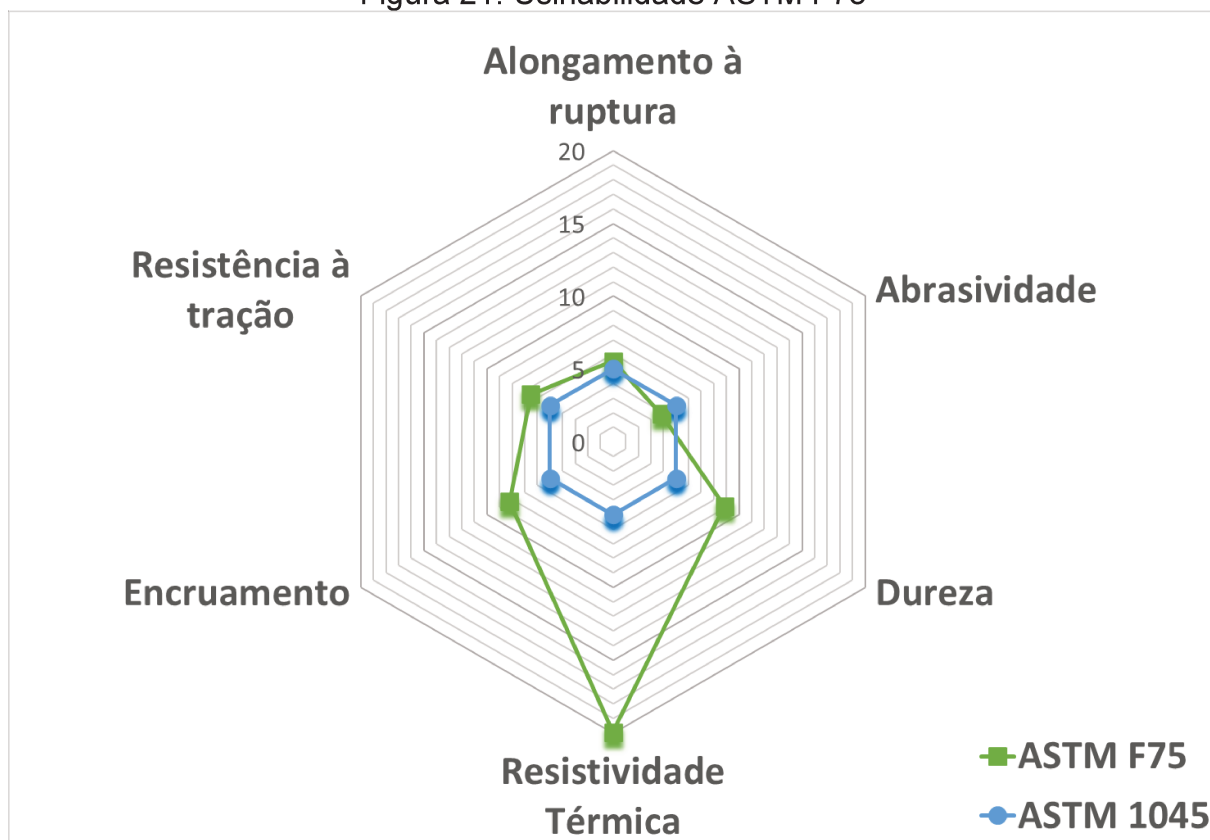
Propriedade	Unidades	ASTM F75	Aço 1045
Alongamento à ruptura	%	18,85	17
Abrasividade	% <i>Part. Duras</i>	5,42	7,08
Dureza	<i>HV</i>	300	170
Resistividade Térmica	<i>mK/W</i>	0,0769	0,019
Encruamento D_n	<i>N.A.</i>	4,02	2,45
Resistência à tração	<i>MPa</i>	730,03	560

Fonte: Autora

Como o intuito do diagrama de radar é permitir ao leitor determinar o grau de usinabilidade de um material com respeito a outro comparando as áreas dos polígonos formados, as magnitudes das diferentes propriedades dos materiais foram padronizadas. Desse modo, primeiro definiu-se um mesmo valor para todas as propriedades do material de referência, neste caso esse material foi o aço 1045 e se assignou um valor de 5 para todas suas propriedades. Em seguida, utilizou-se a Equação (4) para calcular os valores das propriedades da liga de cobalto com respeito aos de referência. Na equação X e R são as magnitudes das propriedades mecânicas do material a estudar e do material de referência respectivamente.

$$M_{rel}^X = 5 + 5 \left(\frac{X - R}{R} \right) \quad (4)$$

Figura 21. Usinabilidade ASTM F75



Fonte: Autora

Nos resultados obtidos uma análise visual indica uma dificuldade maior na hora de usinar a liga ASTM F75, já que a área do polígono formada pelas propriedades da liga de cobalto é maior do que a área ocupada pelo polígono para o aço 1045.

Assim, uma característica como o fator de encruamento que é maior para a liga de cobalto do que para o aço 1045, afeta diretamente a usinabilidade porque quando ocorre encruamento, a superfície resultante da usinagem apresenta dureza e resistência à tração maior. Desta forma, em processos como o fresamento, em que se têm várias entradas de dentes, a segunda aresta a entrar no corte vai enfrentar uma carga maior do que a carga enfrentada pela primeira aresta de corte. (DINIZ; MARCONDES; COPPINI, 2014).

Essa situação é ainda mais crítica durante operações de acabamento em que são utilizados avanços muito pequenos, portanto pode ser que o desempenho melhore usando avanços maiores, mas é importante lembrar que a forma da aresta de corte é particularmente importante sob tais condições. (STAHL et al., 2012).

Além disso, a combinação de um alto coeficiente de encruamento com uma baixa condutividade térmica resulta em uma usinabilidade pior, como no caso dos aços austeníticos, razão pela qual se recomenda o uso de ferramentas muito afiadas. (TRENT; WRIGHT, 2000).

Essa condição também se repete com a liga ASTM F75, como vemos no gráfico de radar da Figura 21 a resistividade térmica da liga de cobalto é bem maior se comparada com a do aço. O principal problema com a resistividade térmica alta é o aumento significativo da temperatura na região onde acontece o corte, isso devido a que o cavaco recém formado não está retirando o calor gerado e este também não flui em direção a peça. Dessa forma, a dureza e a resistência do material da peça estarão sendo pouco afetadas pelo aumento da temperatura e ao mesmo tempo propiciando as condições necessárias para que ocorra tanto desgaste acelerado quanto avarias.

No tocante a resistência à tração, a liga ASTM F75 apresenta uma resistência ligeiramente maior do que a do aço 1045 e portanto se espera um incremento das forças de corte necessárias para usinar este material.

Outro atributo dos materiais que desempenha um papel importante na usinabilidade é a ductilidade, esta é representada pelo valor do alongamento do material obtido durante o ensaio de tração. Como visto no gráfico esse tem um valor bastante similar para os dois materiais.

A ductilidade de um material é relevante porque é considerada anterior à presença de aderência, e a aderência de material da peça na ferramenta pode ser considerada positiva se o grau de aderência é suficientemente alto e estável porque protege a aresta de corte e estende a vida da ferramenta. Porém, se é uma aderência temporária e frequentemente é removida pode causar o efeito contrário aumentando de maneira rápida e progressiva o desgaste da ferramenta. (STAHL et al., 2012).

Por fim, a dureza é uma característica que está diretamente associada tanto com a abrasividade quanto com a resistência que apresenta o material a ser cortado. Além disso, é uma propriedade que pode variar dependendo da distribuição das fases no material.

Como visto na tabela e no gráfico, a liga ASTM F75 apresenta uma dureza bem maior do que a do aço 1045 razão pela qual se espera que haja uma maior

resistência ao corte e também um comportamento mais abrasivo, embora a medição de partículas duras tenha dado uma diferença que parece favorecer o corte quando se usina a liga ASTM F75. Pois apesar de não ter estudado com maior detalhe as partículas duras presentes na liga de cobalto, essas são formadas principalmente por cromo e molibdênio e portanto se espera sejam mais agressivas do que os carbonetos de ferro presentes no aço 1045.

4.2 Mecanismos de desgaste presentes

A análise dos mecanismos de desgaste que se apresentaram durante a usinagem da liga ASTM F75 foi feita a partir dos resultados obtidos da microscopia eletrônica de varredura (MEV) e da espectroscopia de energia dispersiva (EDS) realizadas a todas as fresas no final da vida.

Dessa forma, segundo os resultados do EDS, para as oito condições testadas foi possível identificar o revestimento das ferramentas, o metal duro e o material da peça que ficou aderido às fresas. No final da vida todas as ferramentas apresentaram material da peça aderido tanto na superfície de folga quanto na superfície de saída.

De maneira geral os tipos de desgaste observados foram desgaste de flanco em todas as fresas, assim como a presença de crateras na superfície de saída. Essas crateras foram mais pronunciadas para a velocidade de corte de 110 m/min e para o avanço por dente de $0,03 \text{ mm}$. Observou-se também um tipo de desgaste similar ao de cratera na superfície de folga das ferramentas, porém esse foi mais recorrente nos testes com o maior avanço por dente ($0,03 \text{ mm}$).

Em relação às avarias, o lascamento e as trincas de origem mecânica aconteceram majoritariamente nas ferramentas revestidas com AlTiN porém também foram observadas nas fresas revestidas com AlCrN.

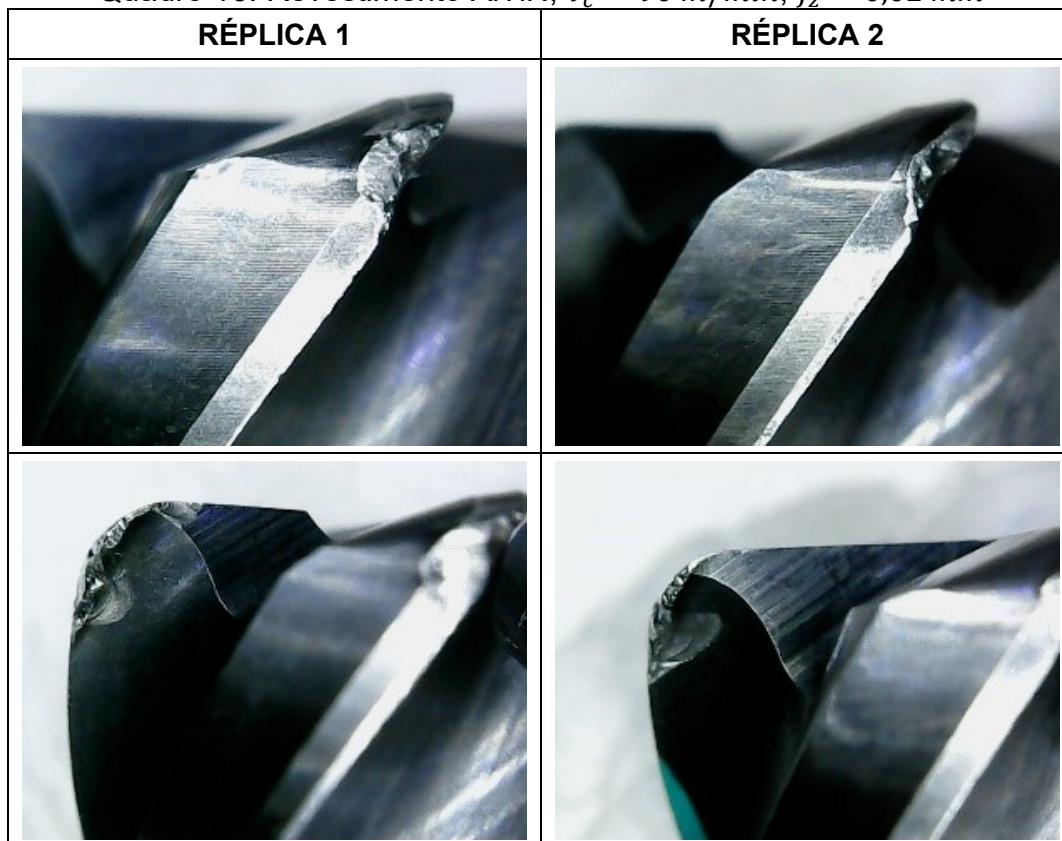
Em todas as ferramentas estiveram presentes os seguintes dois mecanismos de desgaste que aparecem durante os processos de usinagem. A abrasão mecânica, caracterizada por ter forma de sulcos paralelos à direção do fluxo de material e por gerar primeiramente o desgaste de flanco, mas também pode gerar o

desgaste de cratera. Seus efeitos são mais notáveis na superfície de folga porque nesta se dá o atrito entre a ferramenta e a peça que é um elemento rígido. Esse mecanismo de desgaste é fortemente estimulado pela temperatura na região de corte que reduz a dureza das ferramentas e pela abrasividade da peça que se está usinando (DINIZ; MARCONDES; COPPINI, 2014).

E, a adesão, que é um mecanismo de desgaste que produz tanto desgaste de flanco quanto desgaste de cratera e a aparência de uma região que tenha sofrido este mecanismo de desgaste é áspera. É facilitada sua ocorrência quando se tem corte interrompido, baixa rigidez ou quando a profundidade de usinagem não seja estável. (DINIZ; MARCONDES; COPPINI, 2014).

Em seguida é apresentada uma aresta de cada fresa no estado final, pois os desgastes e avarias foram similares nas demais arestas. Cada quadro apresenta as superfícies de folga e saída para as duas réplicas de cada condição avaliada. Primeiro serão analisadas as fresas revestidas com AlTiN.

Quadro 16. Revestimento AlTiN, $v_c = 90 \text{ m/min}$, $f_z = 0,02 \text{ mm}$



Fonte: Autora

Como observado no Quadro 16 as ferramentas apresentam principalmente lascamentos tanto na superfície de saída quanto na superfície de folga, desgaste de flanco e desgaste de cratera causados principalmente pelo mecanismo de adesão do material da peça na ferramenta como demonstrado pelo EDS, ver Quadro 17.

Quadro 17. EDS Revestimento AlTiN, $v_c = 90 \text{ m/min}$, $f_z = 0,02 \text{ mm}$

R1

Ponto	Si	Cr	Mn	Co	Mo	W
1	0,50	29,25	0,96	65,61	3,78	
2		14,69		46,13		39,18
3				9,40		90,60
4	4,55	15,13		22,91	3,71	53,70

Ponto	Al	Ti	Cr	Co	Mo	W	Zn
1	3,41	3,04	11,83	34,26	5,38	36,74	5,35
2	22,52	51,21	9,53	16,73			
3	1,82	3,43	6,07	15,17		73,51	

R2

Ponto	Ti	Cr	Mn	Co	Mo	W	Fe	Zn
1		24,23		61,10	2,79	11,88		
2		30,47		64,43	4,90			
3		27,27	1,39	62,47	5,77	3,10		
4	73,75	6,41		14,25			1,14	4,44
5	35,00	34,46		30,54				

Ponto	Al	Ti	Cr	Co	Mo	W
1	30,00	61,99	2,60	5,41		
2			28,81	62,07	9,12	
3	1,90	3,15	9,79	28,22		56,95
4			15,88	36,51	4,95	42,65
5	42,97	24,55		32,48		

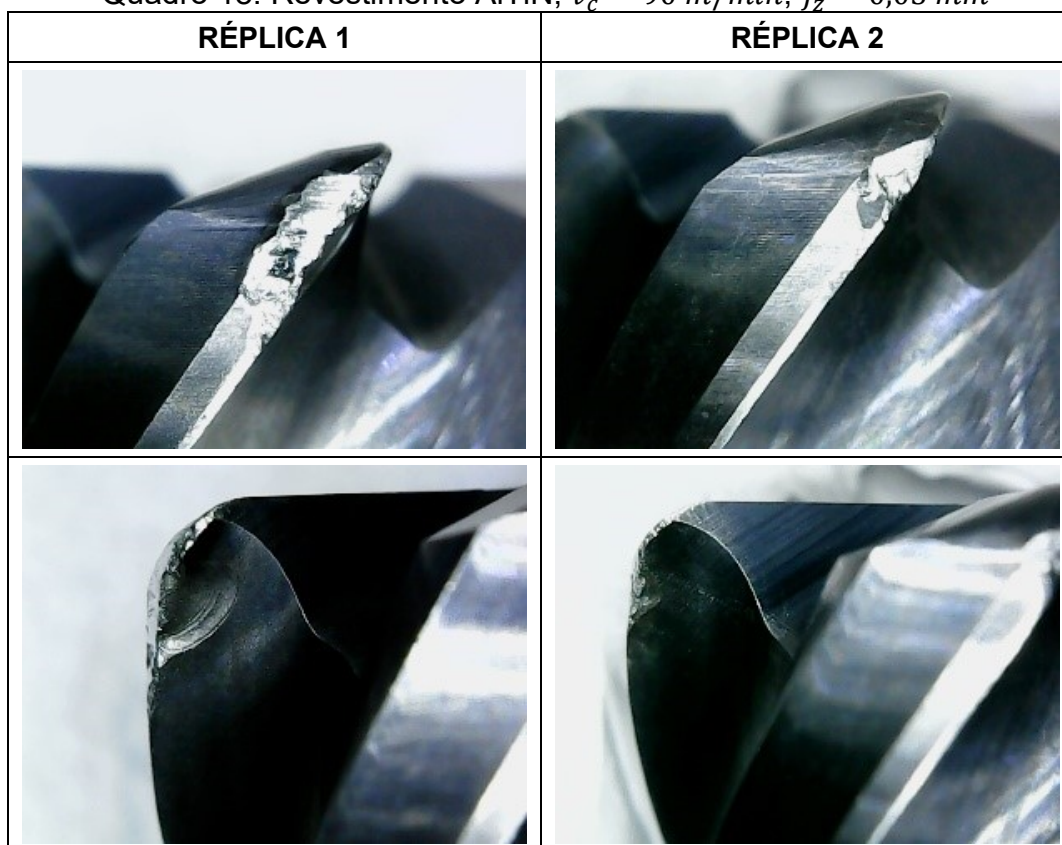
Fonte: Autora

Para as quatro superfícies mostradas anteriormente houve adesão da liga F75 (60% cobalto 28% cromo 6% molibdênio) sobretudo nas superfícies de folga das

fresas, ver os pontos 1 e 2 da réplica 1 e pontos 1, 2 e 3 da réplica 2. Também chama a atenção a presença de cromo e cobalto em pontos onde se espera obter só a leitura da composição do revestimento, como é o caso do ponto 2 na superfície de saída da réplica 1 e no ponto 1 da superfície de saída da réplica 2.

Já no caso da réplica 1 a superfície de folga perdeu por completo o revestimento numa área (ponto 3) aparecendo só o metal duro formado pelos carbonetos de tungstênio e a matriz de cobalto.

Quadro 18. Revestimento AlTiN, $v_c = 90 \text{ m/min}$, $f_z = 0,03 \text{ mm}$



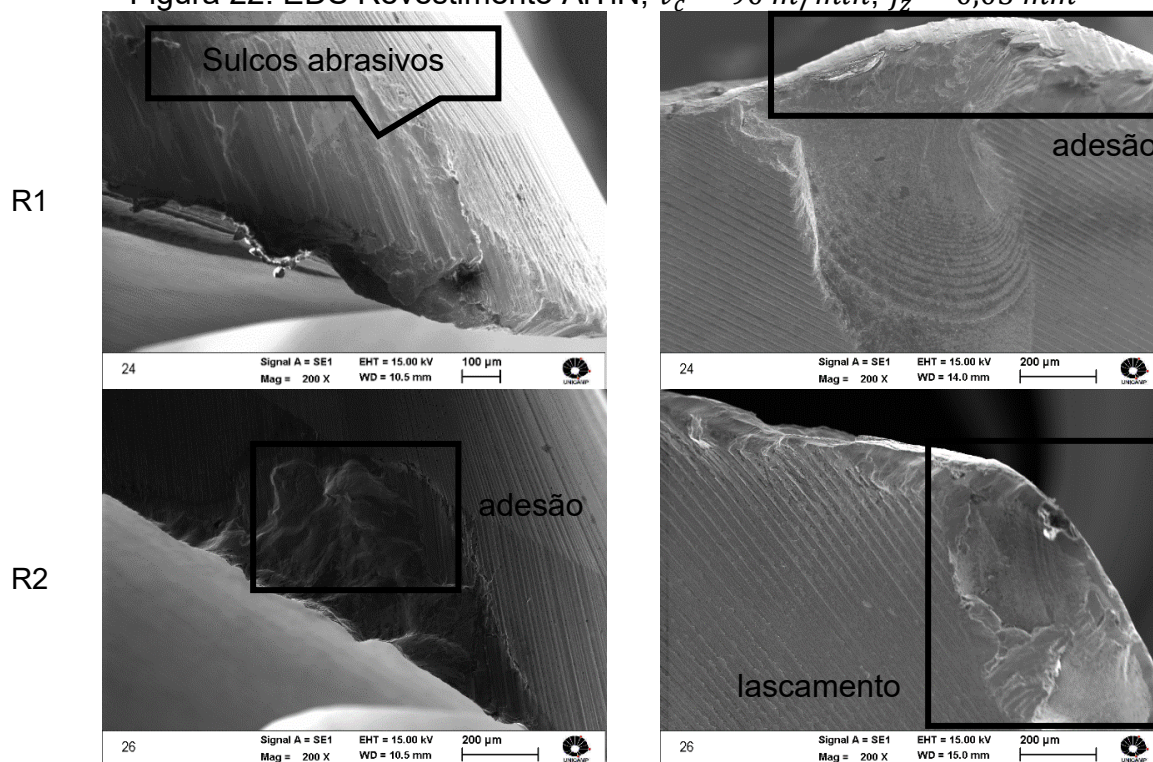
Fonte: Autora

Para a condição apresentada no Quadro 18 existe uma variação significativa entre o estado das duas ferramentas, o que também se evidenciou no resultado do volume de cavaco removido para as duas réplicas, sendo que com a primeira ferramenta foi removido um pouco mais do que o dobro do volume removido com a segunda ferramenta.

A segunda réplica apresentou um desgaste de flanco acelerado e lascamento de uma das arestas o que prejudicou significativamente seu desempenho. Isso pode ter acontecido por causa da presença de algumas partículas duras de grande tamanho presentes no corpo de prova.

De maneira similar ao apresentado para a condição anterior, estas ferramentas também apresentaram adesão da liga F75 e perda total do revestimento por causa de lascamentos.

Figura 22. EDS Revestimento AlTiN, $v_c = 90 \text{ m/min}$, $f_z = 0,03 \text{ mm}$



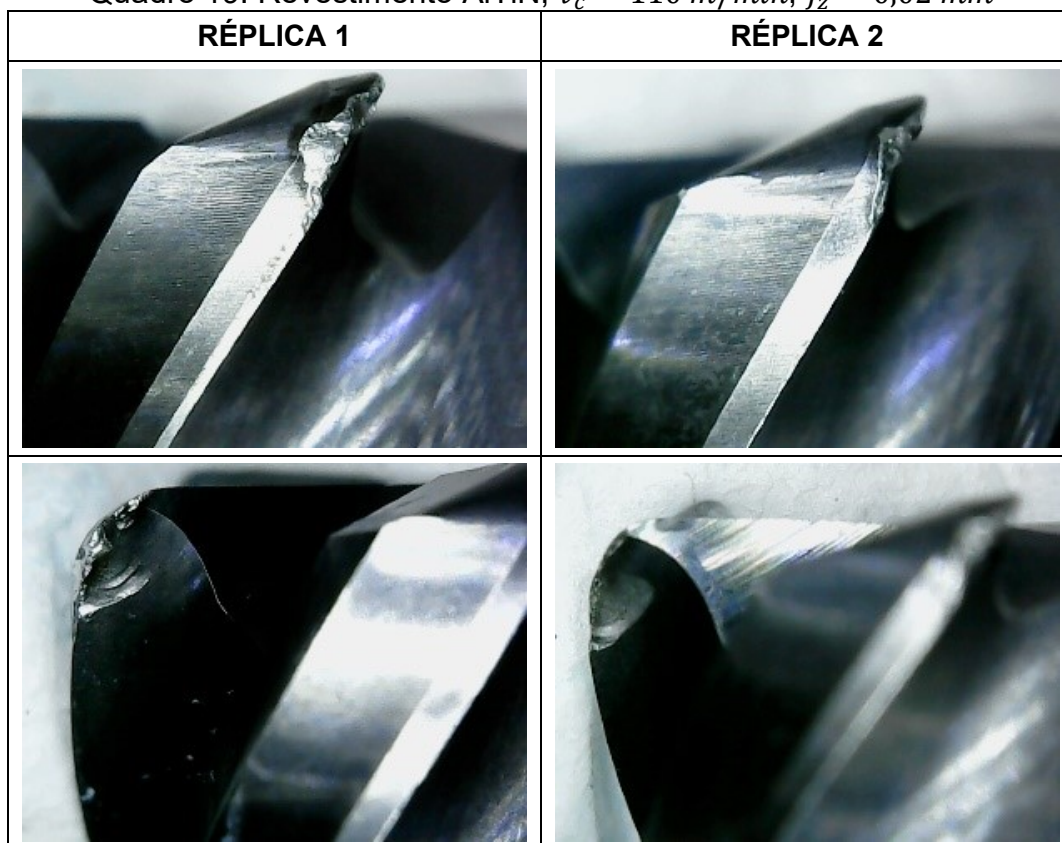
Fonte: Autora

Do Quadro 18 e a Figura 22, também é interessante observar que como a segunda réplica apresentou um desgaste de flanco acelerado com as primeiras três passadas esta não foi submetida de novo ao corte, desta forma a fresa não apresenta desgaste de cratera na superfície de saída presente na fresa da réplica um.

Embora o desgaste de cratera seja normalmente relacionado com o uso de velocidades de corte e de avanço grandes, este tipo de desgaste também aparece

em velocidades menores quando são usinadas ligas de titânio ou de níquel, isso devido aos esforços de cisalhamento serem maiores e, portanto, a ferramenta em temperaturas menores já sofre cisalhamento. (TRENT; WRIGHT, 2000). Esse mesmo fenômeno pode explicar a ocorrência desse tipo de desgaste com a liga ASTM F75.

Quadro 19. Revestimento AlTiN, $v_c = 110 \text{ m/min}$, $f_z = 0,02 \text{ mm}$

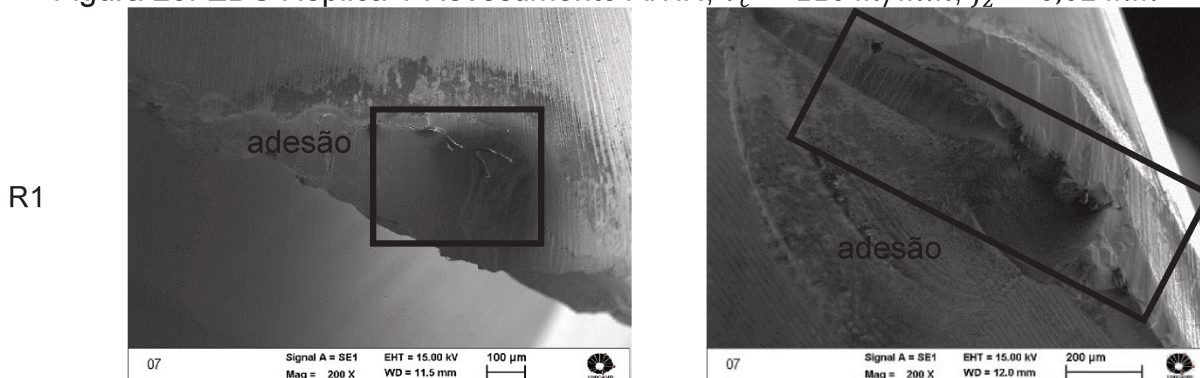


Fonte: Autora

Com o aumento da velocidade e mantendo o revestimento de AlTiN, os tipos e mecanismos de desgaste presentes são muito similares aos já observados com a velocidade de corte de 90 m/min . Porém, em algumas arestas o desgaste de cratera parece estar mais pronunciado.

Em seguida são apresentados os resultados obtidos da análise de EDS feita nas fresas.

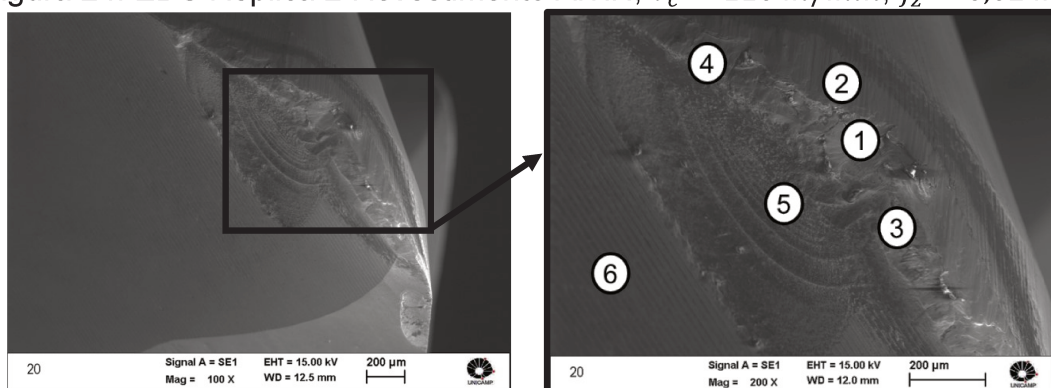
Figura 23. EDS Réplica 1 Revestimento AlTiN, $v_c = 110 \text{ m/min}$, $f_z = 0,02 \text{ mm}$



Fonte: Autora

O interessante da Figura 23 é observar a cratera formada na superfície de folga. Segundo TRENT; WRIGHT, (2000) essa forma de desgaste aparece em ferramentas de metal duro quando se usinam metais com pontos de fusão altos como as ligas de níquel. A causa dessa forma de desgaste é a deformação plástica da superfície por cisalhamento na presença de altas temperaturas. A aparição deste tipo de desgaste alerta que se está no limite da velocidade de corte e/ou do avanço utilizado.

Figura 24. EDS Réplica 2 Revestimento AlTiN, $v_c = 110 \text{ m/min}$, $f_z = 0,02 \text{ mm}$

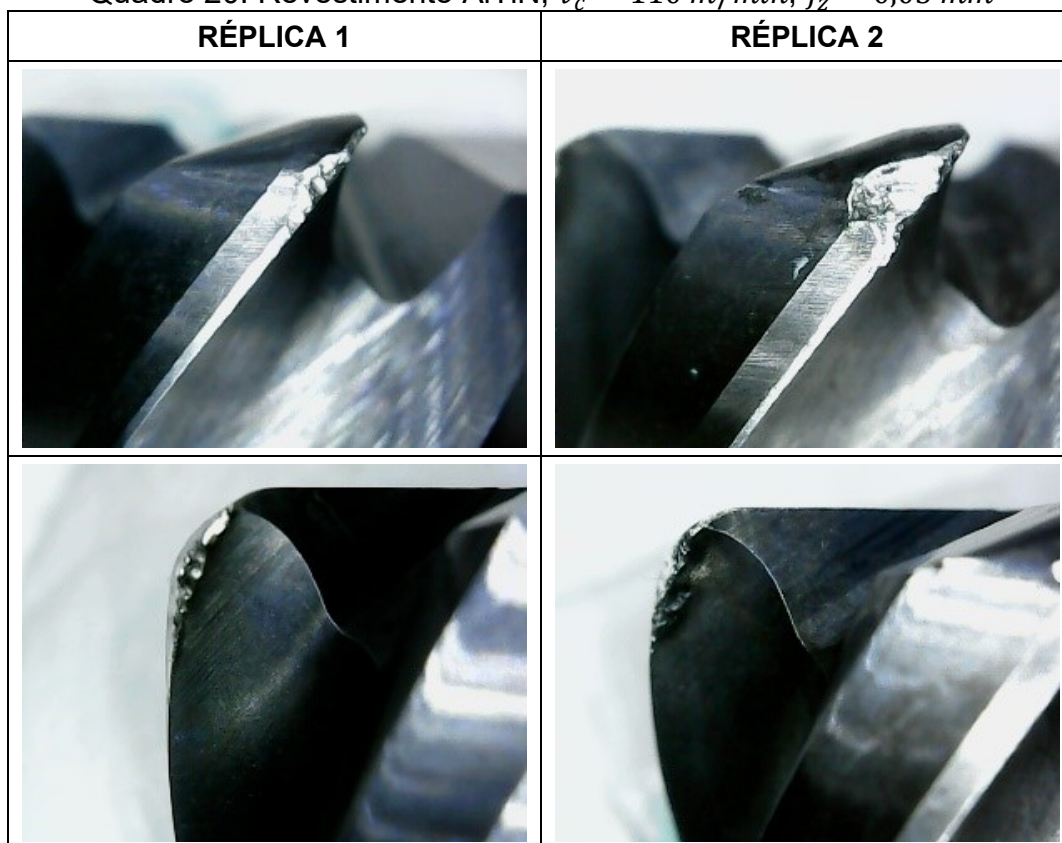


Ponto	Al	Ti	Cr	Mn	Co	Mo	W
1			27,96	1,04	64,49	6,51	
2			27,69	1,20	63,83	7,28	
3		0,34	27,51	1,12	64,60	6,43	
4			13,18	4,77	15,66		66,40
5	38,64	52,46	2,38		6,52		
6	38,63	54,38			6,98		

Fonte: Autora

Por fim, no Quadro 20 são apresentadas as imagens das fresas com revestimento de AlTiN utilizadas com os parâmetros de corte mais exigentes.

Quadro 20. Revestimento AlTiN, $v_c = 110 \text{ m/min}$, $f_z = 0,03 \text{ mm}$

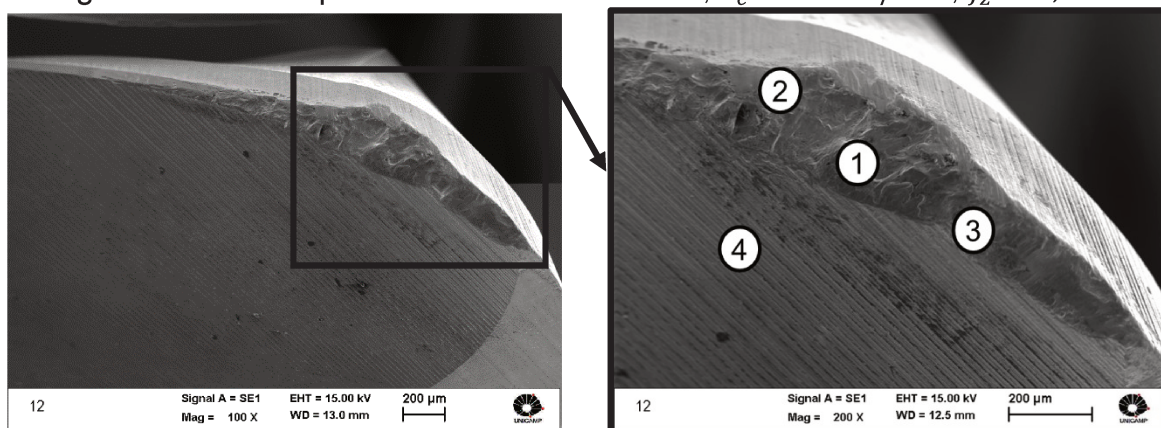


Fonte: Autora

Como exposto anteriormente sob esta condição foi obtida a menor vida para as ferramentas de AlTiN. Nesta condição aconteceu um fenômeno similar ao já observado também para o avanço por dente de $0,03 \text{ mm}$ e a velocidade de corte de 90 m/min em que eram percebidas algumas diferenças significativas no estado final das ferramentas, isso porque a fresa da réplica dois retirou um volume de cavaco superior ao volume removido pela ferramenta da réplica um.

Dessa maneira o desgaste de flanco acelerado e o lascamento das arestas da fresa um não permitiu que a ferramenta desenvolvesse de maneira significativa os sinais de adesão do material da peça, como sim aconteceu com a fresa da segunda réplica.

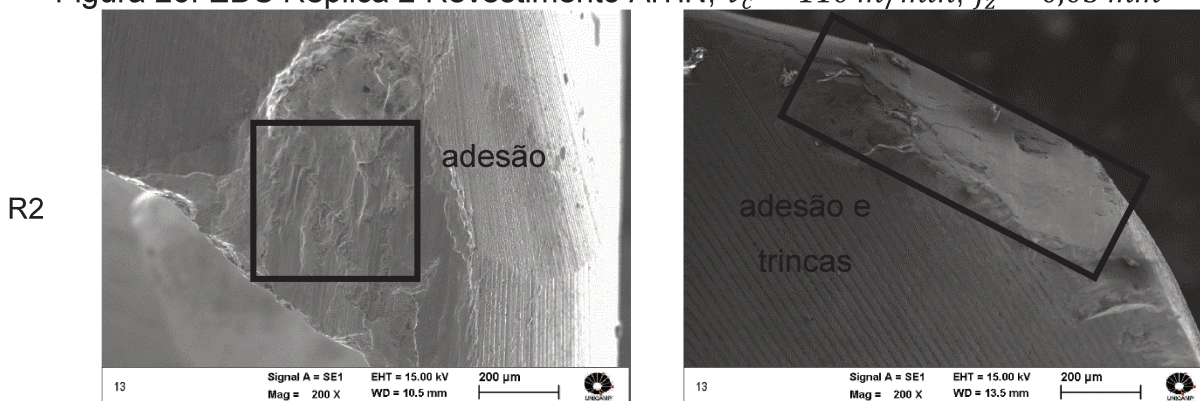
Figura 25. EDS Réplica 1 Revestimento AlTiN, $v_c = 110 \text{ m/min}$, $f_z = 0,03 \text{ mm}$



Ponto	Al	Ti	Cr	Mn	Co	Mo	W
1			7,90		17,68		74,42
2			26,53	0,89	62,36	7,18	3,05
3	1,61	1,49	27,38	2,89	51,25	4,23	11,15
4	19,66	29,23			1,38		

Fonte: Autora

Figura 26. EDS Réplica 2 Revestimento AlTiN, $v_c = 110 \text{ m/min}$, $f_z = 0,03 \text{ mm}$



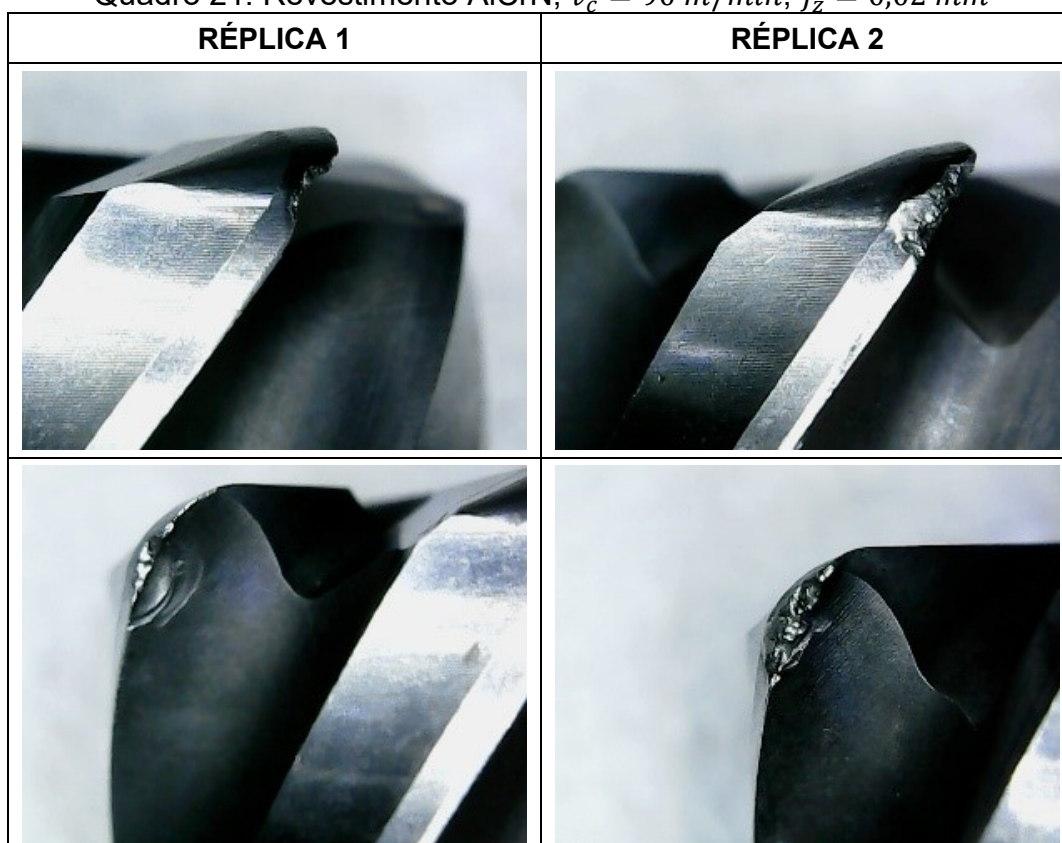
Fonte: Autora

Por fim, além da adesão de material da peça tanto na superfície de folga quanto na superfície de saída, na fresa da segunda réplica foram observadas trincas paralelas à aresta de corte o que segundo DINIZ; MARCONDES; COPPINI, (2014) corresponde a trincas de origem mecânica. Esse é um fenômeno que acontece normalmente em processos de fresamento devido à ampla variação dos esforços de corte a que é submetida a aresta cortante.

As recomendações para diminuir a ocorrência deste tipo de avarias são a diminuição do avanço, melhorar a estabilidade do processo e do primeiro contato da fresa com a peça de trabalho ou a escolha de uma ferramenta mais tenaz. Portanto, a aparição deste tipo de avaria complementa o já observado na condição anterior em que foi observada cratera na superfície de folga, pois é uma alerta de que os parâmetros de corte utilizados já estão no limite.

A seguir serão analisados as formas e os mecanismos de desgaste que aconteceram durante os ensaios com as fresas revestidas com AlCrN. De forma similar são apresentadas duas arestas de corte no estado final e os resultados dos MEV e EDS.

Quadro 21. Revestimento AlCrN, $v_c = 90 \text{ m/min}$, $f_z = 0,02 \text{ mm}$

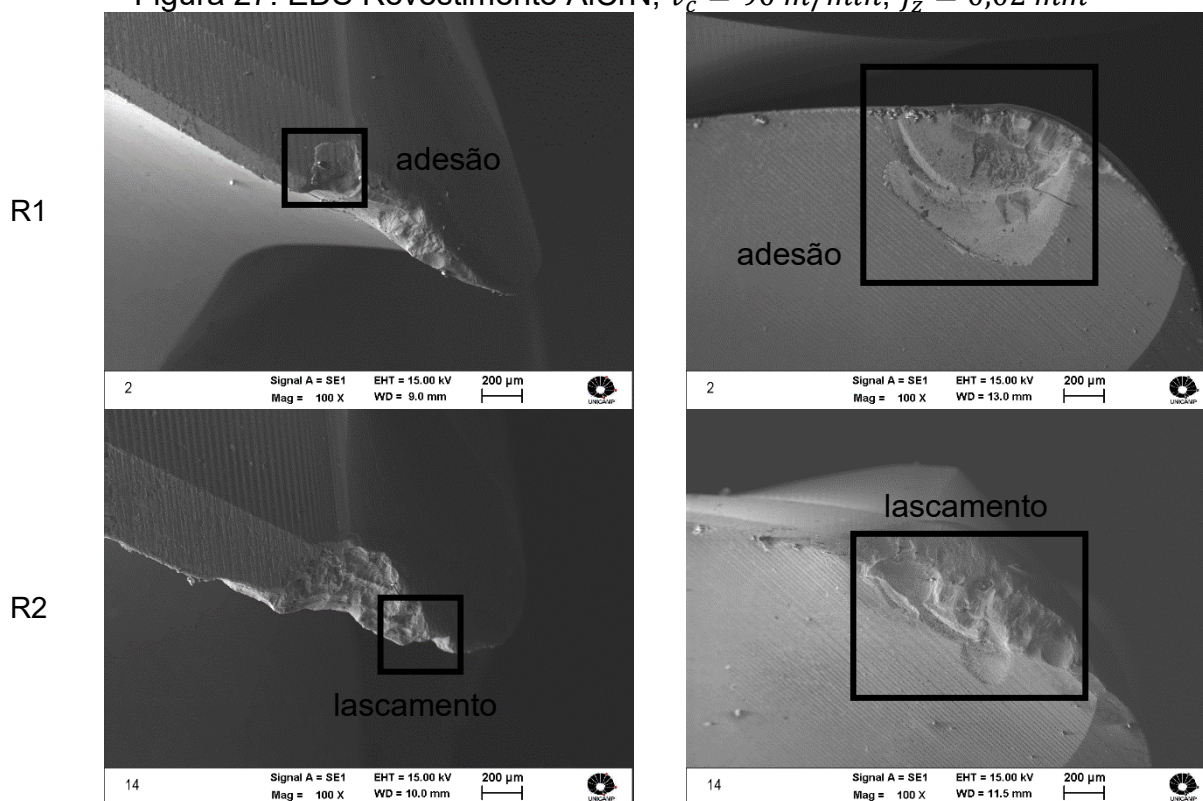


Fonte: Autora

Segundo o apresentado no Quadro 21 as fresas apresentaram maioritariamente avarias como lascamento e desgaste de flanco. Também foram observadas duas arestas com marcas similares ao desgaste de cratera. O principal

mecanismo de desgaste observado foi adesão de material da peça na ferramenta além da abrasão mecânica.

Figura 27. EDS Revestimento AlCrN, $v_c = 90 \text{ m/min}$, $f_z = 0,02 \text{ mm}$

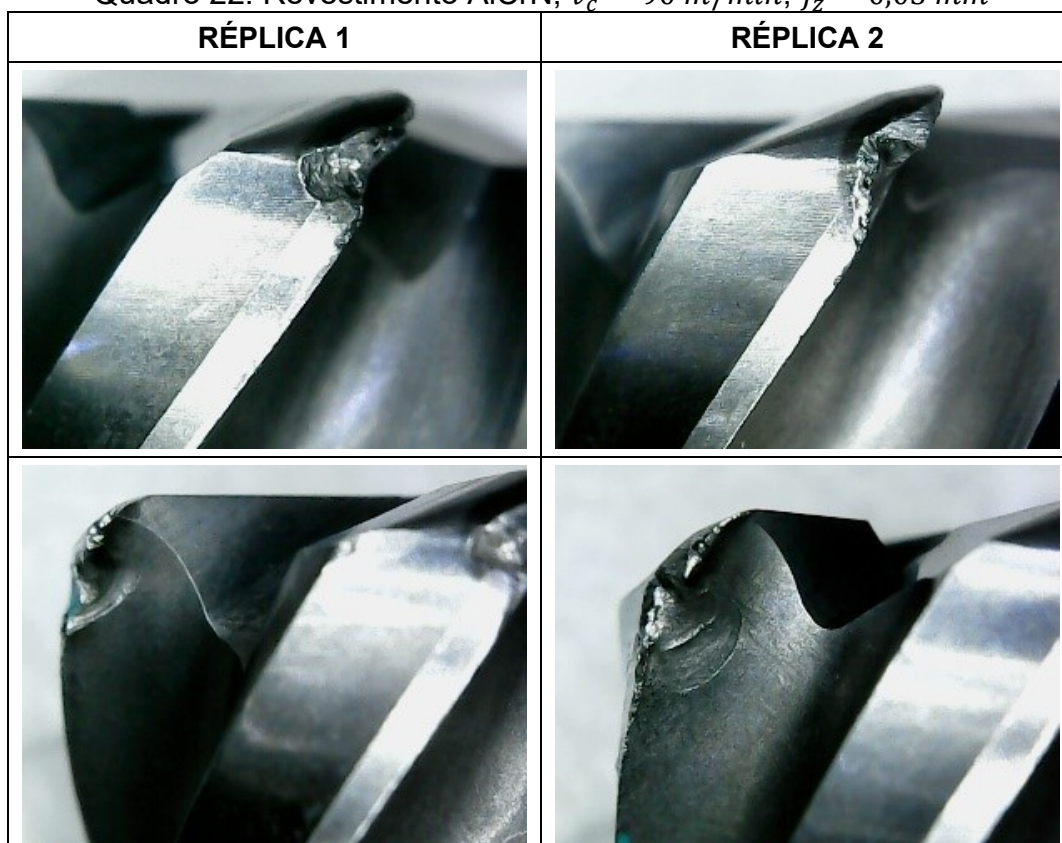


Fonte: Autora

Fazendo uma comparação entre as fresas revestidas com AlTiN e as fresas revestidas com AlCrN sob as mesmas condições, nota-se que para esta condição específica as duas ferramentas retiraram praticamente o mesmo volume de cavaco, porém as ferramentas com revestimento de AlCrN apresentaram uma menor aderência do material da peça, além disso os sinais da presença de cratera também são menores.

A menor aderência do material da peça na ferramenta pode ser porque este revestimento está apresentando um menor coeficiente de atrito, pois as condições de refrigeração foram as mesmas para todas as condições.

Dessa forma, a diminuição do desgaste de cratera pode ser evidência da redução do atrito entre a ferramenta e o cavaco.

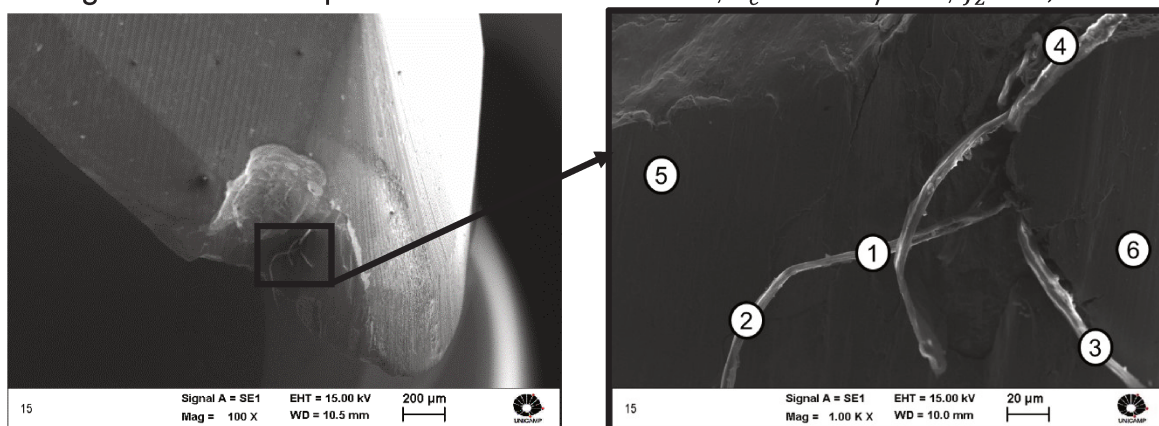
Quadro 22. Revestimento AlCrN, $v_c = 90 \text{ m/min}$, $f_z = 0,03 \text{ mm}$ 

Fonte: Autora

Quando o avanço é aumentado as ferramentas no final da vida ficaram com a aparência mostrada no Quadro 22. Nesta situação o desgaste de cratera se manifesta um pouco mais do que na anterior condição e tanto na superfície de folga quanto na superfície de saída se observam sinais de aderência da liga. Por fim também se apresentou lascamento de maneira mais intensa.

Em seguida nas Figura 28 e Figura 29 são apresentados os resultados do MEV e do EDS realizado nas superfícies de folga para estas duas ferramentas.

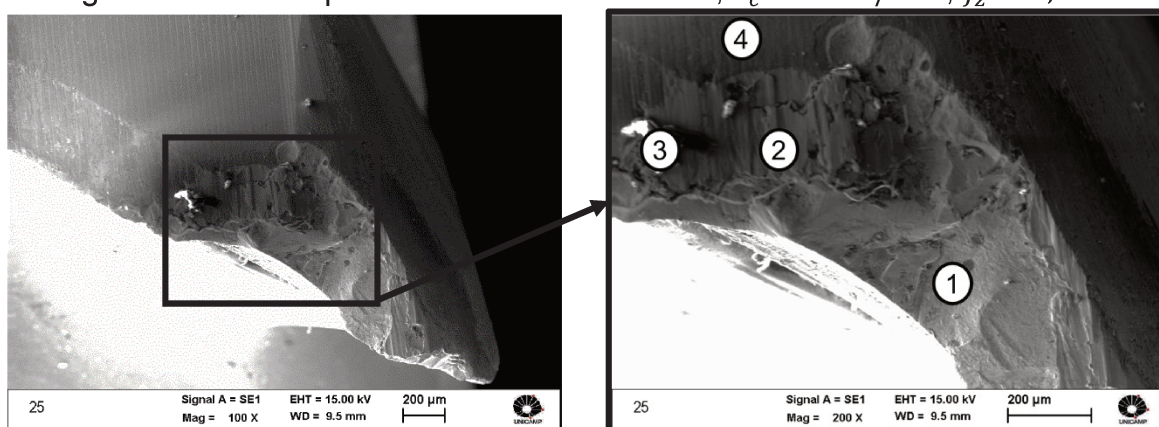
Figura 28. EDS Réplica 1 Revestimento AlCrN, $v_c = 90 \text{ m/min}$, $f_z = 0,03 \text{ mm}$



Ponto	Al	Cr	Mn	Co	Mo	W
1	5,13	26,61		41,37	13,17	13,71
2	7,06	29,73		56,25		6,96
3	9,82	28,68		61,51		
4		32,28		67,72		
5	0,83	32,34	1,98	64,85		
6	0,92	27,81	1,52	68,57	1,18	

Fonte: Autora

Figura 29. EDS Réplica 2 Revestimento AlCrN, $v_c = 90 \text{ m/min}$, $f_z = 0,03 \text{ mm}$



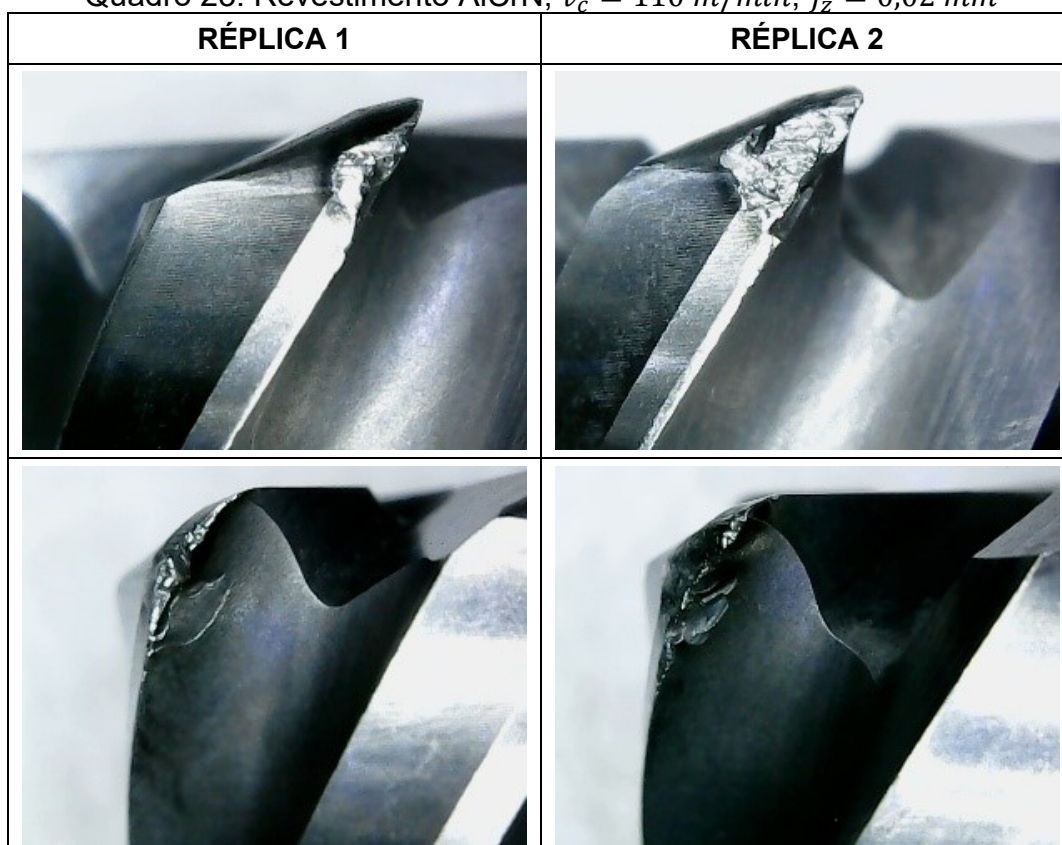
Ponto	Al	Ti	Cr	Mn	Co	Mo	W	Fe	Zn
1			9,88		31,13	3,65	55,35		
2			28,67	1,12	64,08	6,13			
3		7,28	28,90		24,18		39,65		
4	34,79		49,25					6,64	9,32

Fonte: Autora

A partir dos EDS se pode confirmar a aderência do material na ferramenta assim como a formação de uma cratera na superfície de folga e lascamento das arestas de corte. Na Figura 28 foi realizada uma ampliação de 1000 vezes para observar melhor as “fibras” que aparecem no centro da cratera, pois essas já tinham sido observadas em outras fresas como na Figura 23. Os resultados revelam que estes fios são principalmente de cobalto e cromo, componentes da liga.

Por outro lado chama a atenção na Figura 29 o ponto 3 pois aparece uma alta porcentagem de titânio que não se esperava já que o revestimento desta ferramenta é de AlCrN, mas isso pode ter acontecido porque os testes que foram feitos com esta ferramenta foram realizados num corpo de prova que já havia sido utilizado para testar uma fresa revestida de AlTiN, assim, é possível que algumas partículas da outra ferramenta tenham ficado aderidas ao material da peça.

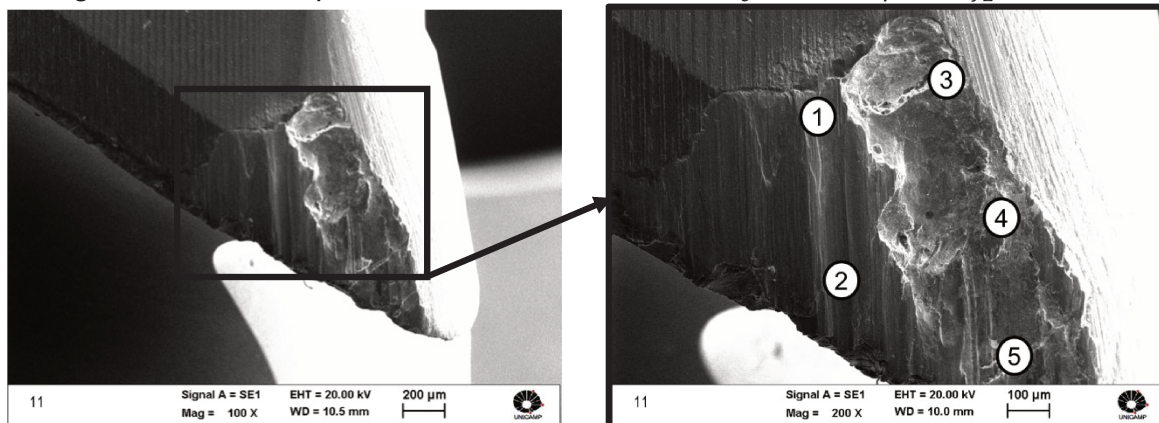
Quadro 23. Revestimento AlCrN, $v_c = 110 \text{ m/min}$, $f_z = 0,02 \text{ mm}$



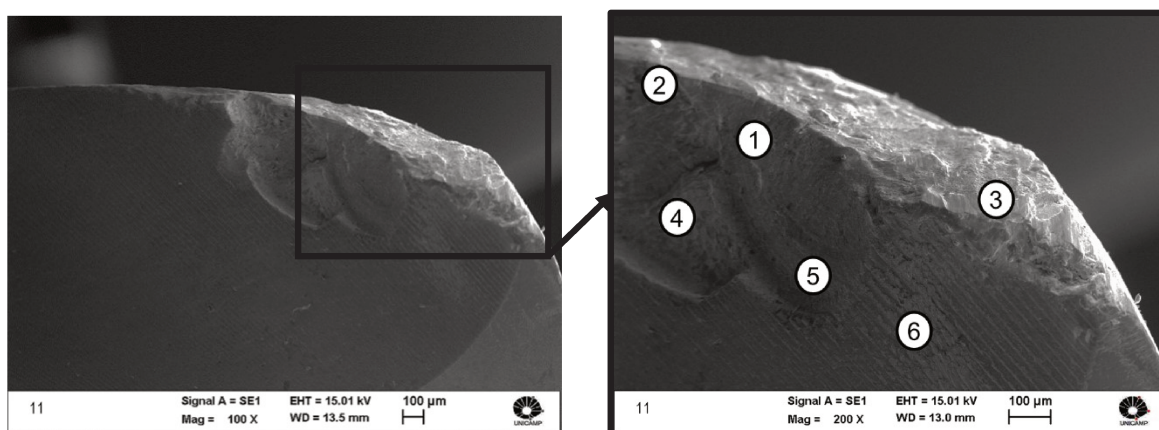
Fonte: Autora

No Quadro 23 nota-se que com o aumento da velocidade de corte as superfícies de folga das ferramentas apresentam sinais maiores de deterioração, se comparamos com o ocorrido com as fresas revestidas com AlTiN os efeitos eram mais marcantes na superfície de saída onde se formavam crateras mais profundas.

Figura 30. EDS Réplica 2 Revestimento AlCrN, $v_c = 110 \text{ m/min}$, $f_z = 0,02 \text{ mm}$



Ponto	Al	Si	Cr	Mn	Co	Mo	W
1		0,68	29,16		64,87	5,29	
2		0,50	29,25	0,96	65,51	3,78	
3			14,69		46,13		39,18
4			26,31		62,37	5,65	5,67
5	0,88	2,72	25,35	1,90	45,92	4,60	18,62



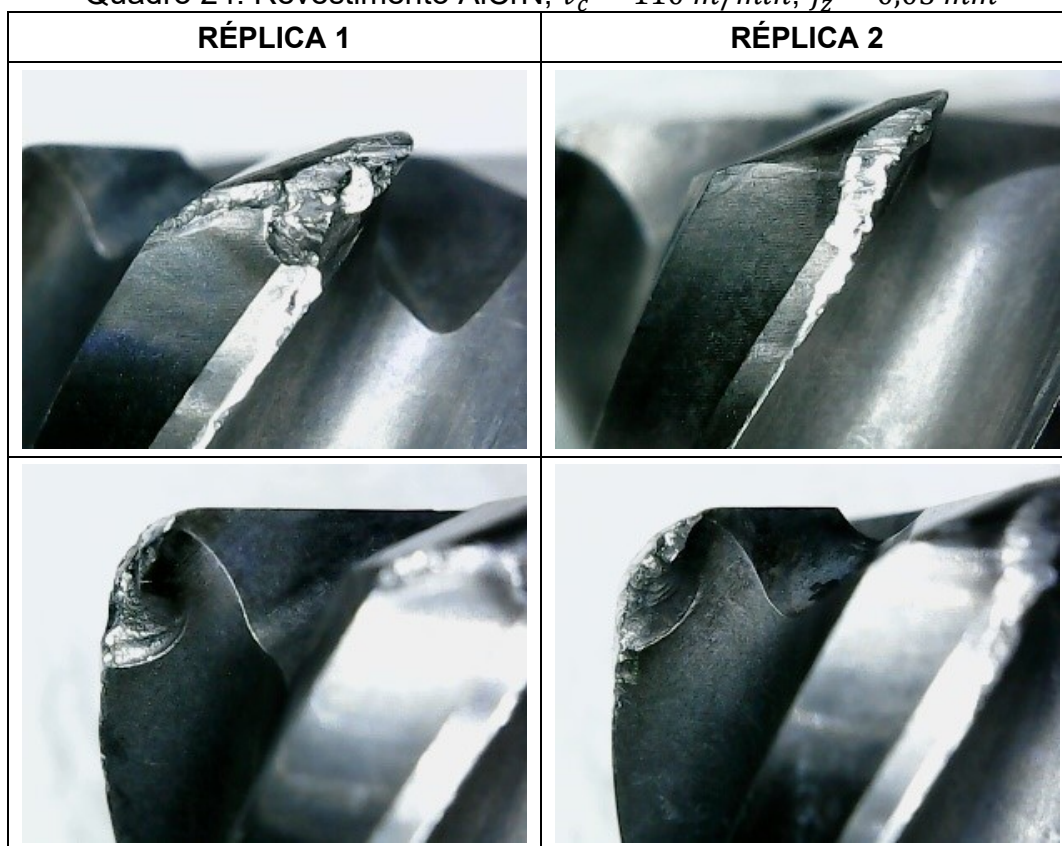
Ponto	Al	Si	Cr	Co	Mo	W
1	1,27	0,86	27,50	62,78	7,58	
2	4,62		22,97	51,20		21,21
3		1,13	27,99	63,93	6,96	
4	2,23		3,77	10,55		83,44
5	1,35		3,38	18,09		77,17
6	40,23		20,22	36,56	3,00	

Fonte: Autora

Da Figura 30 percebe-se que a adesão do material da peça na ferramenta foi se não o maior um dos principais mecanismos de desgaste e de maneira similar às demais condições foram observados alguns lascamentos.

Para terminar a análise do desgaste das fresas, no Quadro 24 são apresentadas as ferramentas revestidas com AlCrN utilizadas com os parâmetros de corte mais severos.

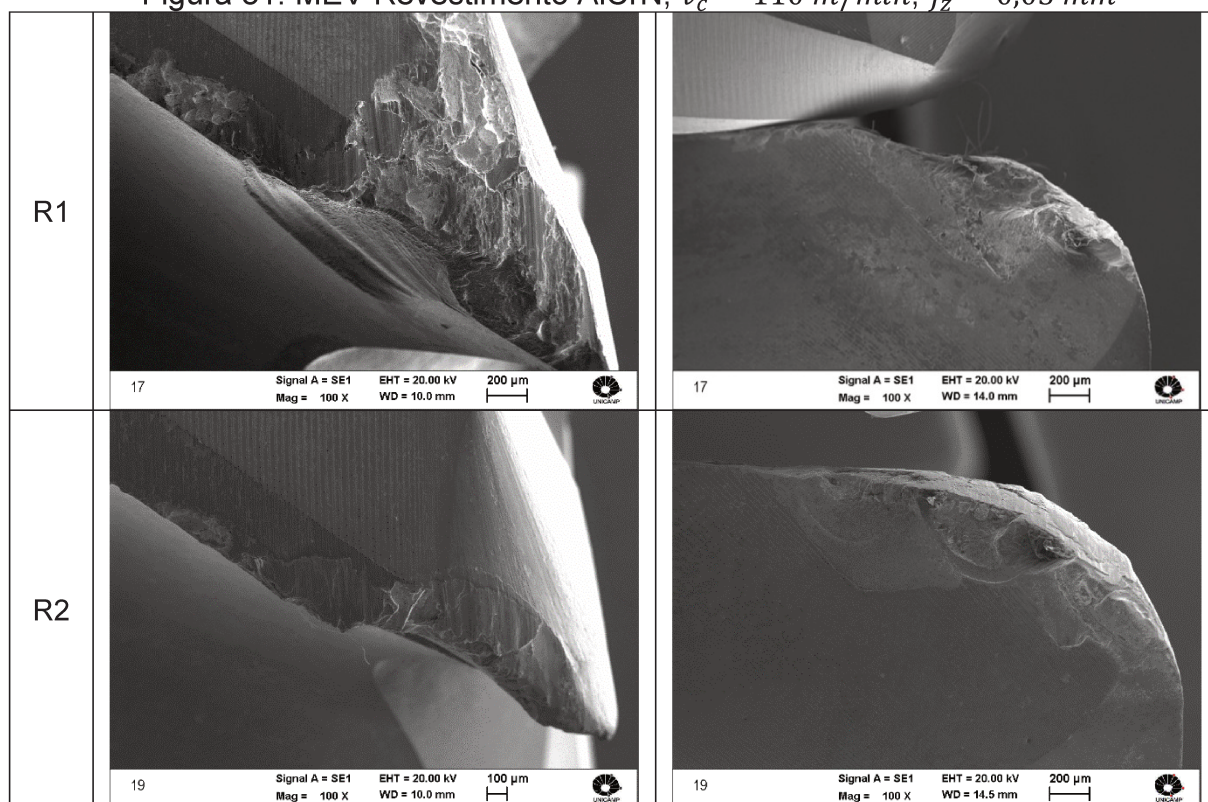
Quadro 24. Revestimento AlCrN, $v_c = 110 \text{ m/min}$, $f_z = 0,03 \text{ mm}$



Fonte: Autora

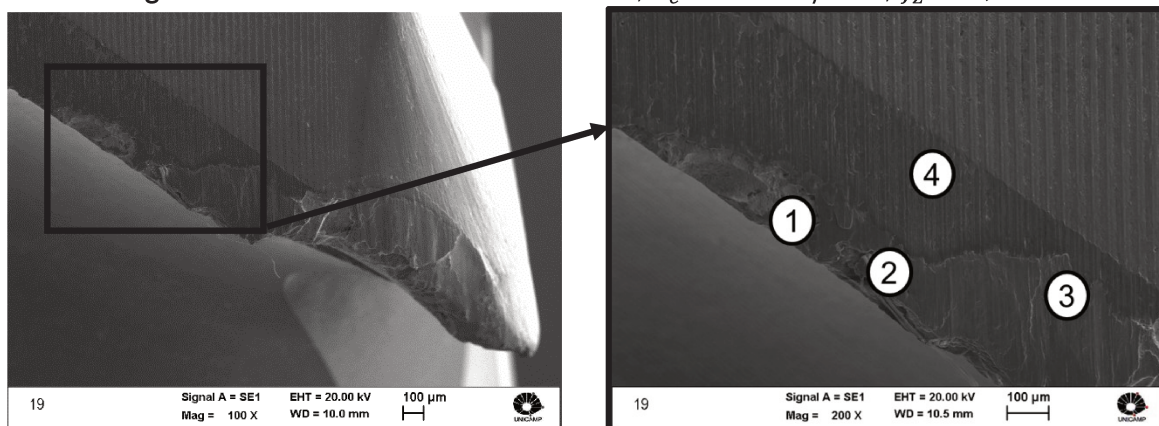
Como era de se esperar, nessas condições as fresas retiraram a menor quantidade de cavaco. Além disso, foram observadas crateras profundas nas superfícies de saída e de folga e lascamentos. De maneira similar observa-se aderência do material da liga na ferramenta o que é confirmado com o EDS.

Figura 31. MEV Revestimento AlCrN, $v_c = 110 \text{ m/min}$, $f_z = 0,03 \text{ mm}$



Fonte: Autora

Figura 32. EDS Revestimento AlCrN, $v_c = 110 \text{ m/min}$, $f_z = 0,03 \text{ mm}$



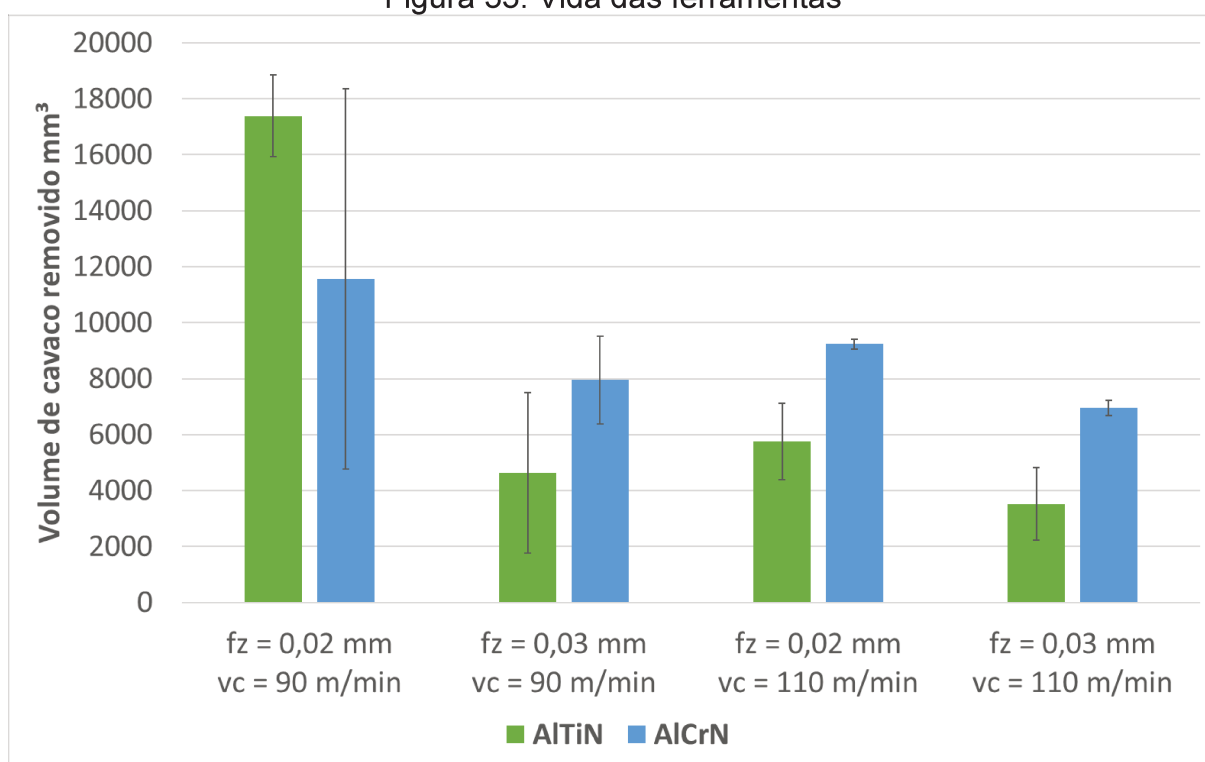
Ponto	Al	Si	Ti	Cr	Mn	Co	Mo	W
1				22,96		54,08	5,49	17,48
2			1,72	30,85		58,33	9,10	
3		0,77		29,18	0,92	63,12	6,01	
4	47,50	2,49		48,75		1,26		

Fonte: Autora

4.3 Vida das ferramentas

A análise de vida das ferramentas foi realizada a partir da comparação entre o volume de cavaco removido nas condições estudadas. Portanto é importante lembrar que o fim de vida das ferramentas é o momento em que essas atingem um desgaste de flanco de 0,2 mm.

Figura 33. Vida das ferramentas



Fonte: Autora

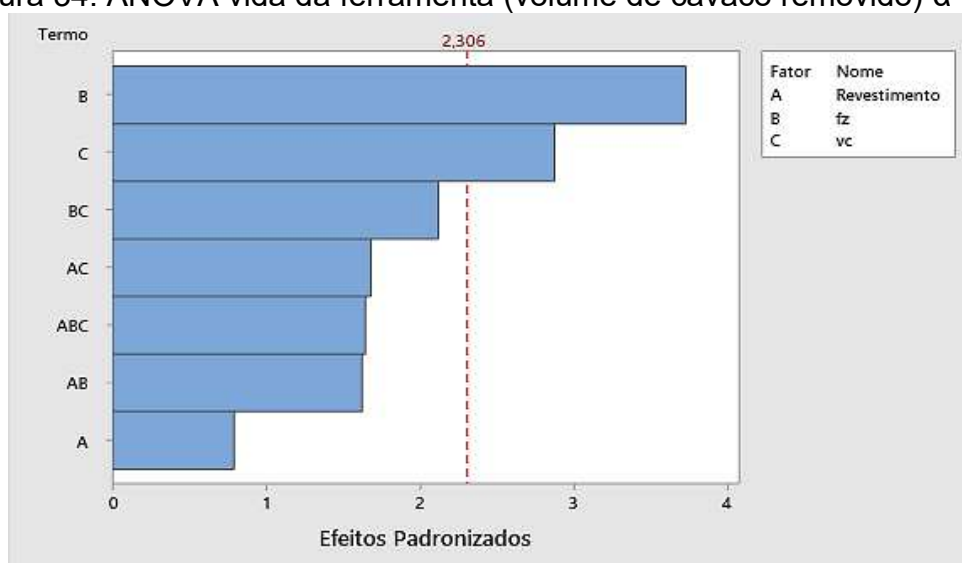
A partir da Figura 33 pode-se observar que à medida que a velocidade de corte aumenta a vida das ferramentas diminui. Esse fenômeno é esperado pois com o aumento da velocidade de corte também aumenta a temperatura na região de corte. Como o material sendo usinado apresenta uma condutividade térmica baixa, grande parte do calor gerado termina indo para a ferramenta de corte, enfraquecendo assim as propriedades do material da ferramenta e facilitando a ocorrência de mecanismos de desgaste como abrasão e adesão.

Em adição, o aumento da velocidade de corte no fresamento estimula a aparição de avarias como o lascamento e as trincas de origem mecânica devido a que aumenta o impacto da aresta de corte com a peça.

Nota-se que com o aumento do avanço a vida das ferramentas se torna menor. Isso porque o aumento desse também eleva o calor na região de corte. Porém com o acréscimo do avanço a área de corte vai ser maior e como se espera que haja uma melhor distribuição do calor na ferramenta a vida das ferramentas será prejudicada numa proporção menor do que com o aumento da velocidade de corte.

Finalmente, para três das quatro condições estudadas o revestimento de AlCrN apresentou vidas maiores. O desempenho superior do revestimento de AlCrN era esperado para todas as condições por causa de suas boas propriedades físicas ligeiramente superiores às do revestimento de AlTiN, principalmente sua capacidade de manter a dureza em temperaturas mais elevadas, que conferem às ferramentas uma maior capacidade para suportar os efeitos da abrasão e da adesão causados pelo material da peça. Porém, para a condição com o avanço de $0,02 \text{ mm}$ e a velocidade de 90 m/min , o coeficiente de variação entre o ensaio e a réplica realizados foi muito alto (58,8%), o que dificulta fazer alguma afirmação com respeito a esta situação.

Figura 34. ANOVA vida da ferramenta (volume de cavaco removido) $\alpha=0,05$

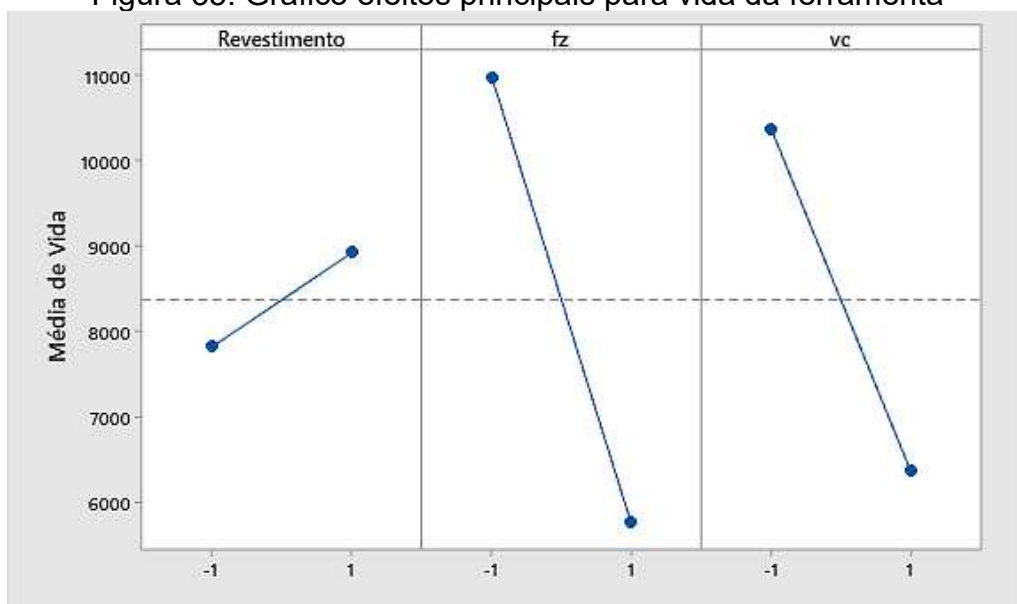


Fonte: Autora

Da ANOVA, pode-se concluir que o avanço foi o fator de maior influência no desgaste das ferramentas quando se usinou a liga ASTM F75, seguido pela velocidade de corte. As interações entre os fatores assim como o revestimento das fresas não apresentaram valores significativos frente ao desgaste.

O fato do revestimento não apresentar-se como significativo estatisticamente, pode ser devido à alta variação entre os resultados obtidos para algumas condições. Desta maneira o modelo resultante não explica de forma suficiente a variação na resposta e deixa encoberta a influência deste na vida das ferramentas. Pois durante a realização dos testes foi observado um desempenho superior das ferramentas revestidas com AlCrN.

Figura 35. Gráfico efeitos principais para vida da ferramenta



Fonte: Autora

Na literatura os autores DINIZ; MARCONDES; COPPINI, (2014) afirmam que o desenvolvimento do desgaste das ferramentas de usinagem é mais influenciado pela velocidade de corte do que pelo avanço, assim a vida das ferramentas diminuirá muito mais se a velocidade de corte for aumentada numa determinada proporção do que se fosse o avanço que aumentasse nessa mesma proporção.

Nos experimentos o fator que prejudicou mais a vida das ferramentas foi o avanço por dente como visto na Figura 35, pois quanto maior é a inclinação da reta,

maior a influência desse fator na resposta. Esse resultado diferente do esperado segundo a informação encontrada na literatura pode por um lado ser porque o avanço do nível menor para o maior aumentou 50% enquanto a velocidade de corte do nível baixo para o nível alto se elevou 22%. Por outro lado o efeito do avanço nos processos de fresamento não pode ser menosprezado, assim da forma em que foram propostos os testes quando se aumentava o avanço a rotação era mantida, isso significa que a velocidade de avanço crescia também causando maiores impactos nas arestas de corte, portanto vários ensaios foram detidos antes que se alcançasse o V_B de 0,2 mm pois as ferramentas apresentaram lascamentos e se receava a quebra da aresta.

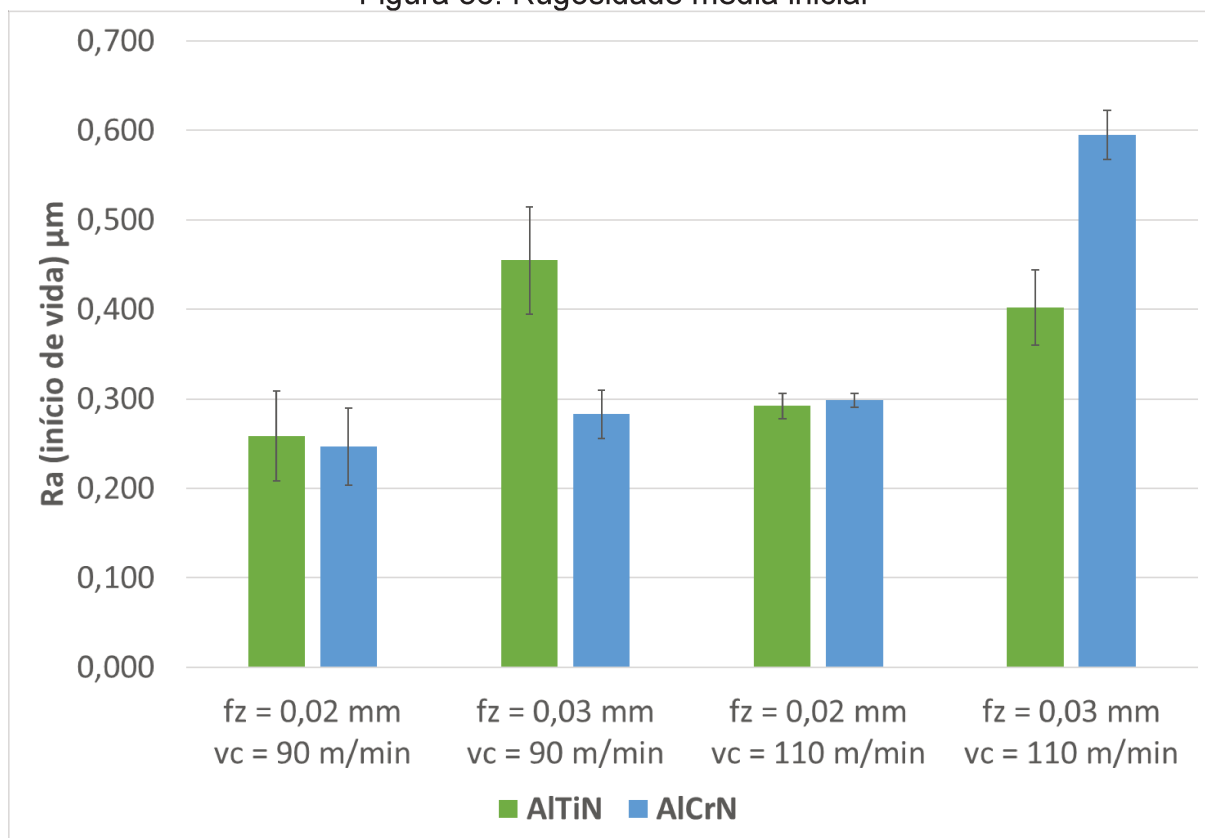
Analisando o comportamento dos dois revestimentos utilizados, o gráfico dos efeitos principais Figura 35 revela que o revestimento de AlCrN sim produz o acréscimo da vida da ferramenta, isso se deve principalmente a que esse revestimento além de apresentar uma dureza bem maior do que o revestimento de AlTiN, apresenta uma estabilidade maior de sua dureza sofrendo caídas graduais conforme aumenta a temperatura, o que não acontece com o revestimento de AlTiN que após os 900 °C sofre uma caída drástica como visto na Figura 3 na revisão bibliográfica.

4.4 Acabamento das superfícies fresadas

4.4.1 Rugosidade média aritmética com ferramentas novas

Na Figura 36 são apresentados os resultados obtidos para a rugosidade média aritmética quando as ferramentas estavam novas. O valor da rugosidade para cada condição resultou do cálculo da média dos três valores mensurados na superfície usinada após o primeiro passe dado pela ferramenta de corte.

Figura 36. Rugosidade média inicial

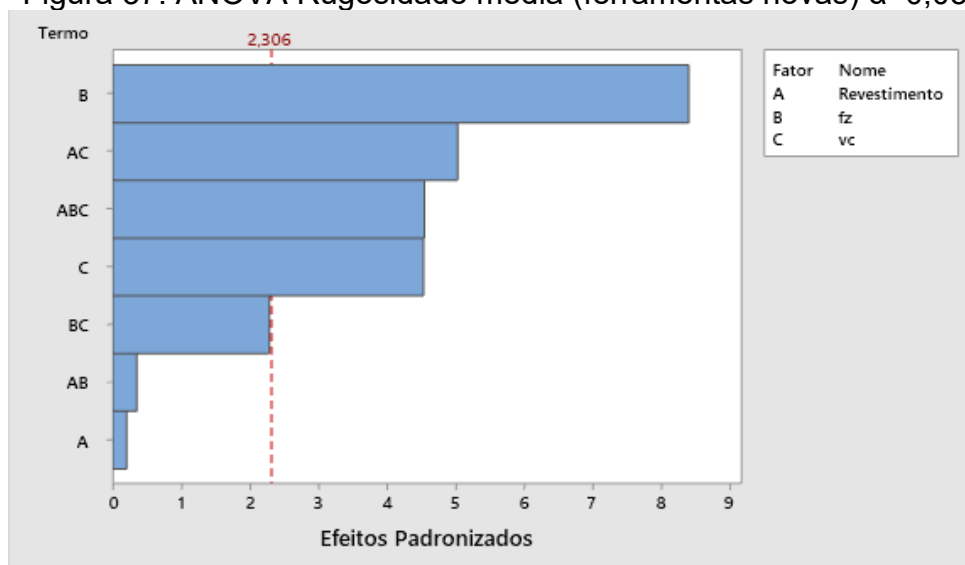


Fonte: Autora

No gráfico de colunas pode se observar que as rugosidades médias obtidas com as ferramentas novas e os parâmetros de corte definidos são bem baixas pois não superam os $0,7 \mu\text{m}$ que segundo à norma NBR 8404 (ABNT, 1984) corresponderia a uma rugosidade classe N6.

Uma análise visual indica que o aumento do avanço gera um impacto maior do que o aumento da velocidade de corte na rugosidade média obtida. O efeito de obter rugosidades maiores para o nível de avanço maior é de se esperar devido à contribuição geométrica desse fator. Pois como visto no planejamento experimental, a Equação (1) utilizada para o cálculo da rugosidade teórica depende principalmente do avanço por dente e do raio de ponta da ferramenta.

Se analisarmos os resultados com relação aos revestimentos utilizados não é apreciável uma diferença significativa entre as rugosidades obtidas com um e com outro.

Figura 37. ANOVA Rugosidade média (ferramentas novas) $\alpha=0,05$ 

Fonte: Autora

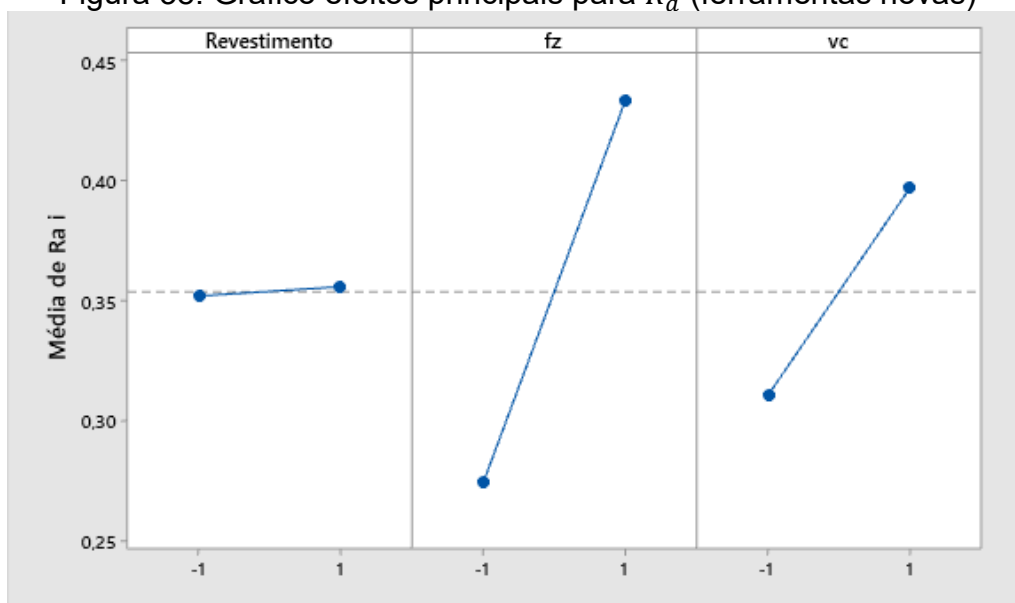
Na Figura 37, se observa como o avanço por dente é o fator mais significativo, seguido pelas interações entre o revestimento e a velocidade de corte, assim como a interação entre os três fatores e depois destes ainda aparece como significativo o fator velocidade de corte. Já a interação entre o avanço e a velocidade de corte, assim como do revestimento com o avanço e o fator revestimento não resultaram significativos para a resposta rugosidade.

Com o resultado da ANOVA corrobora-se a importância do aporte geométrico que tem o avanço por dente nas marcas deixadas pelas ferramentas de corte durante o fresamento. Em relação à velocidade de corte e às interações entre os fatores que também resultaram significativas, confirma-se que a rugosidade das superfícies usinadas depende também da presença de vibrações e da deformação plástica do material da peça.

Pois o aumento das vibrações pode acontecer graças ao comportamento do sistema máquina-ferramenta-peça em relação à velocidade de corte sendo utilizada, assim como da geometria e especificamente do raio de ponta das ferramentas utilizadas.

Em seguida é apresentado o gráfico de efeitos principais para a rugosidade média alcançada com as ferramentas novas possibilitando avaliar os efeitos individuais dos fatores testados.

Figura 38. Gráfico efeitos principais para R_a (ferramentas novas)



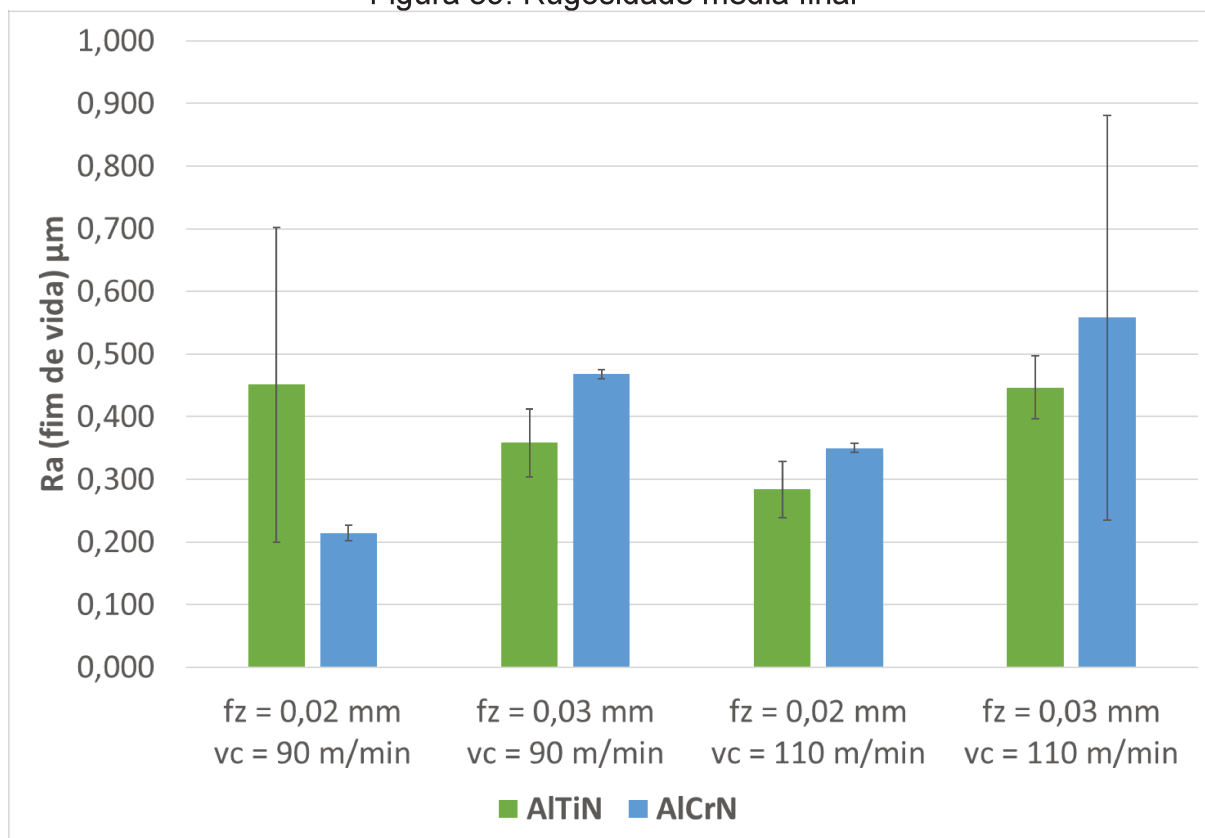
Fonte: Autora

A partir do gráfico de efeitos principais Figura 38 pode-se concluir de maneira geral que os três fatores no nível maior prejudicam a resposta de rugosidade média, isto é o aumento do avanço, da velocidade de corte e no caso do revestimento o uso das ferramentas com revestimento de AlCrN. Apesar disso no caso do revestimento, quando se observa com maior atenção repara-se que o aumento da rugosidade de um nível para o outro não é considerável.

4.4.2 Rugosidade média aritmética com ferramentas desgastadas

Em seguida são apresentados os resultados para as rugosidades R_a no final da vida das ferramentas. O valor da rugosidade para cada condição resultou do cálculo da média dos três valores mensurados na superfície usinada após o último passe dado pela ferramenta de corte.

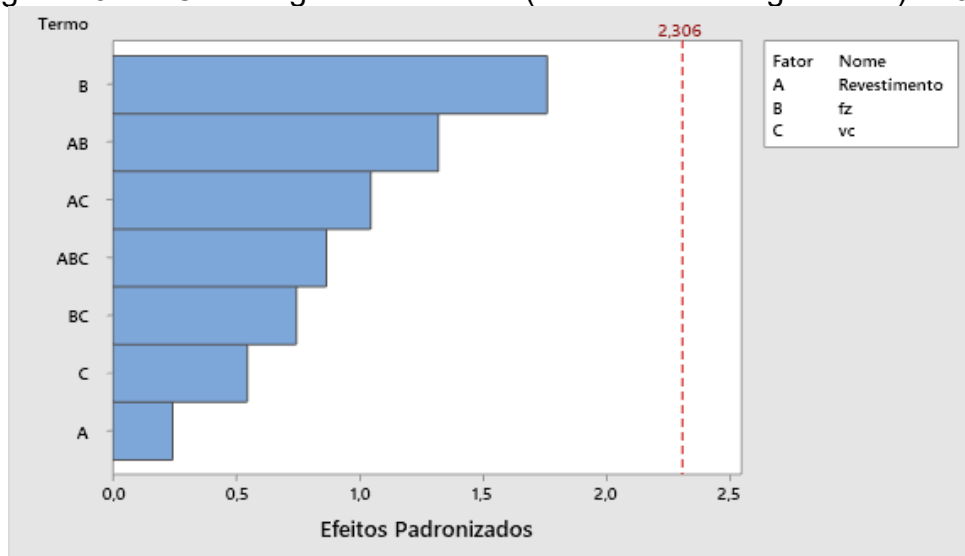
Figura 39. Rugosidade média final



Fonte: Autora

Desse primeiro gráfico percebe-se que as rugosidades médias atingidas com as ferramentas desgastadas são ligeiramente maiores do que as atingidas com as ferramentas novas. No caso da condição com o maior valor de avanço e de velocidade de corte e com revestimento de AlCrN foi atingida uma rugosidade de pouco mais de $0,8 \mu\text{m}$. Porém a diferença entre a rugosidade com a ferramenta nova e a ferramenta desgastada não é tão marcante. Outro fato interessante é que as rugosidades com as ferramentas desgastadas resultaram similares para várias das condições estudadas e já não se percebe a influência do avanço e da velocidade de corte nos resultados.

Figura 40. ANOVA Rugosidade média (ferramentas desgastadas) $\alpha=0,05$



Fonte: Autora

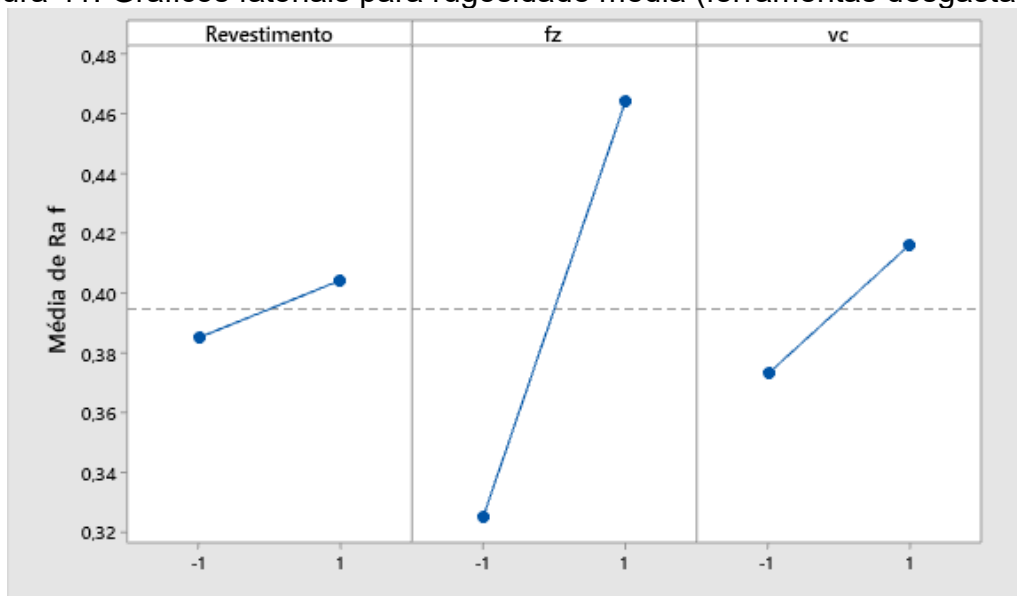
Na ANOVA da Figura 40, pode ser confirmado esse último fato pois nenhum dos três fatores sendo estudados nem as interações entre eles apresentaram-se como significativos.

No entanto, se comparamos a ordem em que estão os fatores e as interações desse último gráfico de pareto com os da rugosidade para as ferramentas novas, se observam mudanças significativas. Assim, a interação entre o revestimento e o avanço por dente que antes aparecia quase no final agora está em segundo lugar, logo depois do avanço. As demais interações entre fatores também resultaram ser preponderantes se comparadas com os fatores velocidade de corte e revestimento isolados.

Essas alterações no grau de influência dos fatores são consequência do desgaste variável das arestas de corte e do fluxo irregular de saída de cavacos que nesta fase de desgaste da ferramenta seria impossível controlar ou mitigar. Com o desgaste das arestas de corte aumenta-se a área de contato com a peça e consequentemente a fricção e as vibrações o que prejudica a rugosidade.

Em seguida são apresentados os gráficos fatoriais para a rugosidade média alcançada com as ferramentas desgastadas.

Figura 41. Gráficos fatoriais para rugosidade média (ferramentas desgastadas)



Fonte: Autora

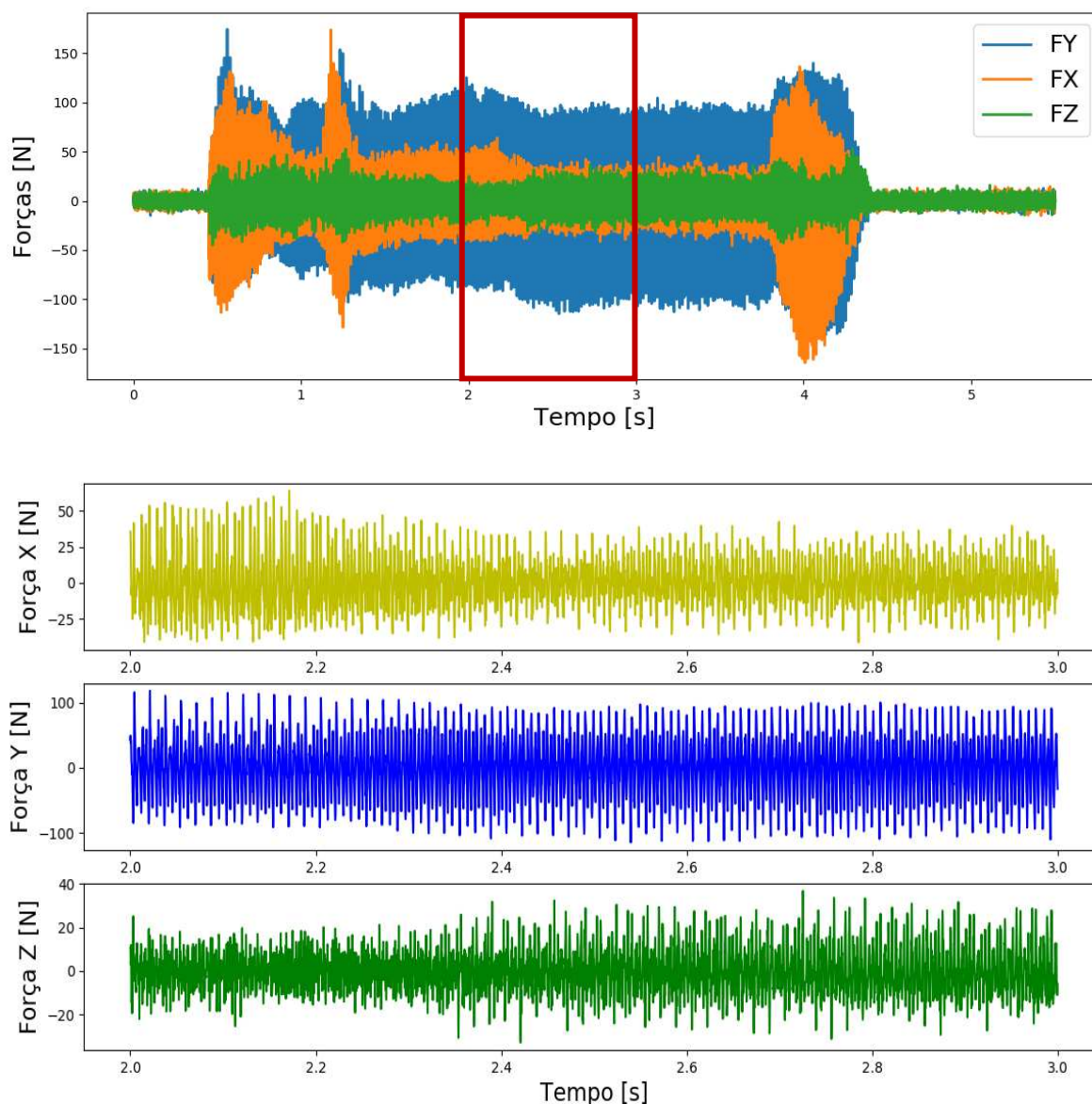
Na Figura 41 no gráfico de efeitos principais se corrobora que o avanço continua sendo o fator com maior influência na rugosidade pois a linha está mais inclinada se comparada com a da velocidade de corte e do revestimento.

4.5 Análise sinais de força

Para a análise dos sinais de força que será feita em seguida, primeiro foi escolhida uma fração estável do sinal de um segundo, depois calculada a raiz do valor quadrático meio (RMS) para essa porção do sinal, por fim esses valores de RMS obtidos para cada uma das componentes da força foram somadas para obter o valor da força de usinagem total F_U , ver Equação (5).

$$F_U = \sqrt{F_X^2 + F_Y^2 + F_Z^2} \quad (5)$$

Figura 42. Exemplificação fração estável do sinal (um segundo)

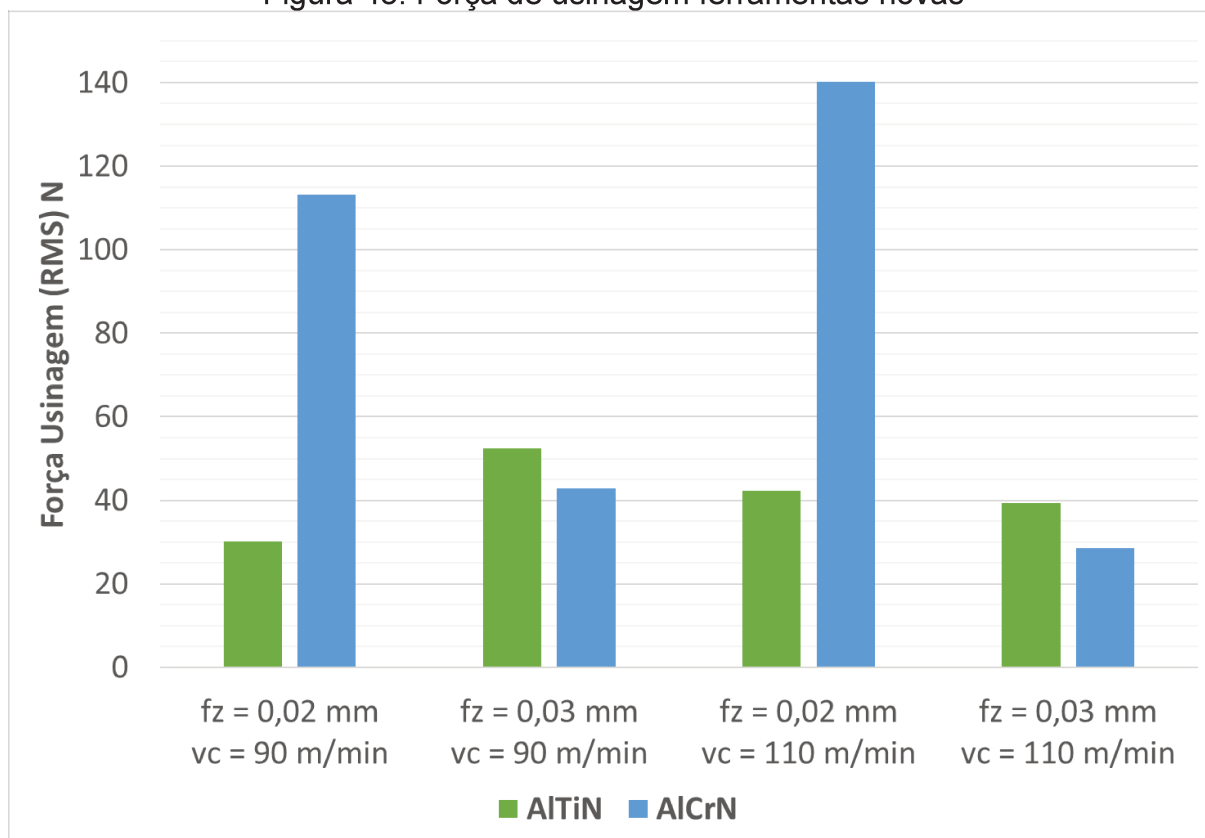


Fonte: Autora

Os sinais de força foram mensurados para as oito condições com as ferramentas novas e para sete destas quando as ferramentas estavam com um desgaste de flanco maior a $0,1 \text{ mm}$ ou já mais próximo de $0,2 \text{ mm}$. No Anexo B são mostrados os espectros dos sinais de força para todas as condições com as ferramentas novas.

No seguinte gráfico são apresentadas as forças de usinagem F_U calculadas a partir do procedimento explicado acima para as oito condições diferentes com as ferramentas novas.

Figura 43. Força de usinagem ferramentas novas

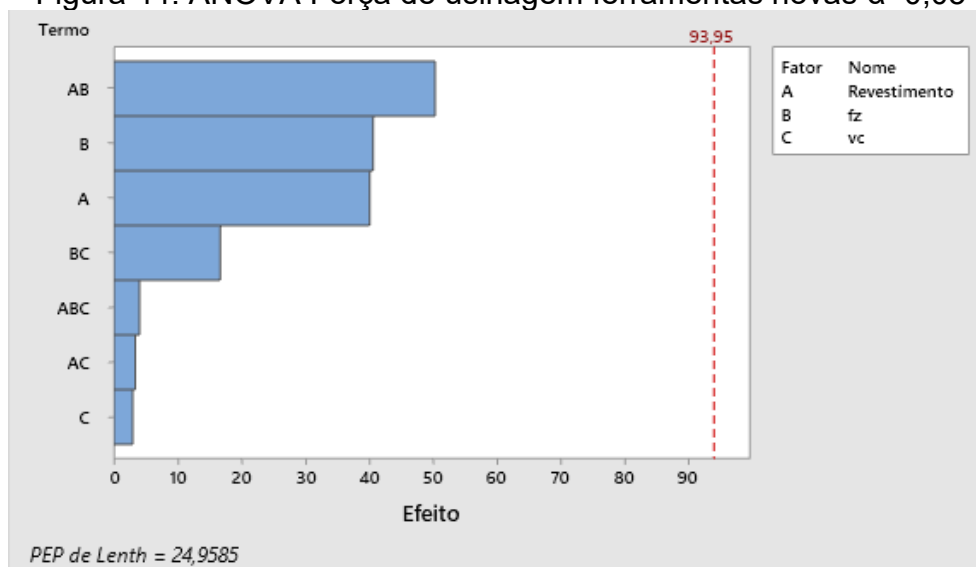


Fonte: Autora

Na figura se observa pouca variação na magnitude da força de usinagem para seis das condições, estando ao redor dos 40 N. A menor força obtida foi de 28,486 N quando a velocidade de corte era 110 m/min, o avanço por dente 0,03 mm e o revestimento da ferramenta AlCrN. As maiores magnitudes de forças obtidas foram de 113,179 N e 140,155 N, os parâmetros utilizados foram avanço de 0,02 mm, revestimento de AlCrN e velocidades de corte de 90 m/min e 110 m/min respectivamente.

A simples vista se observa que quando foi mantido o avanço de 0,02 mm, para os dois revestimentos as forças de usinagem aumentaram com o aumento da velocidade de corte, e quando foi mantido o avanço de 0,03 mm para os dois revestimentos as forças de usinagem diminuíram com o aumento da velocidade de corte.

Em seguida são apresentados o gráfico de pareto resultante da análise de variância e os gráficos fatoriais para analisar os efeitos principais e as interações entres os fatores experimentais.

Figura 44. ANOVA Força de usinagem ferramentas novas $\alpha=0,05$ 

Fonte: Autora

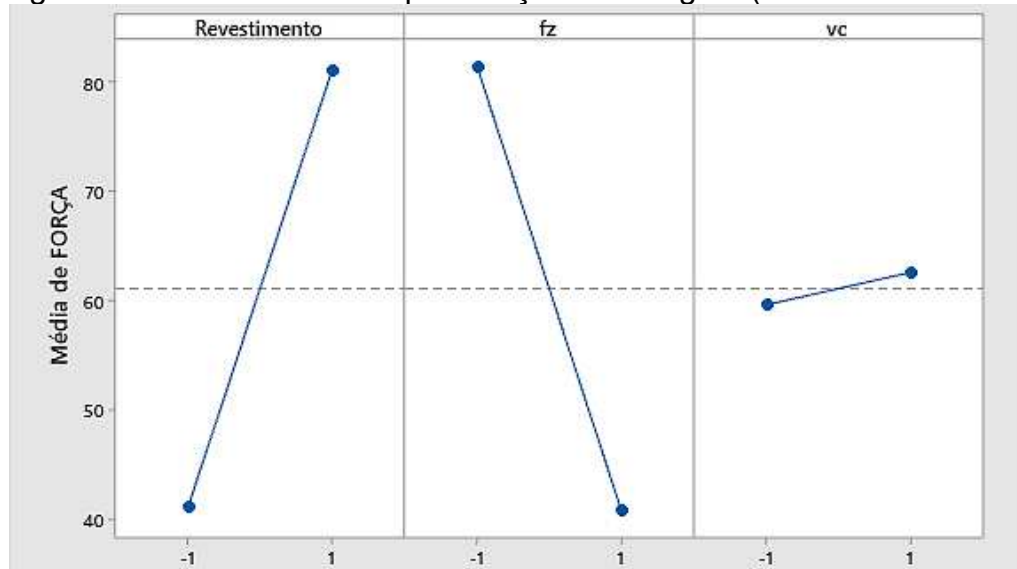
Segundo o diagrama de pareto nenhum dos fatores e das interações têm significância para a resposta força de usinagem. Porém analisando os resultados, se pode afirmar que a interação entre o revestimento da ferramenta e o avanço será o que mais influencie na força de corte quando as ferramentas estejam novas, seguida pelo efeito do avanço e do revestimento como fatores isolados. Logo após, em nível de significância aparecem as interações que incluem a velocidade de corte, e a mesma como fator isolado será a que menos afete na magnitude da força de usinagem.

Se analisarmos fator por fator, nos processos de fresamento a força de usinagem depende do número de dentes no corte e da espessura do cavaco, razão pela qual essa é calculada a partir do valor médio da pressão específica de corte K_S que também é determinada pelo valor médio da espessura de cavaco. (DINIZ; MARCONDES; COPPINI, 2014).

Como sabido, a pressão específica de corte diminui com o aumento da área da cunha cortante, isso devido principalmente ao aumento do avanço. Pois quando o avanço aumenta, a velocidade de avanço também cresce e provoca a diminuição do coeficiente de atrito. Além disso, o aumento do avanço minimiza o fluxo lateral do cavaco e diminui-se a força consumida por esse fenômeno. (DINIZ; MARCONDES; COPPINI, 2014). Esse efeito pode ser observado na Figura 43 para as ferramentas revestidas com AlCrN já que para as duas velocidades de corte testadas o aumento

do avanço sempre causou uma diminuição na força de usinagem. Contudo, avaliando o caso das ferramentas revestidas com AlTiN não seria tão simples afirmar que o mesmo efeito está acontecendo para essas ferramentas pois para a velocidade de corte de 90 m/min foi menor a força de usinagem obtida com o avanço menor.

Figura 45. Gráficos fatoriais para força de usinagem (ferramentas novas)



Fonte: Autora

Analisando o efeito praticamente nulo da velocidade de corte (Figura 44 e Figura 45) pode-se dizer que era de se esperar, pois esta tende a diminuir a força de usinagem nas situações em que o aumento da temperatura facilita a formação do cavaco porque diminui as propriedades mecânicas do material sendo usinado, que não é muito provável quando se usina a liga ASTM F75 um material com baixa condutividade térmica inclusive a altas temperaturas.

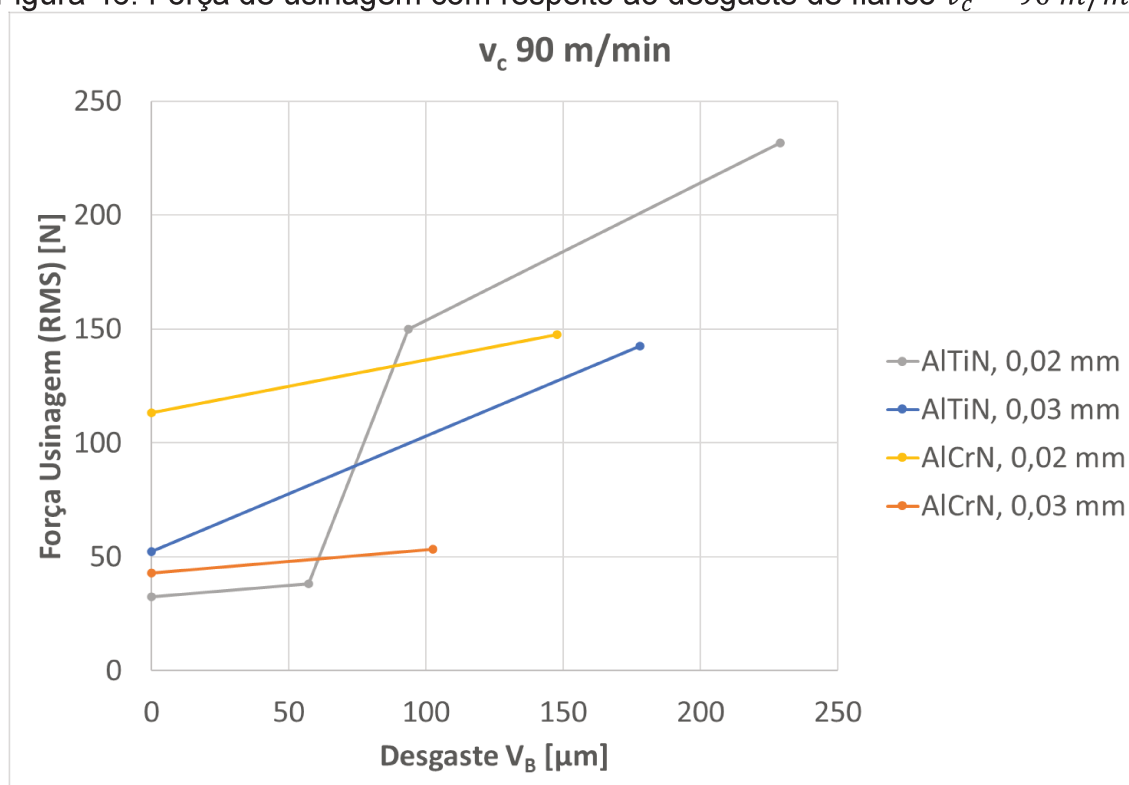
Do resultado do gráfico de efeitos principais (Ver Figura 45) percebe-se que o revestimento e o avanço são os fatores com maior influência na resposta força de usinagem já que a inclinação destas duas linhas é praticamente igual. Assim, a força de usinagem diminui com o aumento do avanço e as maiores forças de usinagem foram obtidas com as ferramentas revestidas com AlCrN.

4.5.1 Influência do desgaste de flanco na força de usinagem

Em seguida são apresentados os gráficos da evolução das forças com respeito ao desgaste de flanco para todas as condições estudadas. Ver Figura 46 e Figura 47.

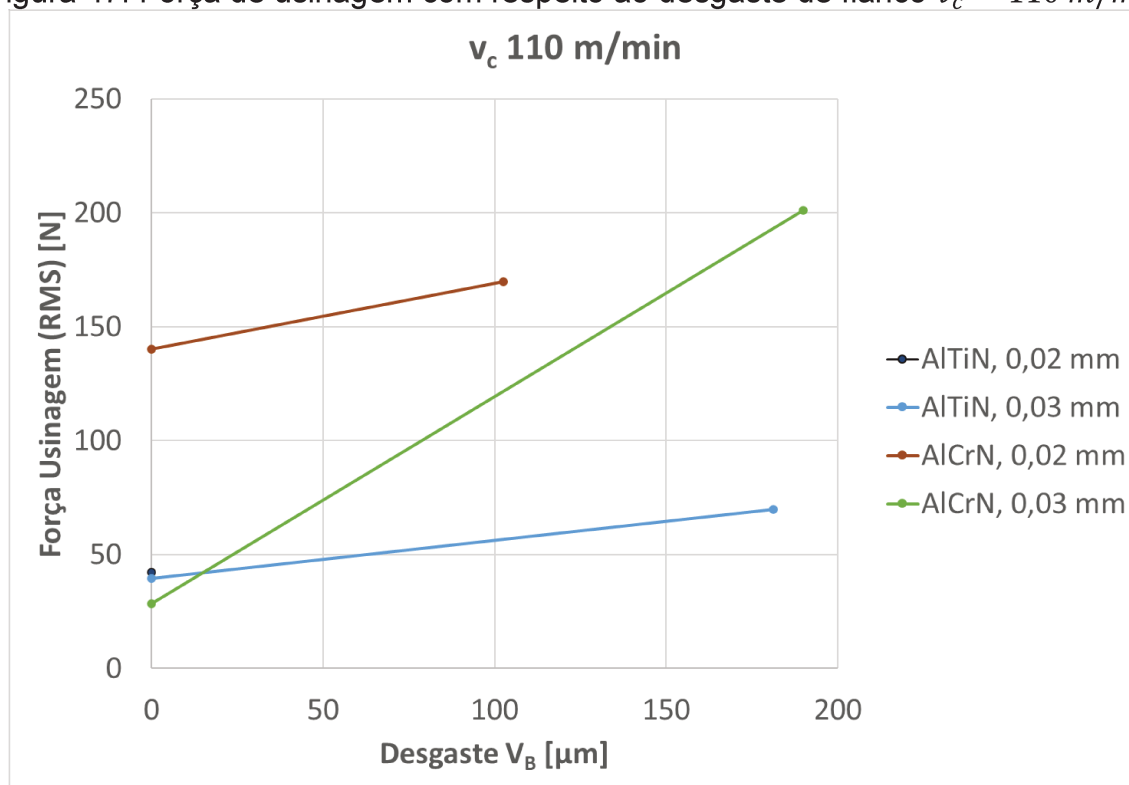
Como mencionado anteriormente foram medidas as forças de corte quando as ferramentas estavam novas para todas as condições. Para sete das oito condições foram mensuradas as forças de corte quando o desgaste de flanco já estava avançado com $0,1 \text{ mm}$ ou já quase no final da vida das ferramentas com $0,2 \text{ mm}$ segundo o planteado inicialmente. E só para uma das oito condições foram mensurados quatro pontos da evolução das forças de corte com respeito ao desgaste de flanco.

Figura 46. Força de usinagem com respeito ao desgaste de flanco $v_c = 90 \text{ m/min}$



Fonte: Autora

Figura 47. Força de usinagem com respeito ao desgaste de flanco $v_c = 110 \text{ m/min}$

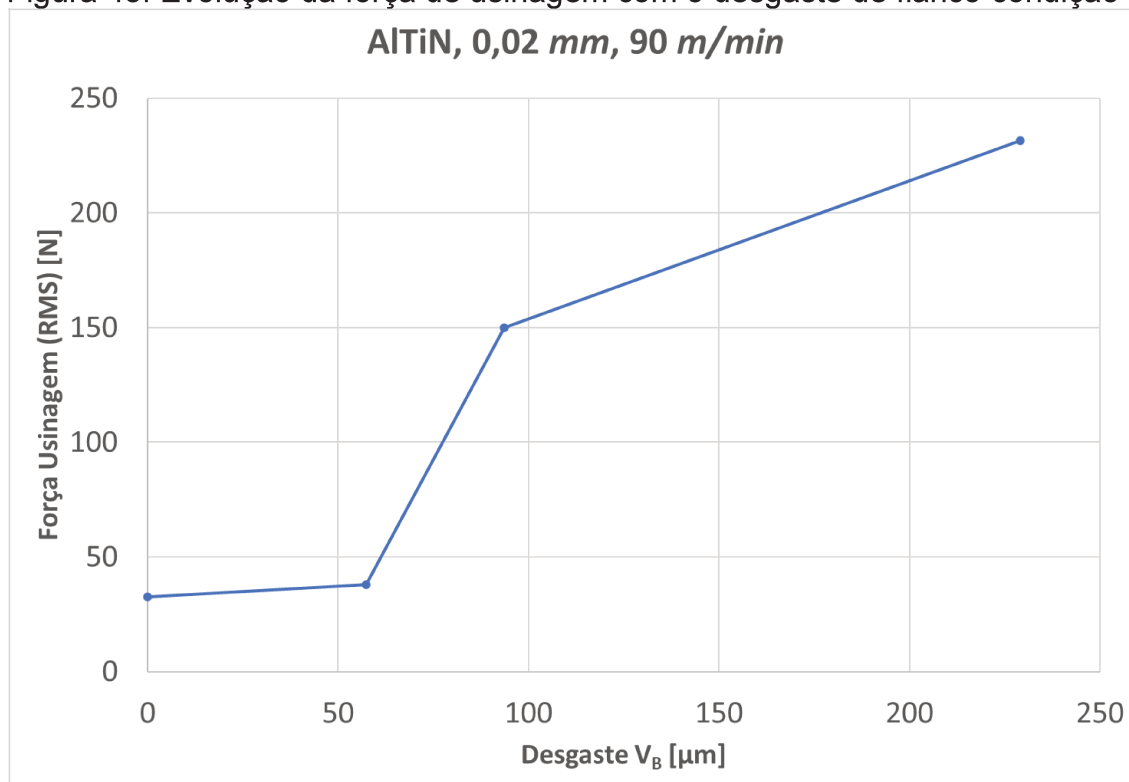


Fonte: Autora

Para todas as condições houve um aumento na força de corte dependendo do valor do desgaste de flanco e dos parâmetros de corte, entre outros fatores. Esse aumento esteve entre o 40 e o 80%.

A seguir na Figura 48 é apresentado o crescimento das forças de corte à medida que o desgaste de flanco cresce para a condição com a ferramenta revestida com AlTiN, um avanço de $0,02 \text{ mm}$ e uma velocidade de corte de 90 m/min . Escolheu-se esta condição para fazer uma análise mais aprofundada por ser a que apresentava mais pontos de medição, porém essas pressuposições não poderão ser estendidas de forma geral para todas as condições avaliadas.

Figura 48. Evolução da força de usinagem com o desgaste de flanco condição 1



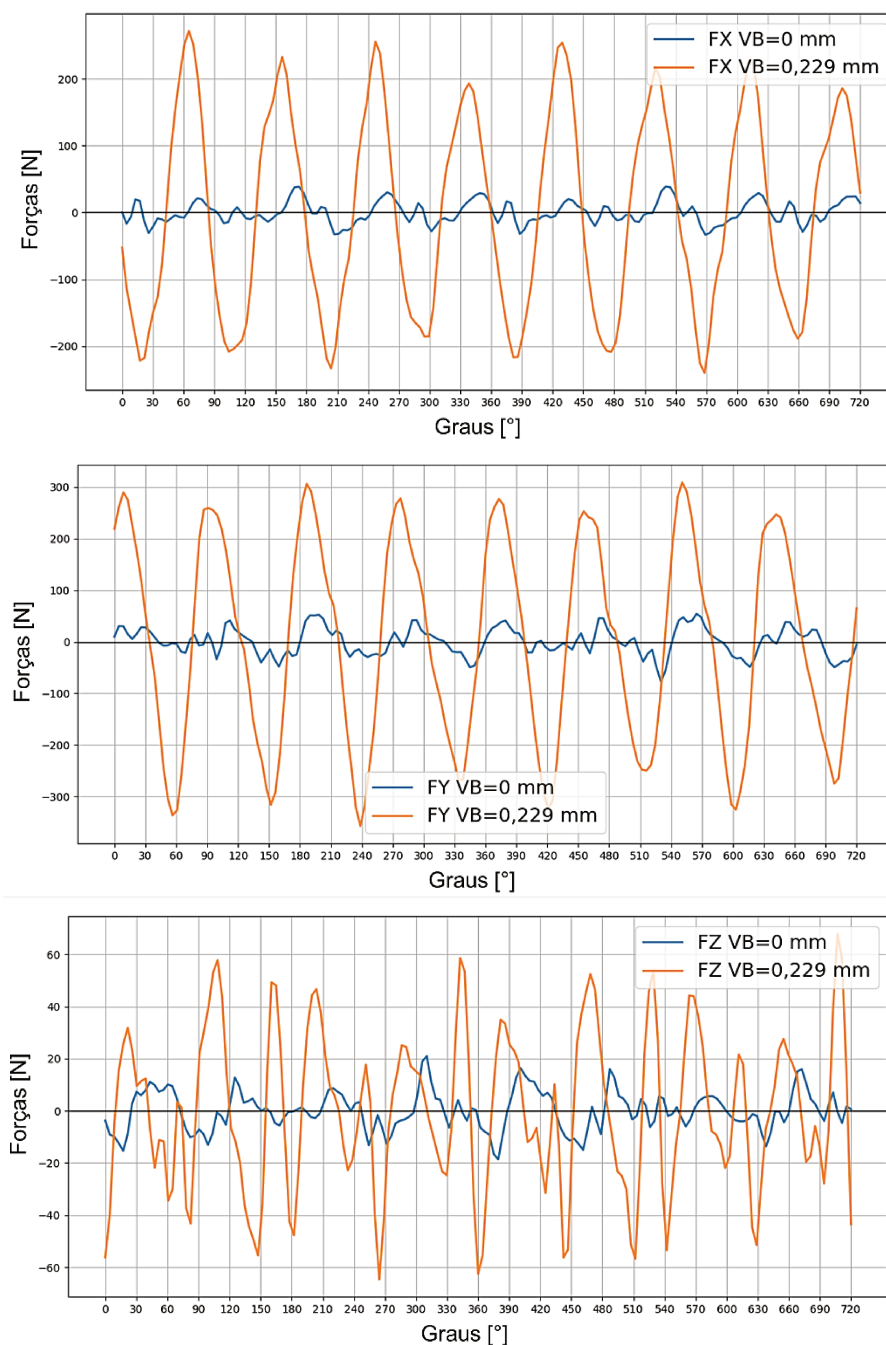
Fonte: Autora

Assim, observa-se que numa primeira fase quando o desgaste está entre 0 e um pouco mais de 0,05 mm a força de usinagem aumenta bem pouco poderia se dizer que é praticamente imperceptível. Já numa segunda fase quando o desgaste de flanco está entre 0,06 mm e 0,1 mm o aumento que se dá nos valores de força é muito maior. Finalmente, entre 0,1 mm e 0,2 mm de desgaste de flanco a força de usinagem continua aumentando, porém numa menor intensidade do que a observada na segunda fase.

O aumento da força de corte com o crescimento do desgaste de flanco é de se esperar pois isso acontece devido ao acréscimo do atrito entre a peça e a ferramenta. Por outro lado, a taxa de aumento das forças de corte com respeito ao desgaste de flanco só pode diminuir quando existe também a presença de desgaste de cratera. Esse último fenômeno acontece graças a que o ângulo de saída da ferramenta vai aumentar produzindo uma diminuição dos esforços necessários para a deformação do cavaco, equilibrando um pouco o aumento devido ao desgaste de flanco.

Nas seguintes figuras, apresentam-se os sinais de força durante duas revoluções para a condição sendo analisada: ferramenta revestida com AlTiN, avanço por dente de $0,02 \text{ mm}$ e velocidade de corte de 90 m/min , para a ferramenta nova e para a ferramenta já desgastada. Por cada volta foram adquiridos 84 pontos, sendo 35.000 o total de pontos durante todo o contato.

Figura 49. Forças de corte, duas revoluções, AlTiN, $f_z = 0,02 \text{ mm}$, $v_c = 90 \text{ m/min}$



Fonte: Autora

Na Figura 49 quando a ferramenta ainda não apresenta desgaste, os esforços de corte apresentam uma variação alta e se dificulta a identificação clara da posição das arestas no corte. Enquanto as magnitudes das forças, a força em Z evidencia ser a menor o que é de se esperar pois o corte não está sendo nessa direção e a magnitude apresentada corresponde à componente gerada devido ao ângulo de hélice da ferramenta de corte. As forças de corte na direção X e Y apresentam valores muito semelhantes, porém na direção Y essa grandeza é superior em razão da coincidência com o ponto do $h_{máx}$.

No entanto, quando a ferramenta já está completamente desgastada os esforços de corte se apresentam mais definidos e uniformes, permitindo maior clareza no momento de analisar a posição das arestas no corte.

5 CONCLUSÕES

A partir dos resultados e as discussões já apresentadas pode-se concluir que o aumento tanto da velocidade de corte quanto do avanço por dente prejudicou a vida das fresas de metal duro revestidas durante a usinagem da liga ASTM F75.

Desse modo, analisando o estado das fresas ao longo dos ensaios foi possível observar como iam aparecendo os diferentes tipos de desgaste. Assim, sempre houve presença do desgaste de flanco, que de fato foi escolhido como o parâmetro para determinar o fim da vida das ferramentas. E ocorreu também desgaste de cratera tanto na superfície de saída quanto na de folga, gerado principalmente pela ação do mecanismo de desgaste por adesão.

As crateras formadas nas superfícies das ferramentas foram mais pronunciadas com a velocidade de corte de 110 m/min e o avanço por dente de $0,03 \text{ mm}$ para os dois revestimentos avaliados. Já o lascamento e as trincas de origem mecânica foram maioritariamente desenvolvidos pelas ferramentas com revestimento de AlTiN.

Comparando os dois revestimentos utilizados pode-se afirmar que o revestimento de AlCrN apresentou um desempenho superior ao revestimento de AlTiN. Assim, as fresas revestidas com AlCrN segundo as análises de EDS mostraram menor tendência à aderência do material da peça nas arestas e maior resistência à ação abrasiva da liga ASTM F75.

A partir da medição do volume de cavaco removido pode-se dizer que o revestimento de AlCrN retirou em média $3414,8 \text{ mm}^3$ a mais do que o revestimento de AlTiN. Para fazer esse contraste não foi levada em conta a condição da velocidade de corte de 90 m/min com o avanço de $0,02 \text{ mm}$, pois os dois ensaios deram respostas muito divergentes.

De outro lado, a avaliação da rugosidade quando as ferramentas estavam novas apontou que o fator mais significativo para a resposta foi o avanço por dente o que era de se esperar, devido à importância do aporte geométrico deste parâmetro de corte e a que o sistema máquina-ferramenta-peça utilizado durante a usinagem era bastante rígido, pois dessa forma a ocorrência de vibrações é minimizada e a influência da velocidade de corte também.

As piores rugosidades com as ferramentas novas foram obtidas com os maiores parâmetros de corte e o revestimento de AlCrN, esse último fato foi explicado a partir da medição dos raios de aresta das fresas pois as ferramentas com revestimento de AlTiN tinham raios de aresta menores o que explica que as marcas deixadas por estas também sejam menores e portanto os valores de rugosidade medidos tenham sido favorecidos quando utilizadas estas fresas.

No caso das rugosidades obtidas com as ferramentas desgastadas, aumentaram um pouco se comparadas com as rugosidades que deixaram as ferramentas novas, além disso para todas as condições as rugosidades foram ficando mais uniformes. Nesta situação, as piores rugosidades foram obtidas com as ferramentas revestidas com AlTiN. Isso devido a que aquelas fresas apresentaram maiores desgastes, maior adesão do material da peça e deformação das arestas nos estágios finais, o que prejudica significativamente os sinais do passo da fresa sobre o material.

Por fim, a medição das forças de corte mostrou que à medida que o desgaste de flanco crescia estas também aumentavam. Mas segundo o analisado para a condição da velocidade de corte de 90 m/min , o avanço por dente de $0,02 \text{ mm}$ e as fresas revestidas com AlTiN, houve uma diferença significativa na taxa de aumento dos esforços dependendo do nível do desgaste de flanco, assim que foram observadas três etapas principalmente: a primeira aquela em que o desgaste de flanco estava entre os 0 e os $0,05 \text{ mm}$ e as forças de corte eram praticamente iguais, a segunda em que o desgaste de flanco passava de $0,05$ até $0,1 \text{ mm}$ e para a qual as forças aumentaram rapidamente e finalmente a terceira com o desgaste de flanco entre $0,1$ e $0,2 \text{ mm}$ com um aumento dos esforços mais desacelerado se comparado com a segunda etapa. Essa diferença significativa nas fases dois e três se presume que é devida aos tipos de desgaste desenvolvidos, assim na etapa dois o desgaste das ferramentas se dá predominantemente por causa da abrasão, mas na terceira etapa o desgaste por aderência de material também acontece aumentando o ângulo de saída da ferramenta e diminuindo assim o acréscimo dos esforços de corte.

6 TRABALHOS FUTUROS

- Repetir os ensaios com velocidades de corte entre 60 *m/min* e 90 *m/min*, pois nesta faixa parece estar a velocidade de máxima produtividade.
- Fazer uma análise metalográfica do material usinado e avaliar o tamanho da camada da superfície encruada para entender melhor seus efeitos no desgaste das ferramentas.
- Medir as temperaturas durante o fresamento da liga ASTM F75, tanto na fresa quanto na peça, para verificar as faixas em que estas ocorrem e verificar qual seria a melhor forma de refrigerar o processo visando aumentar a vida das ferramentas.
- Testar diferentes métodos de refrigeração e lubrificação do processo de fresamento e determinar qual favorece às ferramentas durante a usinagem deste material.

REFERÊNCIAS

AOS, A. A. OF O. S. **Our knowledge of orthopaedics. Your best health.** Disponível em: <<https://orthoinfo.aaos.org/>>. Acesso em: 8 apr. 2019.

ABNT. **NBR 8404 Indicação do estado de superfícies em desenhos técnicos.** Rio de Janeiro: 1984.

AHEARNE, E. et al. Tool Wear in Milling of Medical Grade Cobalt Chromium Alloy - Requirements for Advanced Process Monitoring and Data Analytics. **The Machine Tool Technologies Research Foundation (MTTRF) and iAM-CNC Annual Meeting 2016, San Fransisco, California, USA, 5-7 July 2016**, 2016.

AHEARNE, E.; BARON, S.; AHEARNE, E. Fundamental mechanisms in orthogonal cutting of medical grade cobalt chromium alloy (ASTM F75). **CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology**, v. 23, p. 54–63, Nov. 2017.

AKBAR, H. et al. Machinability of Cobalt-based and Cobalt Chromium Molybdenum Alloys - A Review. **Procedia Manufacturing**, v. 11, n. June, p. 563–570, 2017.

ASTM INTERNATIONAL. **Standard Specification for Cobalt-28 Chromium-6 Molybdenum Alloy Castings and Casting Alloy for Surgical Implants (UNS R30075)**¹Astm, 2015.

AYKUT, Ş. et al. Experimental observation of tool wear, cutting forces and chip morphology in face milling of cobalt based super-alloy with physical vapour deposition coated and uncoated tool. **Materials & Design**, v. 28, n. 6, p. 1880–1888, Jan. 2007.

BARON, S. et al. An Assessment of Medical Grade Cobalt Chromium Alloy ASTM F1537 as a “ Difficult-to-Cut (DTC)” Material. p. 2–7, 2015.

BARON, S.; AHEARNE, E. An investigation of force components in orthogonal cutting of medical grade cobalt – chromium alloy (ASTM F1537). v. 231, n. 4, p. 269–275, 2017.

BARON, S.; DESMOND, D.; AHEARNE, E. The fundamental mechanisms of wear of cemented carbide in continuous cutting of medical grade cobalt chromium alloy (ASTM F75). **Wear**, v. 424–425, n. January, p. 89–96, Apr. 2019.

BHAT, S. V. **Biomaterials**. Narosa Pub ed. Dordrecht: Springer Netherlands, 2002.

BLUM GARCÍA, X. et al. **COMPARATIVO DO DESGASTE EM FRESAS DE METAL DURO COM REVESTIMENTO NA USINAGEM DA LIGA ASTM F75**. 10º Congresso Brasileiro de Engenharia de Fabricação. **Anais...ABCM**, 2019. Disponível em: <<http://abcm.org.br/anais-de-eventos/COF2019/0365>>

BOBZIN, K. CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology High-performance coatings for cutting tools. **CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology**, v. 18, n. 2017, p. 1–9, 2018.

BORDIN, A. et al. Machinability Characteristics of Wrought and EBM CoCrMo Alloys. **Procedia CIRP**, v. 14, p. 89–94, 2014.

BORDIN, A.; BRUSCHI, S.; GHIOTTI, A. The effect of cutting speed and feed rate on the surface integrity in dry turning of CoCrMo alloy. **Procedia CIRP**, v. 13, p. 219–224, 2014.

DAVIM, J. P. **Surface Integrity in Machining**. London: Springer London, 2010.

DAVIS, J. R. **Handbook of Materials for Medical Devices**. United States of America: ASM International, 2003.

DINIZ, A. E.; MARCONDES, F. C.; COPPINI, N. L. **Tecnologia da Usinagem**

dos Materiais. 9. ed. São Paulo: Artliber Editora, 2014.

FERREIRA, P.; SIMÕES, F.; RELVAS, C. Experimental analysis of milling operations in Ti-6Al-4V and Co-28Cr-6Mo alloys for medical devices. **Key Engineering Materials**, v. 612, p. 1282–1293, 2014.

GALLO, G. **Influência do tratamento térmico sobre a tenacidade de um aço com AISI SAE 1045 com médio teor de carbono, avaliada por ensaios de impacto**. UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA, 2006.

GRZESIK, W. Surface Integrity. In: **Advanced Machining Processes of Metallic Materials**. Elsevier, 2017. p. 533–561.

HASIRCI, V.; HASIRCI, N. **Fundamentals of Biomaterials**. New York, NY: Springer New York, 2018.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **ISO 8688-2:1989 Tool life testing in milling -- Part 2: End milling**. Disponível em: <<https://www.iso.org/obp/ui/#iso:std:iso:8688:-2:ed-1:v1:en:fig:8>>. Acesso em: 31 oct. 2018.

IPEREM, J.-W.; ZANDERS, R. **Novas estratégias para usinar componentes ortopédicos - Usinagem Brasil**. Disponível em: <<http://www.usinagem-brasil.com.br/13405-novas-estrategias-para-usinar-componentes-ortopedicos/pa-1/>>. Acesso em: 22 oct. 2018.

KARPUSCHEWSKI, B.; DÖRING, J. Influence of the Tool Geometry on the Machining of Cobalt Chromium Femoral Heads. **Procedia CIRP**, v. 49, p. 67–71, 2016.

KLARSTROM, D. L. Wrought cobalt- base superalloys. **Journal of Materials Engineering and Performance**, v. 2, n. 4, p. 523–530, Aug. 1993.

KOIKE, Y. et al. Improving tool life in end milling of Cobalt Chromium Molybdenum alloy. **Proc. of LEM21, Osaka University, Japan**, p. 653–656, 2009.

LI, L. et al. Process Parameters Decision to Optimization of Cold Rolling-Beating Forming Process through Experiment and Modelling. **Metals**, v. 9, n. 4, p. 405, 2 Apr. 2019.

MACHADO, A. R. . et al. **Teoria da Usinagem dos Materiais**. São Paulo: Blücher, 2009.

MALSHE, A. P.; JIANG, W.; DHAMDHERE, A. R. Nanostructured coatings for machining and wear-resistant applications. **JOM**, v. 54, n. 9, p. 28–30, Sep. 2002.

MARTINEZ ANTUNEZ, L. H. **Caracterização da liga Co-28Cr-6Mo obtida por manufatura aditiva e microfundição**. Campinas, SP: UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS, 2017.

MCPARLAND, D. et al. Prediction of tool-wear in turning of medical grade cobalt chromium molybdenum alloy (ASTM F75) using non-parametric Bayesian models. **Journal of Intelligent Manufacturing**, 2017.

MONTGOMERY, D. C. **Estatística aplicada e probabilidade para engenheiros**. 6. ed. ed. Rio de Janeiro: 2018.

MURPHY, W.; BLACK, J. **Handbook of Biomaterial Properties**. Second ed. New York, NY: Springer New York, 2016.

NARAYAN, R.; PILLIAR, R. M. **Biomedical Materials**. Boston, MA: Springer US, 2009.

NAVARRO, M. et al. Review. Biomaterials in orthopaedics. **J. R. Soc. Interface**, v. 5, n. July, p. 1137–1158, 2008.

OERLIKON BALZERS. **Plasma-Assisted Coating Processes Fundamentals, technologies, systems and industrial applications**. Disponível em: <<https://oerlikon-balzers.bibliothek-der-technik.de/app/grundlagen-en-us/>>. Acesso em: 25 feb. 2020.

OERLIKON BALZERS. **Guia de revestimentos Oerlikon Balzers**. Disponível em: <https://www.oerlikon.com/balzers/br/pt-br/guia-de-revestimentos-oerlikon-balzers/?structure_id=24098>. Acesso em: 15 dec. 2019.

PARK, J.; LAKES, R. S. **Biomaterials**. New York, NY: Springer New York, 2007.

SHOKRANI, A.; DHOKIA, V.; NEWMAN, S. T. Cryogenic High Speed Machining of Cobalt Chromium Alloy. **Procedia CIRP**, v. 46, p. 404–407, 2016.

STAHL, J.-E. et al. **Metal cutting: theories and models**. Lund University, Division of Production and Materials Engineering, 221 00 Lund, Sweden: Division of Production and Materials Engineering, 2012, 2012.

SUMITA, M. et al. Failure Processes in Biometallic Materials. In: **Comprehensive Structural Integrity**. Elsevier Ltd., 2003. p. 131–167.

SUSKI, C. A.; OLIVEIRA, C. A. S. DE. Coating and Applications. In: DAVIM, J. P. (Ed.). **Tribology in Manufacturing Technology**. Materials Forming, Machining and Tribology. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2013.

TRENT, E. M.; WRIGHT, P. K. **Metal Cutting**. 4. ed. Butterworth–Heinemann, 2000.

UGALMUGALE, S.; SWAIN, R. **Orthopedic Devices Market Size By Product (Joint Reconstruction {Hip Replacement, Knee Replacement, Ankle Replacement, Shoulder Replacement}, Spinal Devices, Trauma Fixation Devices, Orthobiologics, Arthroscopic Devices), Industry Analysis Report**,

Regiona. Disponível em: <<https://www.gminsights.com/industry-analysis/orthopedic-devices-market>>. Acesso em: 21 jul. 2020.

UIJL, N. J. DEN; CARLESS, L. J. Advanced metal-forming technologies for automotive applications. In: **Advanced Materials in Automotive Engineering**. Elsevier, 2012. p. 28–56.

VIEIRA, M. A. D. C. **Aula 20 Teoria de Amostragem**. Disponível em: <<http://iris.sel.eesc.usp.br/sel414m/>>. Acesso em: 6 feb. 2020.

WORLD HEALTH ORGANIZATION. **Ageing and health**. Disponível em: <<https://www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/ageing-and-health>>. Acesso em: 21 jul. 2020.

YAMANE, Y.; SEKIYA, K. An Evaluation of Difficulty in Machining Difficult-to-Cut Materials by using Difficult-to-Cut Rating. **Journal of the Japan Society for Precision Engineering**, v. 70, n. 3, p. 407- 411(in Japanese), 2004.

YINGFEI, G.; MUÑOZ DE ESCALONA, P.; GALLOWAY, A. Influence of Cutting Parameters and Tool Wear on the Surface Integrity of Cobalt-Based Stellite 6 Alloy When Machined Under a Dry Cutting Environment. v. 26, n. January, p. 312–326, 2017.

ANEXO A: COMPARAÇÃO ENTRE OS BIOMATERIAIS EXISTENTES

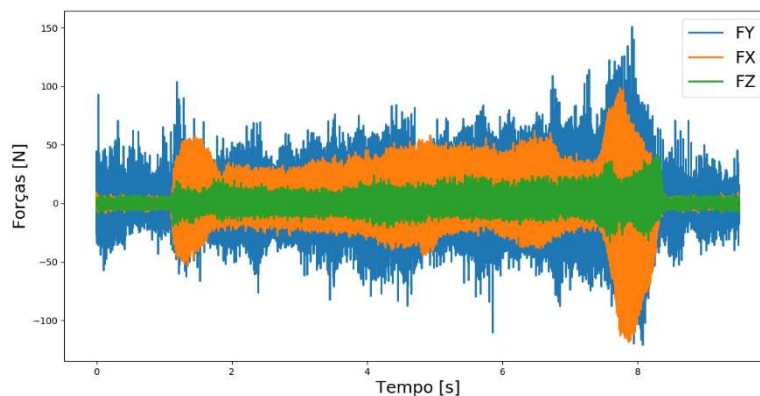
Material			
Origem natural (Biopolímeros)	Polímeros sintéticos	Cerâmicos	Metais
Exemplos			
Celulosa Colágeno Ácido hialurônico	Polimetilmetacrilato, policloreto de vinil, teflon, polietileno, dácron, polipropileno, náilon, poliuretano	Óxido de alumínio, dióxido de titânio, hidroxiapatita	Aços inoxidáveis, titânio, ligas de cobalto-cromo
Vantagens			
Abundantes, baixo custo, propriedades mecânicas similares a dos tecidos	Degradáveis, não sofrem corrosão, densidade similar a dos tecidos suaves, processamento simples, maleáveis, possibilidade de formar modelos complexos	Inertes, imitam os tecidos biológicos inorgânicos, alta resistência à compressão	Alta resistência à tensão e compressão, alta resistência ao desgaste e ao impacto
Desvantagens			
Degradáveis, causam resposta do sistema imune	Degradáveis, baixa resistência, fluem sob esforços e sob altas temperaturas, baixa resistência ao desgaste e ao impacto	Alta densidade, frágeis, difíceis de reproduzir	Corrosão, alta densidade, difíceis de se processar, dificuldade para se produzir geometrias complexas, liberação de íons no fluido biológico
Aplicações			
Tecidos, curativos de feridas, suturas, pele artificial	Implantes de tecidos brandos, lentes de contato, placas e cimento ósseo, obturações dentárias	Implantes de tecidos duros que trabalham sob compressão: coroas dentárias e cabeças femorais	Placas ósseas, parafusos, pinos, grampos, articulações

Fonte: Adaptado de (HASIRCI; HASIRCI, 2018)

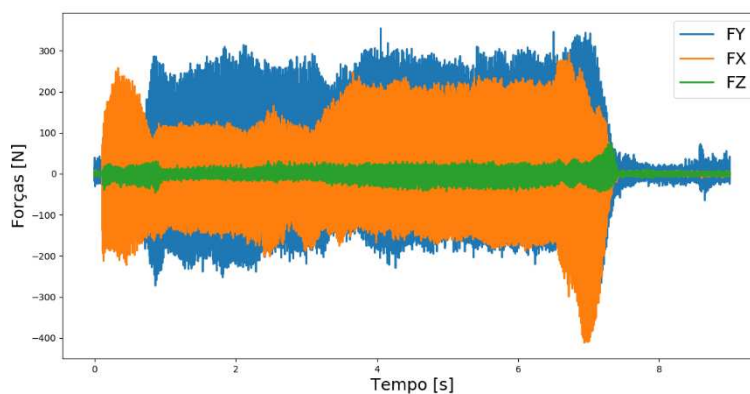
ANEXO B: SINAIS DE FORÇAS DE CORTE

Ferramentas novas, $v_c = 90 \text{ m/min}$

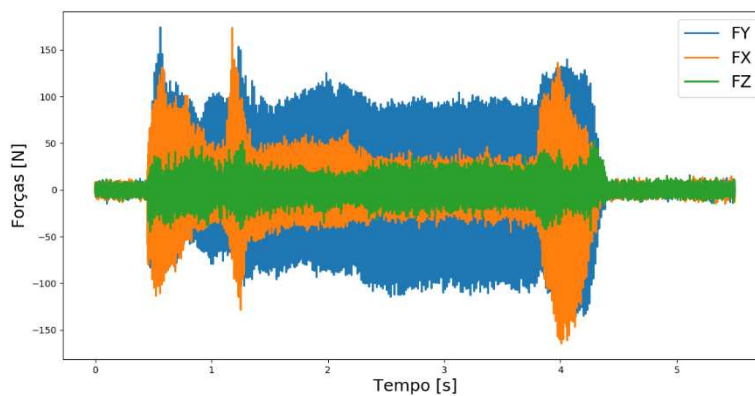
AlTiN
 $f_z = 0,02 \text{ mm}$



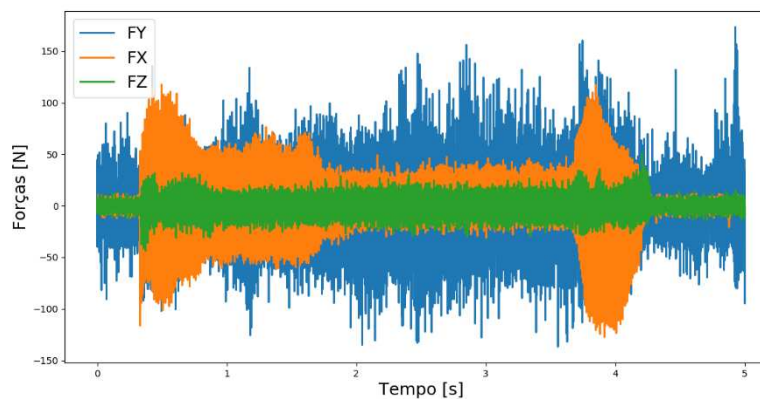
AlCrN
 $f_z = 0,02 \text{ mm}$



AlTiN
 $f_z = 0,03 \text{ mm}$

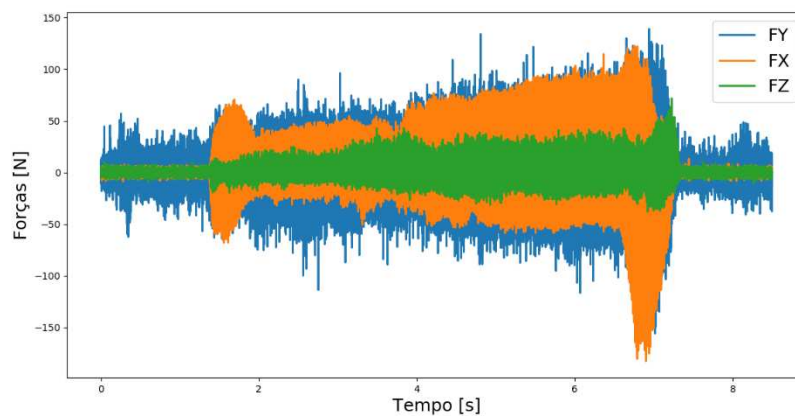


AlCrN
 $f_z = 0,03 \text{ mm}$

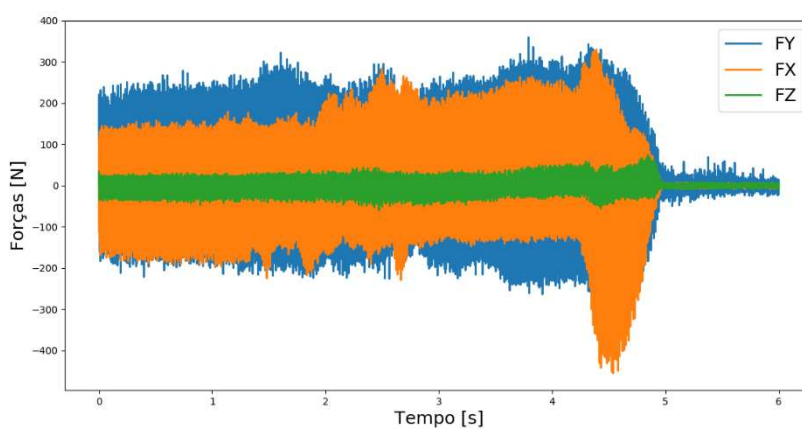


Ferramentas novas, $v_c = 110 \text{ m/min}$

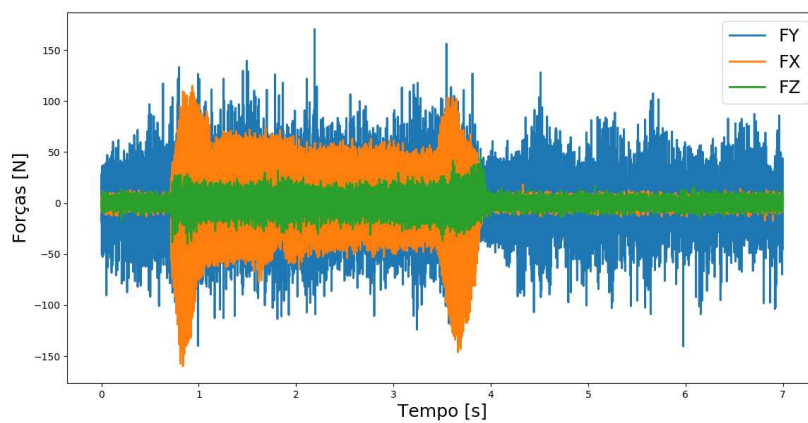
AlTiN
 $f_z = 0,02 \text{ mm}$



AlCrN
 $f_z = 0,02 \text{ mm}$



AlTiN
 $f_z = 0,03 \text{ mm}$



AlCrN
 $f_z = 0,03 \text{ mm}$

