# UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO ESCOLA DE ENGENHARIA DE SÃO CARLOS

## KANDICE SUANE BARROS RIBEIRO

Monitoramento da condição da ferramenta no microfresamento por sinais de potência e emissão acústica

#### KANDICE SUANE BARROS RIBEIRO

Monitoramento da condição da ferramenta no microfresamento por sinais de potência e emissão acústica

Dissertação apresentada à Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, como requisito para a obtenção do Título de Mestra em Engenharia Mecânica.

Orientador: Prof. Assoc. Alessandro Roger Rodrigues.

ESTE EXEMPLAR TRATA-SE DA VERSÃO CORRIGIDA. A VERSÃO ORIGINAL ENCONTRA-SE DISPONÍVEL JUNTO AO DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA DA EESC-USP

São Carlos

AUTORIZO A REPRODUÇÃO TOTAL OU PARCIAL DESTE TRABALHO, POR QUALQUER MEIO CONVENCIONAL OU ELETRÔNICO, PARA FINS DE ESTUDO E PESQUISA, DESDE QUE CITADA A FONTE.

Ficha catalográfica elaborada pela Biblioteca Prof. Dr. Sérgio Rodrigues Fontes da EESC/USP com os dados inseridos pelo(a) autor(a).

R484m

Ribeiro, Kandice Suane Barros Monitoramento da condição da ferramenta no microfresamento por sinais de potência e emissão acústica / Kandice Suane Barros Ribeiro; orientador Alessandro Roger Rodrigues. São Carlos, 2019.

Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica e Área de Concentração em Projeto, Materiais e Manufatura -- Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, 2019.

1. Microfresamento de topo. 2. Desgaste da ferramenta . 3. Estabilidade de corte. 4. Monitoramento. 5. Emissão acústica. 6. Potência. I. Título.

Eduardo Graziosi Silva - CRB - 8/8907

## **FOLHA DE JULGAMENTO**

Candidata: Bacharel KANDICE SUANE BARROS RIBEIRO.

Título da dissertação: "Monitoramento da condição da ferramenta no microfresamento por meio de sinais de potência e emissão acústica"

Data da defesa: 22/02/2019

Comissão Julgadora:

Resultado:

Prof. Dr. Alessandro Roger Rodrigues (Orientador)

(Escola de Engenharia de São Carlos/EESC)

Aprovado

Prof. Dr. Amauri Hassui

(Universidade Estadual de Campinas/UNICAMP)

Aprovada

Prof. Dr. Daniel Iwao Suyama

(Universidade Estadual de Campinas/UNICAMP)

Aprovado

Coordenador do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica:

Prof. Titular Gherhardt Ribatski

Presidente da Comissão de Pós-Graduação:

Prof. Titular Luis Fernando Costa Alberto

À minha família pelo amor e carinho ao longo de mais uma jornada.

#### **AGRADECIMENTOS**

O desenvolvimento deste trabalho contou com o auxílio de diversas pessoas, as quais presto meus agradecimentos a seguir:

À minha família, base de tudo o que eu sou, por ser minha fortaleza em mais uma jornada. Em especial, agradeço à Ivandde, Francisco, Kátia, Kleber, Lia, Rodes e Giovanni pelo amor incondicional e por sempre estarem ao meu lado.

Ao Prof. Assoc. Alessandro Roger Rodrigues, agradeço pela orientação, confiança e pela contribuição para o meu crescimento pessoal e profissional nos últimos dois anos.

Aos Prof. Tit. Reginaldo Teixeira Coelho, Prof. Tit. João Fernando Gomes de Oliveira, Prof. Assoc. Eraldo Janonne da Silva, Prof. Dr. Marcelo Bertolete Carneiro e Profa. Dra. Maíra Martins da Silva pela contribuição com a instrumentação dos ensaios; e aos Prof. Tit. Renato Goulart Jasinevicius, Prof. Dr. Carlos Magno de Oliveira Valente e Dr. Marcelo Marchi pelas ideias compartilhadas durante o desenvolvimento da primeira etapa deste trabalho.

Aos Prof. Assoc. Adilson José de Oliveira, Prof. Dr. Walter Link e Profa. Assoc. Salete Martins Alves da Universidade Federal do Rio Grande do Norte a minha gratidão pelo incentivo, apoio e experiência compartilhada desde a graduação.

À Dhara Vieira, Letícia Goes, Yasmin Honório, Maria Augusta, Rodrigo José e Adriana Norcino pelo apoio e incentivo amigo, e aos membros do Grupo de Inovação em Manufatura e Engenharia de Precisão e colegas do Laboratório de Engenharia de Precisão: José Otoboni, Ricardo Arai, Marcel Dib, Daniel Secco, Flávio Manarelli, Igor Basso e Marcelo Batista pela troca de experiências no dia a dia. Agradeço também à Giuliana Venter pela ajuda com a caracterização do porta-ferramenta e análises.

Aos técnicos de laboratório Mauro Olivatto, José Carlos Risardi e Tiago Monteiro Camponucci pela convivência e auxílio com a preparação e execução dos ensaios.

À CAQI/IQSC/USP pela disponibilidade de utilização do Microscópio Eletrônico de Varredura e ao Dr. Márcio de Paula pelo auxílio técnico nas análises de MEV e EDS.

À Iara Alice Oliveira e Ana Paula Bueno Bardelotte (*in memorian*), e aos funcionários do Departamento de Engenharia Mecânica da EESC/USP, pelo auxílio nas questões administrativas relativas ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da EESC/USP.

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico pelo apoio financeiro com a concessão da bolsa de pesquisa.

#### **RESUMO**

RIBEIRO, K. S. B. Monitoramento da condição da ferramenta no microfresamento por sinais de potência e emissão acústica. 2019. 60 f. Dissertação (Mestrado) — Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2019.

Considerando as dimensões reduzidas das ferramentas de microfresamento, a seleção não otimizada dos parâmetros de corte tende a maximizar o desgaste e a quebra da ferramenta durante operações de microusinagem. Isto posto, o desenvolvimento de um sistema de monitoramento para explorar as condições da microfresa durante a usinagem é fundamental. Portanto, o objetivo desta pesquisa é monitorar via sinais de potência e emissão acústica (EA) o desgaste da ferramenta e a estabilidade de corte em operações de microfresamento do aço COS AR60 e COS AR60 de grãos ultrafinos (GUF). Os testes de microfresamento foram realizados com ferramentas de diâmetro de 1 mm e duas arestas, com substrato de metal duro e revestimento (Ti, Al, Cr) N, em um centro de usinagem CNC Romi D800 High Performance adaptado com um cabeçote de alta rotação. O microfresamento ocorreu nos dois materiais sem aplicação de fluido de corte e com velocidade de corte de 62,5 m/min e 125 m/min, mantendo constante a velocidade de avanço de 240 mm/min (f<sub>z</sub>=6 µm/aresta e 3 µm/aresta), profundidade de usinagem de 100 µm e comprimento de usinagem de 104 mm em corte em cheio. O sinal de potência e EA foram adquiridos à taxa de 5 kHz e 1,25 MHz, respectivamente. Os dados foram adquiridos em LabVIEW® e processados em LabVIEW® e MATLAB®. Os resultados de caracterização dos desgastes apontaram um desgaste de flanco mais expressivo e a formação de Aresta Postiça de Corte (APC) no GUF para v<sub>c</sub>=125 m/min, e a presença de desgaste de cratera em todas as condições de corte. O aumento da potência de corte média representou a predominância do desgaste de flanco, e desgaste de cratera em sua redução. De forma semelhante, a ANOVA dos valores de EA RMS indicaram com significância (95% de confiança) uma correlação diretamente proporcional entre EA RMS e evolução do desgaste de flanco na microfresa. Quanto à estabilidade de corte, ambos os sinais apresentaram um aumento expressivo de amplitude quando o corte foi instável. Com isso, os métodos de monitoramento utilizados foram capazes de indicar a evolução do desgaste da microfresa e a ocorrência de chatter em operações de microfresamento.

Palavras-chave: Microfresamento de topo. Desgaste da ferramenta. Estabilidade de corte. Monitoramento. Emissão acústica. Potência.

#### **ABSTRACT**

RIBEIRO, K. S. B. Monitoring of tool condition in micro-milling via cutting power and acoustic emission signals. 2019. 60 f. Dissertation (Master's Degree) – São Carlos School of Engineering, University of São Paulo, São Carlos, 2019.

Regarding the reduced dimensions of micro-milling tools, a non-optimised selection of cutting parameters tends to maximise tool wear and breakage during cutting operations. Hereupon the development of a monitoring system for exploring microtool conditions during machining is imperative. Therefore, the aim of this research is to monitor tool wear and cutting stability via cutting power and acoustic emission (AE) signals in micro-milling operations of steel COS AR60 and ultra fine-grained steel COS AR 60 (GUF). Cutting tests were performed by carbide endmill tools with (Ti, Al, Cr) N coating, two flutes and 1 mm diameter in a CNC machining centre Romi D800 High Performance adapted with a high spindle speed head. Micro-milling operations were carried out in both materials without cutting fluid application at 62.5 m/min and 125 m/min, and constant parameters of feed, set at 240 mm/min (f<sub>z</sub>=6 µm/tooth and 3 µm/tooth), depth of cut of 100 µm and cutting length of 104 mm performed in sloth cutting strategy. Cutting power and AE signals were acquired at the rate of 5 kHz and 1.25 MHz, respectively. The data were acquired in LabVIEW® and processed in both LabVIEW<sup>®</sup> and MATLAB<sup>®</sup>. The results on wear characterisation revealed a major flank wear and the formation of Built Up-Edge (BUE) in GUF at v<sub>c</sub>=125 m/min, along with the occurrence of crater wear in all cutting conditions set. An increase in the average cutting power levels is linked to the predominancy of flank wear, while crater wear to its decrease. Likewise, the Analysis of Variance (ANOVA) of EA RMS values indicated with significancy (95% confidence) a direct proportion between AE RMS and flank wear in the microtool. In terms of cutting stability both EA and cutting power signals have shown an expressive rise when performing instable cutting. Thus, the methods of monitoring were feasible for recognising tool wear evolution and chatter in micro-milling operations.

Keywords: Micro end milling. Tool wear. Cutting stability. Monitoring. Acoustic Emission. Cutting power.

# LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Escala de microusinagem e usinagem de ultraprecisão
Figura 2 - Efeito da profundidade de usinagem na evolução do desgaste de flanco no
microfresamento com $v_c$ =40 m/min e $v_f$ =350 mm/min
Figura 3 - Desgaste de flanco na superfície de folga secundária (a) e de cratera na superfície de
saída da aresta 1 (b) na usinagem de microcanais em aço COS AR60, v <sub>c</sub> =60 m/min,
$f_z$ =3 $\mu$ m/aresta e Ø=800 $\mu$ m
Figura 4 - Esquema ilustrativo do desgaste de flanco e de cratera no microfresamento para $h>$
$r\varepsilon$ (a), $h \approx r\varepsilon$ (b) e $h < r\varepsilon$ (c)
Figura 5 - Curva de desgaste de flanco em função do tempo de usinagem (a) e curva tempo de
usinagem em função da velocidade de corte em escala logarítmica (b)36
Figura 6 - Sistemas de monitoramento em usinagem em função da escala de precisão e dos
parametros de controle
Figura 7 - Fontes de EA para diferentes momentos da remoção de material40
Figura 8 - Formas características do sinal de EA: sinal de picos (a) e sinal contínuo (b)41
Figura 9 - Micrografia do aço COS AR60 (a) como recebido e (b) com grãos ultrafinos44
Figura 10 - Desenho técnico em 1º diedro do corpo de prova utilizado nos ensaios44
Figura 11 – Fatores de controle e variáveis de resposta
Figura 12 - Setup experimental dos ensaios de microfresamento com monitoramento de
potência e emissão acústica
Figura 13 - Fixação do sensor ao corpo de prova
Figura 14 - Bancada de monitoramento de potência e emissão acústica no microfresamento 49
Figura 15 - Mitsubishi MS2MSD0100 nova em vista de topo (a) e frontal (b)51
Figura 16 - Análise de EDS na região de revestimento da ferramenta
Figura 17 - Superfície de folga das ferramentas após o microfresamento de GUF com
lc=104 mm para $v_c$ =62,5 m/min na aresta 1 (a) e 2 (b), e $v_c$ =125 m/min na aresta 1 (c) e 2 (d)
Figura 18 - Superfície de saída das ferramentas após o microfresamento de GUF com
$lc=104$ mm e $v_c=62,5$ m/min na aresta 1 (a) e 2 (b), e $v_c=125$ m/min na aresta 1 (c) e 2 (d)53
Figura 19 - EDS do substrato da ferramenta após perda de revestimento
Figura 20 - EDS da região de formação de APC

Figura 21 - Superfície de folga das ferramentas após o microfresamento de COS AR60 com
lc=104 mm e v <sub>c</sub> =62,5 m/min na aresta 1 (a) e 2 (b), e v <sub>c</sub> =125 m/min na aresta 1 (c) e 2 (d) 55
Figura 22 - Superfície de saída das ferramentas após o microfresamento de COS AR60 com
lc=104 mm e v <sub>c</sub> =62,5 m/min na aresta 1 (a) e 2 (b), e v <sub>c</sub> =125 m/min na aresta 1 (c) e 2 (d) 56
Figura 23 - Evolução do desgaste de flanco no microfresamento de COS AR60 com
$v_c$ =62,5 m/min (a) e 125 m/min (b) e de GUF com $v_c$ =62,5 m/min (c) e $v_c$ =125 m/min (d) 57
Figura 24 – Interação entre material e velocidade de corte no desgaste de flanco para
lc=104 mm
Figura 25 - Potência média consumida no microfresamento de COS AR60 com v <sub>c</sub> =62,5 m/min
(a) e 125 m/min (b) e de GUF com v <sub>c</sub> =62,5 m/min (c) e 125 m/min (d)
Figura 26 - Amplitude do sinal de EA no microfresamento de COS AR60 (a) com
v <sub>c</sub> =62,5 m/min (a) e 125 m/min (b) e de GUF com v <sub>c</sub> =62,5 m/min (c) e 125 m/min (d) 62
Figura 27 - Amplitude do sinal de EA e topografia do microcanal para lc=26 mm (a) e
52 mm (b) no GUF com v <sub>c</sub> =125 m/min
Figura 28 - Amplitude do sinal de EA e topografia do microcanal para lc=26 mm (a) e
52 mm (b) no COS AR60 com v <sub>c</sub> =125 m/min
Figura 29 - Sinal de EA do microfresamento de COS AR60 com lc=104 mm e v <sub>c</sub> =125 m/min
65
Figura 30 - Sinais de EA do microfresamento de GUF com v <sub>c</sub> =62,5 m/min (a) e 125 m/min (b)
no domínio da frequência
Figura 31 - Sinais de EA do microfresamento de COS AR60 com v <sub>c</sub> =62,5 m/min (a) e
v <sub>c</sub> =125 m/min (b) no domínio da frequência
Figura 32 - EA RMS para o microfresamento de COS AR60 com $v_c$ =62,5 m/min (a) e $v_c$ =125
m/min (b) e de GUF com v <sub>c</sub> =62,5 m/min (c) e v <sub>c</sub> =125 m/min (d)
Figura 33 - Efeito da velocidade de corte no sinal de EA RMS

# LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Mecanismos de desgaste de ferramenta de corte	34
Tabela 2 - Fatores que geram sinais de EA com alta e baixa amplitude	41
Tabela 3 - Composição química do aço COS AR60 (% em peso)	43
Tabela 4 - Principais propriedades mecânicas para o aço COS AR60 e GUF	43
Tabela 5 - Parâmetros de usinagem utilizados nos ensaios de microusinagem	45

#### LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

A/D Analógico/Digital

ABNT Associação Brasileira de Normas Técnicas

AISI Instituto Americano do Aço e do Ferro

ANOVA Análise de Variância

APC Aresta Postiça de Corte

ASTM Sociedade Americana para Testes e Materiais

BNC Bayonet Neill Concelman

CAQI Central de Análises Químicas Instrumentais

CNC Controle Numérico por Computador

CNPq Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico

EA Emissão Acústica

EDS Espectroscopia de energia dispersiva por raios-X

EESC Escola de Engenharia de São Carlos

FFT Transformada Rápida de Fourier

GUF Aço COS AR60 com grãos ultrafinos

IMEP Grupo de Inovação em Manufatura e Engenharia de Precisão

IQSC Instituto de Química de São Carlos

LAPRAS Laboratório de Processos Avançados e Sustenabilidade

LEP Laboratório de Engenharia de Precisão

MEV Microscopia Eletrônica de Varredura

MQL Mínima Quantidade de Líquido

NUMA Núcleo de Manufatura Avançada

PSD Densidade Espectral de Potência

RMS Sinal Quadrático Médio

USP Universidade de São Paulo

UFRN Universidade Federal do Rio Grande do Norte

VI Virtual Instrument

WT Transformada de Wavelet

### LISTA DE SÍMBOLOS E UNIDADES

a<sub>e</sub> Largura de usinagem ou penetração de trabalho (mm)

a<sub>p</sub> Profundidade de usinagem (μm)

Ceq Carbono equivalente

f. Folha

f<sub>z</sub> Avanço por aresta (μm/min)

h Espessura de corte ou do cavaco não deformado (µm)

h<sub>min</sub> Mínima espessura de corte ou do cavaco não deformado (μm)

HV Dureza Vickers

K<sub>c</sub> Força específica de corte (Pa)

KT Desgaste de cratera (µm)

lc Comprimento de usinagem (mm)

n Rotação por minuto (rpm)

Ø Diâmetro nominal da microfresa (mm)

P<sub>c</sub> Potência de corte (W)

 $r_{\epsilon}$  Raio de aresta da fresa ( $\mu$ m)

S1 Saturação de entrada

S2 Saturação de saída

VB Desgaste de flanco (μm)

v<sub>c</sub> Velocidade de corte (m/min)

v<sub>f</sub> Velocidade de avanço (mm/min)

# SUMÁRIO

1	. 111	! KUDUÇAU	45
	1.1	OBJETIVO GERAL	26
	1.2	OBJETIVOS ESPECÍFICOS	26
2	RE	VISÃO DA LITERATURA	27
	2.1	MICROFRESAMENTO	27
	2.1.	1 Efeito escala	29
	2.1.	2 Tamanho de grão	30
	2.2	MECANISMOS DE DESGASTE DE FERRAMENTA	31
	2.3	MONITORAMENTO EM MICROUSINAGEM	37
3	MA	TERIAIS E MÉTODOS	43
	3.1	MATERIAIS	43
	3.2	MÉTODOS	45
4	RE	SULTADOS E DISCUSSÃO	51
5	CO	NCLUSÕES	71
6	SU	GESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	73
7	RE	FERÊNCIAS	75
	APÊN	DICE A – Desenvolvimento de programas em LabVIEW <sup>®</sup>	81
	APÊN	DICE B – Imagens das microfresas pré-ensaio	85
micro		DICE C – Imagens da evolução do desgaste de flanco e o	
	APÊN	DICE D – Sinais de potência com ajuste de <i>offset</i>	101
		DICE E – Sinais de EA no domínio do tempo	
		DICE F – Sinais de EA no domínio da frequência	
		DICE G – ANOVA	

Diante do avanço dos sistemas tecnológicos e de seus componentes mecânicos, a busca por maquinários e por processos que atendam aos requisitos de produção de peças miniaturizadas e/ou ricas em detalhes de ordem micrométrica tem demandado grandes esforços na área de usinagem de precisão. A miniaturização dos componentes implica, diretamente, no incremento do valor agregado ao produto final e, assim, acredita-se que o sucesso na linha de produção é alcançado quando operações de microusinagem possuem implementação otimizada bem sucedida (TANSEL *et al.*, 1998).

As operações de microusinagem convencionais são: microtorneamento, microfresamento, microfuração e microrretificação. Dentre os processos apresentados, o microfresamento possui maior flexibilidade e versatilidade, visto que possibilita a produção de variadas geometrias e microestruturas de alta complexidade (CHENG e HUO, 2013). Todavia, os principais desafios das operações de microfresamento são frutos da estrutura da ferramenta que, por apresentar baixa rigidez (grande comprimento e pequeno diâmetro), torna-se mais sensível à transmissão da vibração do eixo-árvore para o ponto de contato peça-ferramenta. Ademais, fatores como a geometria da ferramenta e o efeito escala influenciam também a qualidade da superfície da peça usinada e as tolerâncias dimensionais alcançadas ao término do processo (GRIFFIN *et al.*, 2017).

Não obstante, o efeito da vibração pode, também, ser considerado um fator crítico para a evolução do desgaste e para o consequente redução da vida da microfresa. De acordo com Tansel *et al.* (1998), caracterizar o mecanismo de desgaste e identificar o momento mais adequado para a troca de ferramenta também são desafios encontrados na área de microusinagem. Segundo Malekian, Park e Jun (2009), para entender a evolução do desgaste da microfresa e das avarias nas arestas de corte é fundamental a utilização de sensores adequados ao monitoramento em microescala.

Dessa forma, o monitoramento de operações de microfresamento é considerado crítico para o acompanhamento do desgaste da ferramenta, o controle da qualidade da superfície e das tolerâncias dimensionais requisitadas de projeto, sendo fundamental para a otimização dos processos de microusinagem. Malekian, Park e Jun (2009) ainda afirmam que o sinal obtido por meio de sensores de emissão acústica, força e vibração podem ser utilizados para monitorar

fenômenos que ocorrem ao longo de operações de microfresamento, e.g. desgaste e falha catastrófica da ferramenta.

Jamielniak e Arrazola (2008) monitoraram a condição da ferramenta de corte por meio da aquisição de dados de força e de emissão acústica e identificaram que o sinal de emissão acústica sofre variações proeminentes em termos de intensidade do sinal quadrático médio (RMS). Essa forma de analisar o sinal mostrou-se ser versátil na detecção do contato peçaferramenta, possibilitando a transmissão de informações a respeito da integridade da ferramenta de corte. Nessa perspectiva, a correlação entre força e desgaste no microfresamento é semelhante à do fresamento convencional, embora os níveis de força observados em função do tempo de ensaio sejam consideravelmente inferiores em operações de microfresamento.

O desenvolvimento dessa pesquisa possui relevância diante da demanda pelo monitoramento de operações de usinagem em microescala, em termos da qualidade do corte no microfresamento. Além disso, a instrumentação utilizada neste trabalho pode ser extrapolada para outras operações de microusinagem nas quais o monitoramento via emissão acústica e potência seja necessário.

#### 1.1 OBJETIVO GERAL

Monitorar o desgaste da ferramenta e a estabilidade do corte via sinais de potência e emissão acústica em operações de microfresamento.

#### 1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Para atingir o objetivo geral, os seguintes objetivos específicos se fazem necessários:

- a) Entender a evolução de desgaste e a ocorrência de avarias ao longo do microfresamento;
- b) Correlacionar, a partir da análise das microfresas, tendências que indiquem a evolução do desgaste de flanco e de cratera na microfresa, em relação ao material do corpo de prova, velocidade de corte e sinais de potência e emissão acústica;
- c) Identificar, a partir da análise dos sinais de potência e emissão acústica, tendências que indiquem a ocorrência de chatter, caracterizando a instabilidade do corte.

Na concepção de Cheng e Huo (2013), operações de microusinagem são cinematicamente semelhantes às da usinagem convencional e fundamentalmente distintas em muito outros aspectos. Os autores referem-se à microusinagem como sendo a remoção direta de material por meio de uma ferramenta com aresta(s) de corte geometricamente definida(s) realizada em máquinas de precisão convencionais ou em máquinas próprias de microusinagem. Alguns parâmetros são apontados como característicos do microcorte, dentre eles possuir no processo ao menos duas dimensões ou tolerâncias na faixa de 1 a 1000 μm.

Os fenômenos envolvidos em operações de microusinagem, em geral, têm imposto grandes desafios ao setor de produção. Um desses desafios é entender o que ocorre na interface peça-ferramenta durante o corte e como analisar essa interação em tempo real. Neste capítulo serão apresentados quatro tópicos para o presente estudo, que são: microusinagem, mecanismos de desgaste de ferramenta, monitoramento em microusinagem e processamento de sinal.

#### 2.1 MICROFRESAMENTO

Os princípios que regem a microusinagem são semelhantes aos da usinagem em macro escala; e por isso uma quantidade considerável de conhecimento foi adaptado no estudo dos processos de microusinagem. O desafio da microusinagem, então, encontra-se nos parâmetros sensíveis à significativa redução de escala, sendo o fator da escala de corte determinante para o estudo dos fenômenos e das particularidades da microusinagem (CHAE; PARK; FREIHEIT, 2006).

Rodrigues e Jasinevicius (2017) apontaram definições para microusinagem fornecidas por vários pesquisadores em seus trabalhos e, com base nos conceitos apresentados, chegaram à conclusão que um conceito mais apropriado para microusinagem não deve considerar apenas as dimensões da ferramenta e os intervalos dos parâmetros de corte, e sim o tamanho de grão do material da peça por conta de efeitos anisotrópicos durante o corte. Para tanto, os autores propuseram que a usinagem em escalas micro e nano fosse organizada conforme Figura 1.

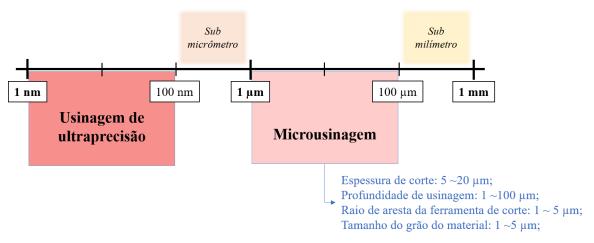


Figura 1 - Escala de microusinagem e usinagem de ultraprecisão

Fonte - Adaptado de Rodrigues e Jasinevicius (2017)

Na microusinagem, a taxa de remoção de material é consideravelmente baixa em comparação com a usinagem convencional em macroescala. Para Boswell, Islam e Davies (2017), a microusinagem pode ser definida como sendo a usinagem de peças ou componentes tendo como caracterização do processo a relação entre a espessura de corte e o tamanho do raio de aresta da ferramenta.

As dimensões da ferramenta de corte em microusinagem e, principalmente, do raio de aresta "reduzido", fundamentam que o efeito escala em microusinagem é ainda mais crítico do que para a usinagem convencional (CHAE; PARK; FREIHEIT, 2006). Isso ocorre devido ao raio de aresta se tornar significativo em comparação com a espessura do material a ser removido sugerindo que o raio de aresta seja o elemento chave no microfresamento (ARAMCHAROEN; MATIVENGA, 2009).

Muitas melhorias no processo de microusinagem podem ser alcançadas através de modelos para a previsão do processo. Por exemplo, uma previsão da espessura mínima de corte, junto ao conhecimento prévio sobre os níveis de força esperados durante a operação, permite uma melhor seleção dos parâmetros de corte para fornecer a máxima taxa de remoção de material (CHAE; PARK; FREIHEIT, 2006).

Apesar de Chae, Park e Freiheit (2006) abordarem conceitos relevantes no microcorte, quando se tem como objetivo a máxima taxa de remoção de material, utilizar a espessura mínima de corte pode não ser adequado, visto que para se obter uma alta taxa de corte é necessário adotar elevadas espessuras de corte. A relação entre a espessura do cavaco não-

deformado e o raio de aresta será melhor definido no item a seguir, no qual será abordado o efeito escala.

#### 2.1.1 Efeito escala

O efeito escala na microusinagem é um fenômeno associado à dimensão da espessura do material removido quando da mesma ordem de grandeza que o raio de aresta da ferramenta, ou o tamanho do grão do material. Isso implica em um aumento não linear da energia específica de corte à medida que a espessura do cavaco não deformada diminui (MIAN; DRIVER; MATIVENGA, 2011).

Na usinagem convencional, é comum assumir que: a aresta da ferramenta é perfeitamente afiada e que não há contato entre o material e a superfície de folga da ferramenta, uma vez que o material é predominantemente removido por cisalhamento; e que não haverá remoção de material se a espessura do cavaco não-deformado (h) for menor do que um determinado valor crítico, definido como mínima espessura de corte (h<sub>min</sub>), havendo um "esmagamento" do material (ARAMCHAROEN; MATIVENGA, 2009).

Para mesmas condições de usinagem, um menor raio de aresta faz o h<sub>min</sub> diminuir e provocar um cisalhamento majoritário enquanto um maior raio de aresta resultará num h<sub>min</sub> maior, ou seja, em *ploughing* majoritário no material (CARDOSO; DAVIM, 2012). Quando a escala de remoção é reduzida, em microusinagem, o raio de aresta passa a ser significante quando comparado à espessura do material a ser removido. Diante disso, o estudo do efeito escala é considerado importante por influenciar a força de corte, a espessura e formação de cavaco, e a qualidade da superfície da peça (LIU *et al.*, 2004).

Weule, Huntrupl e Tritschlerl (2001) observaram a mínima espessura de corte e sua influência na qualidade de peças microusinadas, e estimaram que a razão entre h<sub>min</sub> e o raio de aresta é de 0,293. Oliveira *et al.* (2015) analisaram o comportamento do efeito escala no microfresamento e no fresamento convencional de aço AISI 1045 através da análise de variância da força específica de corte (k<sub>c</sub>) com o raio de aresta da ferramenta, rugosidade R<sub>a</sub> da peça, força de corte e formação de cavaco. Os autores obtiveram que a mínima espessura de cavaco não deformado varia de 22 a 36% do raio de aresta e independe do material usinado, da geometria da ferramenta, do processo de microusinagem e até do método de obtenção do h<sub>min</sub>.

A influência dos parâmetros de usinagem no efeito escala foi estudada por Mian, Driver e Mativenga (2011) no microfresamento de Inconel 718. O sinal de emissão acústica foi

monitorado durante os ensaios e, posteriormente, a Transformada Rápida de Fourier (FFT) e a Transformada de Wavelet (WT) foram aplicadas para identificar bandas de frequência/energia e, portanto, para compreender o mecanismo do efeito escala. A análise de variância (ANOVA) foi aplicada aos resultados e apontou que, com confiança de 95%, a velocidade de corte é um parâmetro dominante na redução da energia específica de corte ou melhoria do acabamento (redução de rebarbas), tanto quanto o avanço e o raio de aresta.

Os parâmetros de usinagem no microcorte possuem grande influência no comportamento do processo. De acordo com Bissacco, Hansen e De Chiffre (2005), a determinação dos parâmetros de corte não pode ser baseada nos conhecimentos do fresamento convencional, uma vez que se considera o efeito escala e a menor resistência das microfresas. No próximo tópico será abordado um fator que também possui relevância no comportamento da microusinagem, a estrutura do material da peça.

#### 2.1.2 Tamanho de grão

O tamanho de grão de um material multifásico determina a quantidade de grãos na área da seção de corte ao ser microusinado. Nessa perspectiva, a microestrutura dita uma natureza anisotrópica do material – uma vez que as propriedades mecânicas diferem com a variação nas direções cristalográficas das fases e nos grãos.

A heterogeneidade na microestrutura da peça leva a variações significativas no processo de usinagem à medida que o corte passa de uma fase para outra. Essas variações afetam a força de usinagem e a formação de cavaco, e também a qualidade da superfície usinada (CARDOSO; DAVIM, 2012). Grande esforço tem sido feito no desenvolvimento de materiais com grãos ultrafinos, melhorando o comportamento mecânico e a uniformidade desses materiais (KOMATSU *et al.*, 2012).

De acordo com Bissacco, Hansen e De Chiffre (2005), a escolha de materiais com o menor tamanho de grão possível e com alta homogeneidade traz benefícios para o processo de microfresamento. A microusinagem de materiais com tamanho de grão normal pode ser considerada como uma usinagem anisotrópica (CHAE; PARK; FREIHEIT, 2006), visto que da perspectiva da redução de escala, o material passa a se comportar de forma não homogênea.

Komatsu *et al.* (2012) investigaram o efeito do tamanho de grão no microfresamento através da usinagem de uma liga de aço inoxidável com tamanho de grão normal e reduzido para 1,5 µm. Os autores observaram que a força de corte no microfresamento do aço de grão

ultrafino é maior que a do aço de grão normal, e que a formação de rebarbas pode ser reduzida com a redução do tamanho do grão.

#### 2.2 MECANISMOS DE DESGASTE DE FERRAMENTA

O desgaste da ferramenta tem impacto na usinagem devido ao papel que desempenha no aumento das forças e potência de corte, temperatura de contato, precisão dimensional e rugosidade da peça (TRENT, 1984). A troca da ferramenta na usinagem ocorre então sempre que há uma avaria e quando os níveis de desgaste atingem proporções elevadas, o que compromete a qualidade e o andamento da operação (MACHADO *et al.*, 2009).

Segundo a norma ISO 8688-2 (1989), desgaste é definido como a alteração na região de corte da ferramenta em relação à geometria inicial, como resultado de uma perda progressiva de material durante a usinagem. Os tipos de desgaste e avarias que podem ocorrer em ferramentas de usinagem são: desgaste de flanco e de cratera, entalhe, deformação plástica, formação de aresta postiça de corte, trincas térmicas e mecânicas, lascamento, quebra por fadiga mecânica e falha catastrófica (TRENT, 1984; MACHADO *et al.*, 2009).

Em operações de fresamento, em escala convencional, dois são os principais tipos de desgaste: flanco na superfície de folga principal, e cratera na superfície de saída da ferramenta. O desgaste de flanco é geralmente atribuído ao atrito entre a ferramenta e a peça ao longo da superfície usinada e às altas temperaturas (TRENT, 1984; BOOTHROYD; KNIGHT, 1989; RAHMAN; KUMAR; PRAKASH, 2001).

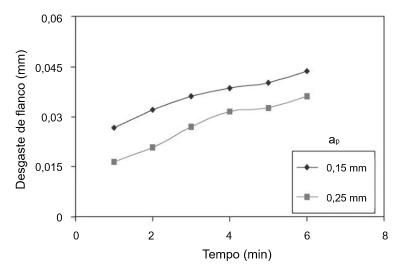
Os fatores que influenciam o desgaste de flanco também influenciam o desgaste de cratera, porém acrescido de difusão, que por sua vez altera a geometria da interface cavaco-ferramenta. A influência mais significativa na ocorrência do desgaste de cratera vem das altas velocidades de corte e temperaturas de usinagem, como também da afinidade química entre a ferramenta e o material da peça (KUMAR; DURAI; SORNAKUMAR, 2006).

Com condições variadas de corte, a natureza do mecanismo de desgaste pode ou não ser semelhante em ferramentas submetidas a operações de microfresamento. Isso ocorre porque a dinâmica do processo de microfresamento é distinta: a elevada velocidade de corte de operação contribui significativamente para obtenção de maiores taxas de desgastes (BOSWELL; ISLAM; DAVIES, 2018) e a tendência de se adotar baixas velocidades de avanço acarreta em um maior tempo de contato entre a peça e a ferramenta durante o corte.

De acordo com Prakash *et al.* (2001), é necessário definir o mecanismo de desgaste da microfresa considerando as suas dimensões e a consequente influência nos parâmetros de corte. Uma das razões em que ele fundamenta a afirmação consiste no fato de, no microfresamento, a taxa de remoção de material e as forças de corte serem muito pequenas quando comparadas às do fresamento, embora a energia específica seja maior. Assim, em busca de melhor entender os fatores que dominam a evolução do desgaste em ferramentas de dimensões reduzidas, estudos da condição da microfresa vêm sendo desenvolvidos ao longo das últimas décadas.

Rahman, Kumar e Prakash (2001) microusinaram cobre com profundidades de usinagem de 0,15 e 0,25 mm sem a aplicação de fluido de corte com o objetivo de identificar o mecanismo de falha da ferramenta com ângulo de hélice de 30°. Uma das combinações de parâmetros de corte utilizada foi: velocidade de corte (v<sub>c</sub>) de 40 m/min e velocidade de avanço (v<sub>f</sub>) de 350 mm/min. Nessas condições, o desgaste de flanco foi medido e correlacionado com a vida da ferramenta, conforme apresentado na Figura 2.

Figura 2 - Efeito da profundidade de usinagem na evolução do desgaste de flanco no microfresamento com  $v_c$ =40 m/min e  $v_f$ =350 mm/min



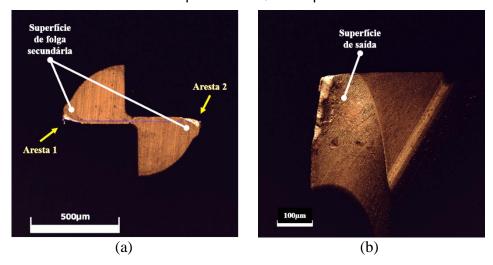
Fonte - Rahman, Kumar e Prakash (2001)

Santos (2016) analisou no processo de microfresamento do aço inoxidável duplex UNS S32205 o tipo e mecanismo de desgaste da ferramenta, a formação de rebarba e a qualidade da superfície gerada. Os ensaios de fabricação de microcanais utilizaram uma microfresadora CNC de quatro eixos e microfresas de metal duro com diâmetro de 381 µm. As análises de peça e de ferramenta foram realizadas no microscópio eletrônico de varredura e no perfilômetro. Os

resultados mostram que o principal tipo de desgaste apresentado pelas microfresas foi o desgaste de flanco, sendo o mecanismo de desgaste predominante o de adesão.

Norcino (2018) estudou a influência do tamanho de grão do material no microfresamento de COS AR60 com fresas de 800 µm de diâmetro. As análises das ferramentas foram realizadas em microscópios. O nível máximo de desgaste de flanco na aresta principal foi de 95 µm, representando uma parcela significativa do diâmetro da ferramenta (~20%). Nesse trabalho, embora tenha havido a predominância de desgaste de flanco na superfície principal e secundária de folga, observou-se também desgaste de cratera, lascamento, material aderido e formação de aresta postiça de corte. Imagens do desgaste de flanco na superfície de folga secundária e de cratera na superfície de saída são apresentados na Figura 3a e Figura 3b, respectivamente.

Figura 3 - Desgaste de flanco na superfície de folga secundária (a) e de cratera na superfície de saída da aresta 1 (b) na usinagem de microcanais em aço COS AR60,  $v_c$ =60 m/min,  $f_z$ =3  $\mu$ m/aresta e Ø=800  $\mu$ m.



Fonte - Norcino (2018)

Dow, Miller e Garrard (2004) observaram, também, a ocorrência de desgaste de flanco na microfresa *ballnose* e que, à medida que o desgaste evoluiu, a região do raio de aresta aumentou. Embora as condições que influenciam a ocorrência de desgaste de flanco e de cratera sejam semelhantes, uma ocorrência majoritária de desgaste de flanco é relatada na literatura (RAHMAN; KUMAR; PRAKASH, 2001; NORCINO, 2018; SANTOS, 2016; DOW; MILLER; GARRARD, 2004).

Tendo em vista as dimensões de microfresas e a carência da definição de normas para desgaste em microusinagem, Alhadeff *et al.*, (2019) definiram um conjunto de procedimentos

padronizados para medidas de desgaste em microusinagem, que levou em consideração parâmetros e definições consolidadas da usinagem convencional aplicadas às particularidades da escala, i.e. raio de aresta, estrutura de microfresas, etc.

Em geral, à medida que a ferramenta perde material na região de sua aresta de corte, o desgaste progressivo leva ao fim de vida da ferramenta e a avarias durante a usinagem. O desgaste ocorre progressivamente e pode se desenvolver por diferentes mecanismos (Tabela 1).

Tabela 1 - Mecanismos de desgaste de ferramenta de corte

Mecanismo de desgaste	Descrição
Abrasivo	É gerado devido ao movimento relativo de partículas endurecidas
	sobre material de menor dureza durante o corte. Essas partículas
	podem ser precipitados provenientes do material da peça e/ou do
	próprio cavaco. No microscópio, as áreas desgastadas tem uma
	aparência de linhas paralelas na direção do fluxo de cavaco.
Adesivo	Resultado da fusão de material na superfície da ferramenta sob
	condições extremas de temperatura e baixas velocidades de corte.
	Este mecanismo é característico da formação de aresta postiça de
	corte, e o dano à superfície da ferramenta ocorre quando o material
	aderido se desprende, levando consigo uma porção de material da
	ferramenta.
Difusivo	A perda de material ocorre devido à transferência atômica na região
	de contato. A taxa de difusão é diretamente proporcional à
	temperatura na região de contato. Por ser processado no nível
	atômico, áreas desgastadas sob esse mecanismo possui aparência
	"lisa".
Oxidativo	É o mecanismo de desgaste que ocorre principalmente durante
	condições de deslizamento nominalmente não lubrificadas. É
	geralmente considerado uma forma "benéfica" de corrosão, visto
	que há formação de filmes de óxido com aproximadamente 3 ou
	4 μm de espessura entre as interfaces de deslizamento sob altas
	temperaturas.

Fonte - Boothroyd e Knight (1989), Blau (1992) e Machado et al. (2009).

De acordo com Kumar, Durai e Sornakumar (2006), abrasão, adesão e difusão são os principais mecanismos de desgaste que culminam no desgaste de flanco e de cratera. Um esquema ilustrativo da ocorrência do desgaste de cratera e de flanco é apresentado na Figura 4.

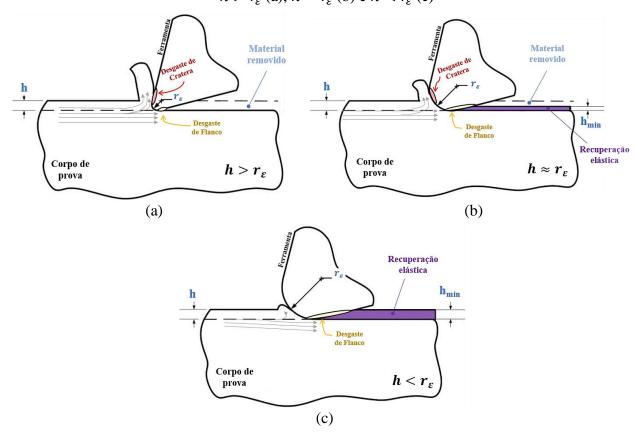


Figura 4 - Esquema ilustrativo do desgaste de flanco e de cratera no microfresamento para  $h > r_{\varepsilon}$  (a),  $h \approx r_{\varepsilon}$  (b) e  $h < r_{\varepsilon}$  (c)

Fonte - Elaborado pela autora

Como mostrado na Figura 4, particularmente para o microcorte, a ocorrência do desgaste pode migrar de região da ferramenta dependendo da razão entre h e r<sub>e</sub>. Sob *ploughing* minoritário (menor efeito escala), o desgaste pode estar equilibrado entre superfície de saída e de folga, enquanto para menores espessuras de corte, o desgaste pode ficar concentrado na superfície de folga – na região abaixo do ponto de estagnação. Esse balanço de desgaste no microcorte afeta a vida da ferramenta, principalmente na condição de *ploughing* majoritário.

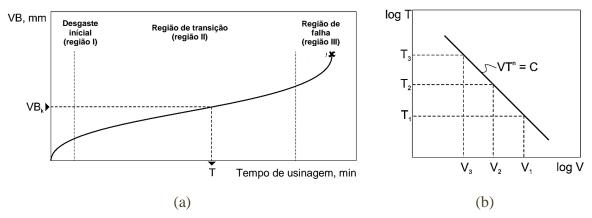
A vida da ferramenta pode ser expressa em função da velocidade e tempo de corte de forma exponencial, de acordo com a Eq. 1, onde v<sub>c</sub> é a velocidade de corte, T é a vida da ferramenta e n e C são constantes definidas para cada par ferramenta/peça e em função das demais condições de corte (MACHADO *et al.*, 2009).

$$V_c \times T^n = C$$
 Eq. 1

Essa equação é apresentada na forma de gráfico na Figura 5(b). Na Figura 5(a), a curva de Taylor para desgaste de ferramenta evidencia as três principais fases da evolução do desgaste: região I, de desgaste inicial, em que o desgaste apresenta alta taxa de crescimento;

região II, de transição, na qual a taxa de desgaste é constante e menor relação à da fase inicial; e a região III, de falha, onde o desgaste volta a crescer até a falha catastrófica (ALHADEFF *et al.*, 2019).

Figura 5 - Curva de desgaste de flanco em função do tempo de usinagem (a) e curva tempo de usinagem em função da velocidade de corte em escala logarítmica (b)



Fonte - Adaptado de Machado et al. (2009) e Alhadeff et al. (2019)

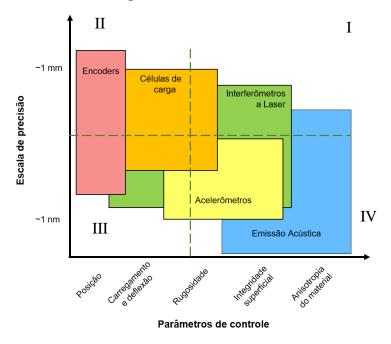
Santos, Silva e Jackson (2018) analisaram a evolução e os mecanismos de desgaste envolvidos no microfresamento de canais em aço inoxidável duplex UNS S32205 com MQL e sem a aplicação de fluido de corte, considerando velocidades de corte de 24 m/min e 36 m/min. Nesse estudo, imagens de MEV da ferramenta apontaram a presença de desgaste de flanco, lascamentos não uniformes e formação de Aresta Postiça de Corte (APC), sendo adesão o mecanismo de desgaste predominante. Os menores níveis de desgaste foram obtidos quando v<sub>c</sub>=24 m/min com aplicação de fluido de corte, obtendo vida de 0,93 min, enquanto, para a condição de v<sub>c</sub>=36 m/min sem aplicação de fluido de corte, a vida da ferramenta foi de 0,19 min.

Assim como nos demais trabalhos apresentados nesta seção, a principal preocupação na microusinagem é a curta vida e a falha catastrófica da ferramenta, que é um desafio comum quando o desgaste de microfresas são mensurados (TANSEL *et al.* 1998; ALHADEFF *et al.*, 2019). Assim, é importante que os primeiros indícios de possível falha, junto ao acompanhamento da evolução do desgaste da ferramenta, sejam constantemente monitorados. As principais técnicas de monitoramento de microfresas envolve sensores de vibração, emissão acústica e força (KÖNIG; KUTZNER; SCHEHL, 1992). Uma abordagem do cenário do monitoramento no microcorte é apresentada na seção a seguir.

## 2.3 MONITORAMENTO EM MICROUSINAGEM

Os sistemas mais empregados no monitoramento de processos de usinagem são: encoders; células de carga; interferômetros; acelerômetros e sensores de emissão acústica (EA) (LEE *et al.*, 2005; LU; WAN, 2013). A escala de precisão e os principais parâmetros de controle para cada tipo de sensor são apontados na Figura 6.

Figura 6 - Sistemas de monitoramento em usinagem em função da escala de precisão e dos parametros de controle



Fonte - Adaptado de Lee et al. (2005)

Conforme apresentado na Figura 6, no que se refere à usinagem de precisão (IV quadrante), há predominância majoritária de monitoramento via sistemas de EA, seguida por acelerômetros, interferômetros a laser e células de carga. A abordagem apontada pelo gráfico indica que a integridade superficial e a anisotropia do material são parâmetros de controle objetos de estudo da emissão acústica na usinagem de precisão.

A detecção de desgaste e avarias na ferramenta de corte é de fundamental importância em processos de usinagem (GAUTSCHI, 2002). Esse fenômeno pode ser apontado por células de carga através de mudanças na força de usinagem, como também através do sinal de EA, que é sensível a tais eventos de contato (MARSCHALL; GAUTSCHI, 1994). Por exemplo, enquanto a trajetória da ferramenta sobre cavidades, furos, etc. influencia a força do processo,

não há diferença significativa no sinal de EA desde que a aresta de corte da ferramenta permaneça em contato com a peça. Portanto, monitorar o sinal de EA se mostrou mais indicado para detectar o contato e a quebra da ferramenta independentemente do corte ser ou não contínuo.

Diniz, Liu e Dornfeld (1992) monitoraram operação de acabamento no torneamento e observaram um aumento consistente nos sinais de EA com o desgaste da ferramenta. A energia desprendida no atrito entre a superfície de folga e a peça, e a superfície de saída e o cavaco formado durante o processo aumentou à medida que os níveis de desgaste da ferramenta de corte também cresceram. Essa observação fundamenta que quanto maior a energia necessária para a usinagem do material, maiores são os níveis de energia no sinal de emissão acústica.

Jemielniak e Arrazola (2008) monitoraram a condição da ferramenta de corte no microfresamento por meio da aquisição de dados de força, e de emissão acústica e identificaram que o sinal de EA sofre variações em termos de intensidade do sinal quadrático médio (RMS). Essa forma de processamento de sinal possibilitou a detecção do contato peça-ferramenta, viabilizando a transmissão de informações a respeito da integridade da ferramenta de corte. Os resultados apontaram que a correlação entre força e desgaste no microfresamento é semelhante à do fresamento convencional, embora os níveis de força observados em função do tempo de ensaio sejam consideravelmente inferiores em operações de microfresamento.

Malekian, Park, e Jun (2009) inverstigaram os fatores que afetam o desgaste da ferramenta de corte em processos de microfresamento e monitoraram o processo por meio de sensores de vibração, força e EA. Os sinais foram analisados em conjunto através da técnica de "neuro-fuzzy". A condição real da ferramenta foi analisada por meio de microscopia óptica in situ, e os dados obtidos alimentaram o treinamento da rede neural para o desenvolvimento de análises dos sinais em tempo real. Diante das altas rotações de operações de microfresamento, foi observado nesse estudo (rotação de 80.000 rpm) que houve uma interferência nos resultados de força, enquanto os sensores de EA e vibração puderam representar o processo por apresentarem um maior espectro de frequência. Assim, os autores afirmam que a fusão de sensores de diferentes bandas de frequências proporciona uma forma efetiva de monitorar desgaste de microfresas.

Prakash e Kanthababu (2013) monitoraram a condição da ferramenta no microfresamento de alumínio, cobre e ligas de aço via sensor de EA. Observou-se que existe uma forte correlação entre os sinais de desgaste de flanco na ferramenta e o sinal de EA, além da rugosidade (Ra) e a morfologia do cavaco. A partir de análises de imagem da ferramenta em

MEV e EDX, foram qualificados os mecanismos de desgaste de adesão e deformação plástica, em todos os três materiais. A delaminação do revestimento da microfresa também foi observada durante a usinagem das ligas de aço. Este trabalho fornece um conhecimento significativo sobre o uso do sensor EA no monitoramento da condição da ferramenta e na compreensão do mecanismo de desgaste da ferramenta no microfresamento de diferentes materiais.

Maia et al. (2015) desenvolveram uma metodologia para a detecção da influência do revestimento de AlCrN nos mecanismos de desgaste e na determinação do fim de vida. Para tanto, eles utilizaram insertos revestidos e sem revestimento no torneamento de aço AISI 4340, monitorando o processo através de sinais de EA. As análises levaram em consideração o desgaste de flanco máximo e a análise da densidade de potência do sinal de EA. Os resultados indicaram que a presença do revestimento prolongou a vida da ferramenta; o monitoramento de EA é sensível às taxas de desgaste de flanco em termos de energia do sinal, indicada a partir de valores médios da densidade espectral de potência (PSD), além da constatação que o aumento da temperatura reduz a amplitude do sinal de EA.

Diferentemente dos trabalhos apontados nesse tópico, este projeto avalia o monitoramento de desgaste de ferramenta no microfresamento a partir da utilização de um sensor de emissão acústica convencional e da análise de sinais de potência de usinagem.

Segundo Valente (2003), EA é extremamente rápida e adequada para detectar o contato entre superfícies, aplicado à processos abrasivos. Porém, o autor ainda afirma que o nível acústico não apresenta padrão ao longo do processo, podendo ser influenciado por fatores como geometria da peça, distância da fonte ao sensor, montagem do sensor, etc. que independem da interação peça-ferramenta. Tendo isso em vista as os pontos apresentados, um estudo pontual das características dos sinais de EA será abordado a seguir.

Emissão acústica é definida pela Sociedade Americana para Testes e Materiais (ASTM) como sendo ondas transientes elásticas geradas pela rápida liberação de energia de fontes inerentes a um material. De forma simplificada, todo processo que é capaz de mudar a estrutura interna do material, seja a partir do movimento de discordância, ou por difusão, distorção, escorregamento de planos no contorno de grão, que resultam na deformação plástica, transformação de fase, na presença de defeitos pontuais e na fratura do material são fontes de EA (RAVINDRA; SRINIVASA; KRISHNAMURTHY, 1997).

Na usinagem, os mecanismos de deformação plástica e a fratura possuem grande relevância durante o processo (TRENT, 1984), assim espera-se que o uso de técnicas de

monitoramento via sinal de EA sejam promissoras. A Figura 7 apresenta as variadas fontes de ondas de EA em micro e em macro escala, como também as zonas de frequência característica de monitoramento para cada tipo de sensor.

Um dos fatores que facilita a aplicação de sensores de EA é a característica nãodirecional das ondas. As fontes de EA funcionam como emissores pontuais, irradiando energia em frentes de onda esféricas por toda a superfície do material (McINTIRE; MILLER, 1987). Assim, o sensor pode estar localizado em qualquer lugar na vizinhança da fonte EA e ainda detectar os sinais emitidos da fonte.

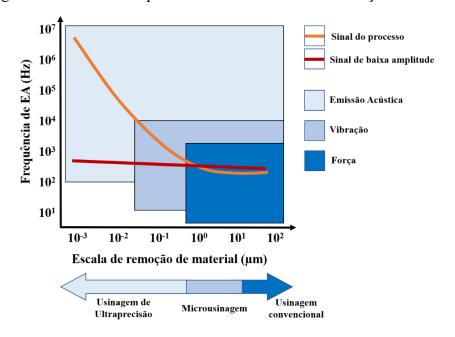


Figura 7 - Fontes de EA para diferentes momentos da remoção de material

Fonte - Adaptado de Lee et al. (2005)

As fontes de EA podem ter características muito variadas, e isso se dá diante das diferenças no estímulo inicial. Essas diferenças tornam-se mais preponderantes após o tratamento do sinal quando são utilizados transdutores não-ressonantes. De acordo com McIntire e Miller (1987), emissões contínuas (Figura 8b) produzidas durante uma operação de usinagem mostram características de sinal muito diferentes quando comparadas aos sinais causados pela liberação espontânea de energia durante, por exemplo, um impacto (Figura 8a).

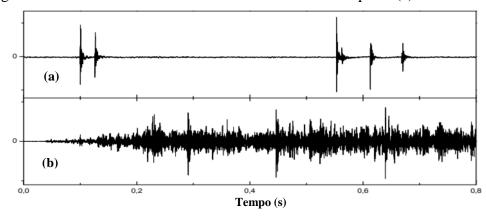


Figura 8 - Formas características do sinal de EA: sinal de picos (a) e sinal contínuo (b)

Fonte - Adaptado de McIntire e Miller (1987)

O sinal de picos possui como característica alta amplitude e baixa frequência e é proveniente da formação de microtrincas superficiais de cavacos. O sinal contínuo, por sua vez, é caracterizado por baixa amplitude e alta frequência. Ambos os sinais são resultados da atividade do mecanismo interno e da deformação plástica do material (KANNATEY-ASIBU; DORNFELD, 1982; INASAKI, 1998). A Tabela 2 apresenta mais características do sinal de EA de alta e baixa amplitude.

Tabela 2 - Fatores que geram sinais de EA com alta e baixa amplitude

EA de alta amplitude	EA de baixa amplitude
Alta tensão de ruptura	Baixa tensão de ruptura
Alta taxa de carregamento	Baixa taxa de carregamento
Anisotropia	Isotropia
Heterogeneiade	Homogeneidade
Materiais densos	Materiais porosos
Baixas temperaturas	Altas temperaturas
Transformação de fase adifusional	Transformação de fase difusional
Propagação de trincas	Deformação plástica
Tamanho de grão grande	Tamanho de grão pequeno

Fonte - Adaptado de Nazarchuk, Skalskyi e Serhiyenko (2017)

O monitoramento de sinal de EA pode ser usado para investigar fenômenos que ocorrem durante processos de usinagem, embora seja relativamente difícil localizar precisamente a fonte de sinal. Os sinais de EA também dependem do tipo de material e do meio de propagação, de forma que um material dúctil resultará em um sinal com predominância da característica contínua, enquanto um material frágil resultará em sinais do tipo transiente. A faixa de

frequência de operação com a qual um sistema de EA normalmente funciona é entre 20 kHz e 1 MHz (DHULUBULU, 2015).

De forma geral, o monitoramento via EA é iniciado a partir do momento em que ondas elásticas transientes propagam pela estrutura do material até um transdutor piezoelétrico em contato com a superfície do material (McINTIRE; MILLER, 1987). O transdutor executa a principal função na interpretação do processo: a cada novo esforço mecânico aplicado no material, resultando em modificações em sua estrutura cristalina, o transdutor recebe a onda de pulso e a converte em um sinal de tensão elétrica. Os sinais provenientes do monitoramento de processos, indepenaresta do transdutor de origem, são adquiridos no domínio do tempo (BRIGHAM, 1988). Assim, as transformadas permitem que um sinal possa ser representado no domínio da frequência, e vice-versa, sendo um dos métodos utilizados a Transformada Rápida de Fourier (FFT, Fast Fourier Transform) (ZENG; FORSSBERG, 1994).

## 3 MATERIAIS E MÉTODOS

Os materiais e métodos empregados neste trabalho foram definidos a partir da realização de pré-testes, nos quais foram explorados a operação de equipamentos disponíveis para o desenvolvimento desta pesquisa e os parâmetros de usinagem utilizados nos ensaios de microfresamento. Assim, este capítulo apresenta a caracterização dos materiais dos corpos de prova e os métodos utilizados no desenvolvimento dos ensaios de microfresamento e no processamento de sinais.

## 3.1 MATERIAIS

Os materiais utilizados para a confecção dos corpos de prova foram um aço baixo-carbono bifásico (ferrita-perlita) com 11 µm de tamanho médio de grão ferrítico e sua versão após um processamento termomecânico para homogeneização e refino dos grãos da microestrutura, caracterizando um aço monofásico ferrítico com tamanho médio de grão de 0,7 µm (obtido conforme descrito na patente PI11072474), denominados COS AR60 e GUF, respectivamente. A composição química nominal do COS AR60 é apresentada na Tabela 3, enquanto as principais propriedades mecânicas dos dois materiais são mostradas na Tabela 4.

Tabela 3 - Composição química do aço COS AR60 (% em peso)

С	Mn	P	S	Si	Al	Cu	Cr	Ni	Nb	V	Ti	Ceq
0,15	1,49	0,027	0,009	0,27	0,046	0,005	0,276	0,008	0,048	0,044	0,016	0,40
Fonte - Cosina (2005)												

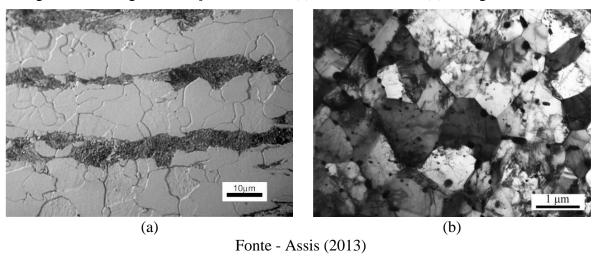
Tabela 4 - Principais propriedades mecânicas para o aço COS AR60 e GUF

Material	Tamanho de grão (μm)	Dureza (HV)	Tensão de escoamento (MPa)	Energia Charpy (J)
COS AR60	11,0	192	474	176
GUF	0,7	216	510	285

Fonte - Adaptado de Assis, Jasinevicius e Rodrigues (2015)

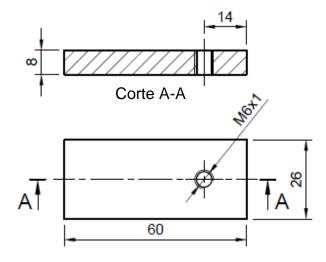
A Figura 9 apresenta a microestrutura do material COS AR60 como recebido e do GUF. O material como recebido possui uma matriz ferrítica com presença de faixas de perlita, enquanto na microestrutura do GUF predomina a ferrita, com formação de cementita globular nos contornos de grão, identificadas como pequenas estruturas negras globulares de tamanho namométrico (ASSIS, 2013). Devido às dimensões reduzidas da cementita globular quando comparada à matriz ferrítica presente no GUF, do ponto de vista da usinagem, esse material pode ser considerado como sendo um aço monofásico ferrítico.

Figura 9 - Micrografia do aço COS AR60 (a) como recebido e (b) com grãos ultrafinos



Todos os corpos de prova obtidos dos dois materiais e utilizados nos ensaios de microfresamento possuem dimensões de 8x26x60 mm e rosca M6x1 passante para fixação de sensor de EA, conforme apresentado na Figura 10.

Figura 10 - Desenho técnico em 1º diedro do corpo de prova utilizado nos ensaios



Fonte - Elaborado pela autora

## 3.2 MÉTODOS

Os ensaios de microfresamento foram realizados em um centro de usinagem vertical CNC Romi D800 High Performance, de comando numérico GE Fanuc Series 21i-MB e resolução de movimento de 1 µm nos fusos dos eixos x, y e z, alocado no Laboratório de Processos Avançados e Sustentabilidade (LAPRAS), no Núcleo de Manufatura Avançada (NUMA) da Escola de Engenharia de São Carlos - Universidade de São Paulo.

Para o controle da velocidade de corte, um cabeçote de alta rotação NSK HES501 foi acoplado ao eixo-árvore do centro de usinagem através da adaptação feita no cone BT40, com controlador NSK Astro-e500z, de rotação máxima de 50.000 rpm, potência de 250 W e torque de 7 cN.m. O batimento radial quasi-estático foi medido no início de cada ensaio com o auxílio de um relógio apalpador digital Heidenhain modelo MT12 em contato com o corpo da microfresa. O erro de batimento *quasi-estático* foi medido para verificar o quanto a microfresa variou radialmente a cada rotação, sendo o valor máximo obtido de 2 μm.

Os microcanais foram usinados por microfresas de diâmetro de 1 mm e duas arestas, com substrato de metal duro e revestimento (Ti, Al, Cr) N, em corpos de prova COS AR60 e GUF, sem a aplicação de fluido de corte. Os parâmetros de usinagem utilizados para a fabricação dos microcanais foram:  $v_c$ =62,5 e 125 m/min,  $v_f$ =240 mm/min e  $a_p$ =100  $\mu$ m constantes, conforme a Tabela 5.

Tabela 5 - Parâmetros de usinagem utilizados nos ensaios de microusinagem

Parâmetros de usinagem	Valor nominal		
Valanidada da aarta (v. )	62,5 m/min		
Velocidade de corte (v <sub>c</sub> )	125 m/min		
A vanca non anata (f.)	6 μm/aresta		
Avanço por aresta (f <sub>z</sub> )	3 μm/aresta		
Penetração de trabalho (a <sub>e</sub> )	1000 µm		
Profundidade de usinagem (ap)	100 μm		

Fonte - Elaborada pela autora

A escolha dos parâmetros de usinagem foi realizada a fim de averiguar como a velocidade de corte influencia o desgaste da microfresa e como o sinal de emissão acústica e de potência respondem ao processo. Para tanto, determinou-se que condições severas de usinagem seriam evitadas para preservar a ferramenta de avarias precoce. Dessa forma, os fatores de

controle adotados como variáveis de entrada foram a velocidade de corte e o material do corpo de prova (Figura 11).

Material (COS AR60 e GUF)

Velocidade de corte (62,5 e 125 m/min)

Ensaios e análises

Sinais de EA - RMS

Figura 11 – Fatores de controle e variáveis de resposta

Fonte - Elaborada pela autora

O movimento de corte nos ensaios de usinagem seguiu a trajetória linear (no plano xy) da ferramenta em relação à peça, escolhida por ser considerada a condição na qual é possível inferir a menor variação entre a velocidade de avanço programada e a velocidade de avanço real da máquina. O referenciamento do eixo Z foi realizado com o auxílio do localizador de arestas Accure<sup>®</sup> DotZero, que possui precisão de 1 µm de acordo com o fabricante (ARAI, 2018) e que se manteve como referencial de zeramento durante todos os ensaios. O zeramento do corpo de prova e da microfresa em relação ao eixo Z se deu conforme descrito a seguir:

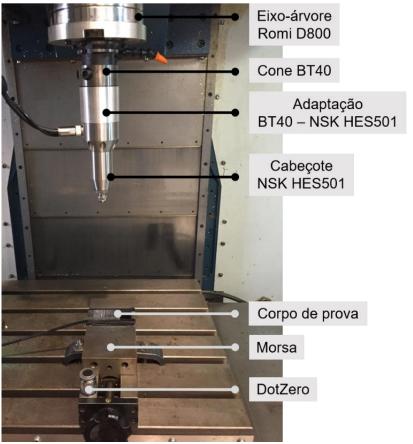
- 1. Posicionamento do corpo de prova na morsa;
- 2. Faceamento superficial do corpo de prova (fresa com 50 mm de diâmetro e quatro insertos de metal duro) para reduzir o erro de ortogonalidade entre a superfície de ensaio e o eixo árvore da máquina-ferramenta;
- 3. Diferença entre altura de ensaio do corpo de prova e a superfície de referência do DotZero<sup>®</sup> foi medida após subtrair a coordenada absoluta do eixo Z do faceamento superficial do corpo de prova da coordenada de referência da aresta mais baixa da fresa utilizada no faceamento superficial;
- 4. Obter o offset da microfresa com o auxílio do DotZero<sup>®</sup>, tendo em vista que ao conhecer a variação de altura entre o DotZero<sup>®</sup> e a superfície do corpo de prova, obtém-se a posição Z=0 da microfresa em relação à superfície do corpo de prova.

Nesse procedimento de referenciamento, os itens 1-3 foram realizados a cada troca de corpo de prova, enquanto que o item 4 foi repetido após todas as retiradas de ferramenta.

O critério de fim de vida foi a obtenção de desgaste de flanco máximo obtido de 40 µm ou a usinagem de um comprimento de 104 mm – equivalente à fabricação de quatro microcanais

de 26 mm distantes entre si em 2 mm. Essas definições foram fundamentadas em dados de vida da ferramenta levantados e apresentados na seção 2.2 deste trabalho. O setup experimental é apresentado na Figura 12.

Figura 12 - *Setup* experimental dos ensaios de microfresamento com monitoramento de potência e emissão acústica



Fonte - Elaborada pela autora

O monitoramento da ferramenta foi realizado *offline* por meio da análise das arestas de corte em um microscópio laser 3D Confocal Olympus OLS 4100 ao final de cada microcanal usinado. Essas análises foram realizadas com a finalidade de contribuir com os resultados em termos de mapeamento da geometria característica e desgaste da ferramenta de corte ao longo da microusinagem. Nesta perspectiva, imagens de topo da microfresa e de cada aresta nas superfícies de saída e de flanco principal foram realizadas com aumento óptico de 10x e de 50x, para melhor caracterização da microfresa.

As imagens de MEV foram obtidas na Central de Análises Químicas Instrumentais do Instituto de Química de São Carlos (CAQI/IQSC/USP) em um equipamento ZEISS LEO 440 (Cambridge, England) com detector OXFORD (model 7060), operando com feixe de elétrons de 15 kV, corrente de 2,82 A e I probe de 200 pA. As imagens com elétrons restrospalhados

foram obtidas utilizando *four quadrant backscattered* detector de eletrons tipo 400 (Cambridge, England), operando com feixe de elétrons de 20 kV, corrente de 2,82 A e I probe de 1500 nA.

As análises de Espectroscopia de raios-X por Dispersão de Energia (EDS) foram realizadas na Central de Análises Químicas Instrumentais do Instituto de Química de São Carlos (CAQI/IQSC/USP) em um equipamento EDX LINK ANALYTICAL (Isis System Series 300), com detetor de SiLi Pentafet, janela ultrafina ATW II (Atmosphere Thin Window), de resolução de 133 eV a 5,9 keV e área de 10 mm², acoplado a um Microscópio Eletrônico ZEISS LEO 440 (Cambridge, England). Para tais análises, utilizou-se padrão de Co para calibração, feixe de elétrons de 20 kV, distância focal de 25 mm, *dead time* de 30%, corrente de 2,82 A e I probe de 2,5 nA.

As frequências de corte para as rotações de 20.000 rpm e 40.000 rpm (v<sub>c</sub>=62,5 m/min e 125 m/min) são 333,3 Hz e 666,7 Hz, respectivamente. Assim, tendo em vista o teorema de Nyquist e as altas frequências do sinal de EA, ambos os sinais de potência e de rotação foram adquiridos à taxa de 5 kHz, enquanto uma taxa de 1,25 MHz foi utilizada na aquisição do sinal de EA, tendo em vista uma maior discretização dos sinais.

O monitoramento dos sinais de potência e rotação do cabeçote foi realizado a partir da da conexão entre os pinos referentes na saída db25 do controlador NSK Astro-e500 a cabos BNC confeccionados para a comunicação com a placa de aquisição NI USB-6341. Já o monitoramento de EA contou com a fixação de um sensor de EA SENSIS® ao corpo de prova (Figura 13) e sua conexão direta ao monitor de processos SENSIS® DM-42.

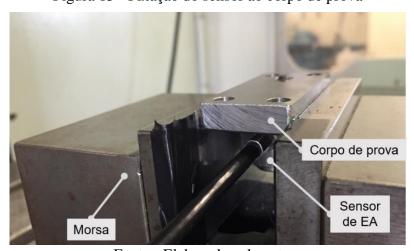


Figura 13 - Fixação do sensor ao corpo de prova

Fonte - Elaborada pela autora

Em relação ao sensor de EA utilizado, vale ressaltar que possui curva de resposta com picos de frequência a partir de 15 kHz, de acordo com o fabricante, e que as respostas obtidas ao longo da curva de FFT dependem também das condições de montagem do sensor no corpo de prova e de sua fixação à mesa da máquina-ferramenta (WEBSTER; DONG; LINDSAY, 1998).

O ajuste dos ganhos de sinal e de entrada no monitor de processos SENSIS® DM-42 foi realizado com base nos indicadores de saturação de sinal (S1 e S2), de modo a não saturar o sinal (SENSIS, 2000). O modo de operação foi contínuo e de saída RAW com ganhos de entrada de 10, ganho de sinal de 35, redução de ruído de 10 e filtro passa alta em 250 Hz. Esses parâmetros foram determinados para melhor condicionar o sinal para o processamento do sinal e para eliminar frequências de rede elétrica.

O monitor de processos foi conectado ao bloco de conectores NI BNC 2110 e à placa de aquisição NI PCI-6251, onde ocorre a conversão A/D do sinal e a comunicação com o programa de aquisição de dados, que foi desenvolvido em LabVIEW<sup>®</sup>. A bancada de monitoramento é ilustrada na Figura 14.

Fonte 12V para SENSIS DM-42 Controlador NSK Astro-e500z Bloco de Placa de Monitor de PC aquisição processos conectores Placa de aquisição NI BNC-2110 NI USB-6341 SENSIS DM-42 NI PCI-6251

Figura 14 - Bancada de monitoramento de potência e emissão acústica no microfresamento

Fonte - Elaborada pela autora

Os programas desenvolvidos em LabVIEW® para aquisição e processamento de dados estão descritos no Apêndice A em detalhes. Ainda, rotinas foram desenvolvidas no software MATLAB® R2015a versão acadêmica para cálculo dos valores RMS do sinal e análise no

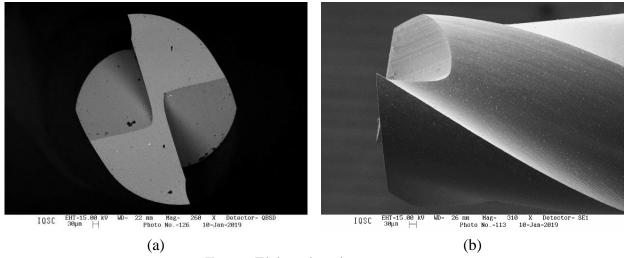
domínio da frequência. Os valores RMS dos sinais de EA foram calculados considerando uma janela de tempo de 1 ms, equivalente a 1250 pontos do sinal, e a análise espectral foi realizada a partir dos gráficos de FFT do sinal para verificar as faixas de frequência mais significativas do espectro.

Os ensaios de microfresamento ocorreram com o monitoramento *insitu* de sinais de emissão acústica e potência de corte sendo os parâmetros de usinagem definidos com base em dados levantados ao longo da realização de pré-testes. Os pré-testes também foram fundamentais para a definição e treinamento da metodologia de ensaio de forma a eliminar os erros sistemáticos do experimento e limitar as fontes de variabilidade das amostras.

Embora repetições não tenham sido realizadas nos ensaios apresentados neste trabalho, a análise dos resultados não foi prejudicada, uma vez que os ensaios foram controlados e os dados experimentais foram admitidos independentes entre si e livres de erros sistemáticos, fazendo parte de uma distribuição normal. Para indicação da tendência dos dados, foi aplicada a Análise de Variância (ANOVA) *Two Way* no software Statistica v. 64 visando identificar ou não a significância entre os fatores (velocidade de corte e material) e as variáveis de resposta (desgaste de flanco e EA RMS). Os testes de normalidade validaram a aplicação da ANOVA, que utilizou um nível de significância de 5% e 10% para desgaste de flanco e EA RMS, respectivamente.

Uma imagem da microfresa Mistubishi MS2MSD0100 utilizada nos ensaios de microfresamento antes do corte é apresentada na Figura 15. As imagens das demais ferramentas utilizadas em cada um dos ensaios encontram-se no Apêndice B.

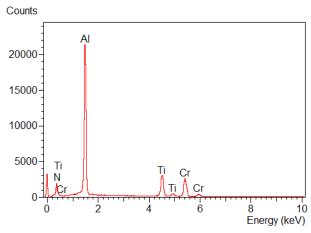
Figura 15 - Mitsubishi MS2MSD0100 nova em vista de topo (a) e frontal (b)



Fonte - Elaborada pela autora

A análise de EDS realizada na ferramenta nova indicou os percentuais atômicos de 48,46% Al, 12,24% Ti, 15,25% Cr e 24,05% N na região revestida de (Ti, Al, Cr) N, conforme descrito na Figura 16.

Figura 16 - Análise de EDS na região de revestimento da ferramenta

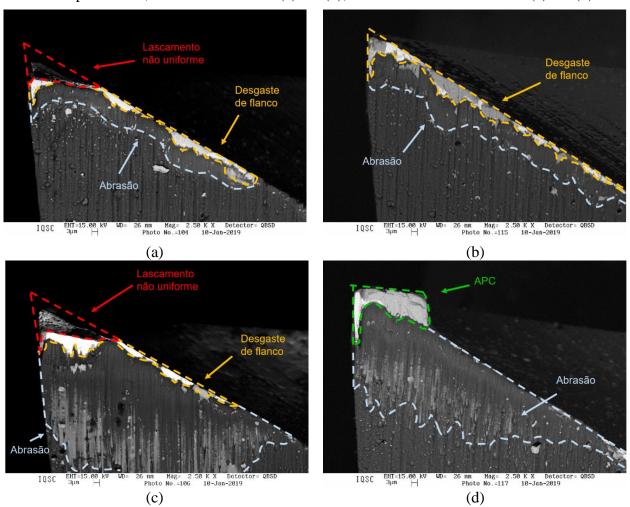


Fonte - Elaborada pela autora

A observação das microfresas nos dois níveis de velocidade de corte estabelecidos e para os dois materiais de corpo de prova, em termos de desgaste e lascamentos não uniformes, é apresentada por meio de imagens no Apêndice C.

A Figura 17 dispõe imagens de microscopia realizada na superfície de folga da aresta 1 (direita) e da aresta 2 (esquerda) das ferramentas após percurso de usinagem de 104 mm em GUF com  $v_c$ =62,5 m/min (a, b) e  $v_c$ =125 m/min (c, d), respectivamente. Enquanto a Figura 18 apresenta imagens de microscopia realizada na superfície de saída da aresta 1 (direita) e da aresta 2 (esquerda) das ferramentas após percurso de usinagem de 104 mm em GUF com  $v_c$ =62,5 m/min (a, b) e  $v_c$ =125 m/min (c, d), respectivamente.

Figura 17 - Superfície de folga das ferramentas após o microfresamento de GUF com lc=104 mm para vc=62,5 m/min na aresta 1 (a) e 2 (b), e vc=125 m/min na aresta 1 (c) e 2 (d)



Fonte - Elaborada pela autora

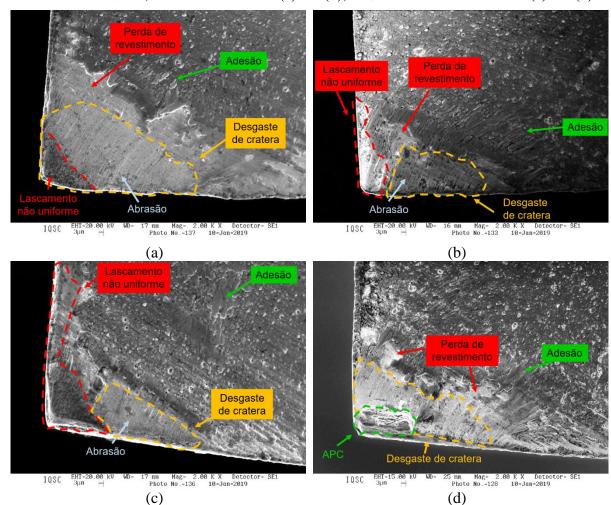


Figura 18 - Superfície de saída das ferramentas após o microfresamento de GUF com lc=104 mm e v<sub>c</sub>=62,5 m/min na aresta 1 (a) e 2 (b), e v<sub>c</sub>=125 m/min na aresta 1 (c) e 2 (d)

Fonte - Elaborada pela autora

Com base nas Figura 17 e Figura 18, é possível apontar que, para o microfresamento de GUF para v<sub>c</sub> de 62,5 m/min e 125 m/min, ocorreu lascamento não uniforme em uma das arestas da microfresa. Tal fenômeno pode ser decorrente do batimento *quasi-estático*, que é um valor próximo ao f<sub>z</sub> obtido nos ensaios com velocidade de corte de 125 m/min.

Além da presença do lascamento não uniforme, obteve-se também desgaste de flanco e a presença de marcas de abrasão para a usinagem a 62,5 m/min; e desgaste de flanco, marcas de abrasão mais expressivas e a formação de Aresta Postiça de Corte (APC) para a condição com velocidade de corte de 125 m/min. Na superfície de saída das microfresas, observa-se a ocorrência de perda de revestimento, desgaste de cratera e a presença de material aderido sobre o revestimento da ferramenta e sobre o material do substrato em forma de APC.

A análise de EDS realizada na região da ferramenta que apresentou perda de revestimento indicou a presença de 68,42% C, 8,69% W, 8,73% Al, 3,43% Ti, 1,85% Cr, 6,94% Fe e 1,94% Co na região do revestimento de (Ti, Al, Cr) N, conforme descrito na Figura 19. A composição majoritária de Carbono e Tungstênio comprova a presença do material do subtrato de WC.

Counts

8000

6000

Fe Co Min CrafeCcw

Ti C

Figura 19 - EDS do substrato da ferramenta após perda de revestimento

Fonte - Elaborada pela autora

O atrito devido ao movimento relativo entre cavaco e a superfície de saída da microfresa dá origem às linhas de abrasão presentes majoritariamente no substrato, sendo o gradiente de temperatura nessa interface durante o corte responsável pelo acúmulo de material na superfície de saída por adesão (MACHADO *et al.*, 2009). Uma análise de EDS na região de formação da APC (Figura 20) indicou a presença de Fe e C, nas percentagens atômicas de 54,06 e 43,94%, respectivamente, como também de 0,50 % Si, 0,25% Ti, 0,30% Cr e 0,95% Mn – elementos de composição da matriz do corpo de prova.

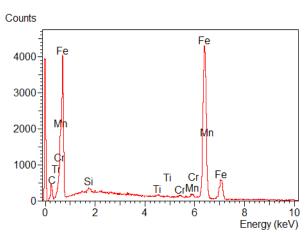


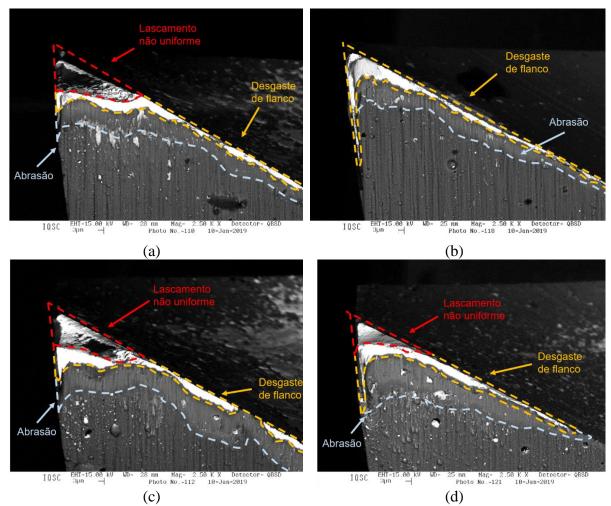
Figura 20 - EDS da região de formação de APC

Fonte - Elaborada pela autora

A formação de APC ocorre sobre condições extremas de deformação, portanto é considerada uma estrutura fortemente endurecida que afeta o acabamento da peça e a precisão dimensional, além de exercer uma influência significante sobre a vida das ferramentas de corte (TRENT, 1984; KOVVURI, 2015; WANG *et al.*, 2016). Kovvuri (2015), estudou a formação de APC no microfresamento de aço A36, verificando a presença de APC com lc=128 mm e a imprevisibilidade de ocorrência. Também foi observado o lascamento não uniforme significativo em uma das duas arestas de corte nas microfresas revestidas com TiAlN. Este trabalho, diferentemente de Kovvuri (2015), investiga o efeito da redução do tamanho de grão na microusinagem de aço de baixo carbono com elementos de liga em sua composição.

Imagens das ferramentas de corte após lc=104 mm no microfresamento de COS AR60 para  $v_c=62,5$  e 125 m/min foram realizadas e são apresentadas nas Figura 21 e Figura 22, as quais evidenciam as superfícies de flanco e de saída da ferramenta, respectivamente.

Figura 21 - Superfície de folga das ferramentas após o microfresamento de COS AR60 com lc=104 mm e  $v_c=62,5$  m/min na aresta 1 (a) e 2 (b), e  $v_c=125$  m/min na aresta 1 (c) e 2 (d)

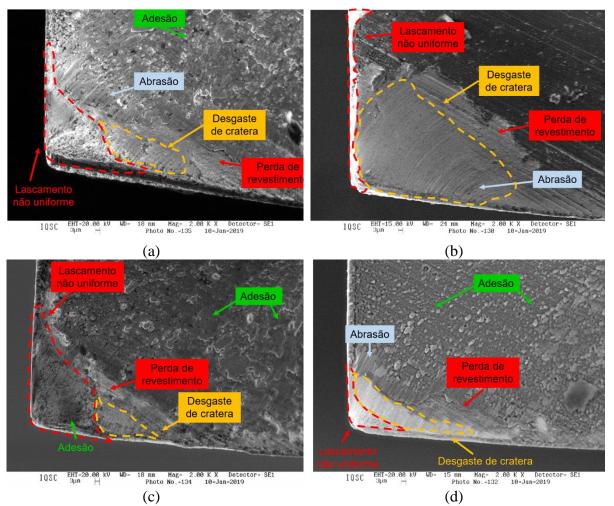


Fonte - Elaborada pela autora

A partir da Figura 21 pode-se apontar que, para o microfresamento de COS AR60 com v<sub>c</sub>=62,5 m/min e 125 m/min, também há a ocorrência de lascamento não uniforme majoritário em uma das arestas da microfresa, assim como também a presença de marcas de abrasão e de desgaste de flanco. A análise da Figura 22, contudo, apresenta marcas de abrasão sobre a perda de revestimento, configurando a formação de desgaste de cratera, assim como também apresenta marcas de adesão de material sobre o revestimento da ferramenta.

Embora o COS AR60 seja um material mais dúctil do que o GUF, não foi observado a presença de APC nas ferramentas de corte. Contudo, para imagens realizadas logo após o ensaio com v<sub>c</sub>=62,5 m/min (Figura 22c e Figura 48f), é possível perceber a presença de material aderido em região próxima à aresta principal de corte da ferramenta. Diante da dinâmica do corte no contato peça-ferramenta, é provável que o material aderido na aresta da ferramenta tenha se desprendido ao longo do canal antes de configurar a formação de APC.

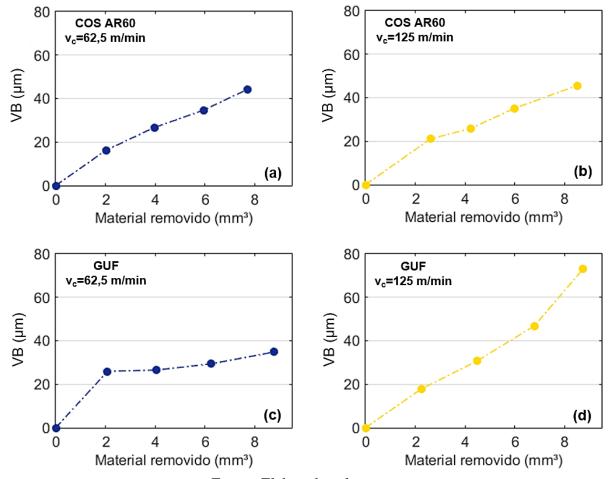
Figura 22 - Superfície de saída das ferramentas após o microfresamento de COS AR60 com lc=104 mm e v<sub>c</sub>=62,5 m/min na aresta 1 (a) e 2 (b), e v<sub>c</sub>=125 m/min na aresta 1 (c) e 2 (d)



Fonte - Elaborada pela autora

A evolução e quantificação do desgaste de flanco, assim como a ocorrência de desgaste de cratera e de lascamentos não uniformes para os comprimentos de usinagem de 26 mm, 52 mm e 78 mm são apresentados para cada condição de ensaio no Apêndice C. O desgaste de flanco obtido nas microfresas em função do volume de material removido para velocidades de corte de 62,5 e 125 m/min, em GUF e COS AR60, é apresentado na Figura 23. Nessa análise, os valores de desgaste máximo entre as duas aresta foram considerados.

Figura 23 - Evolução do desgaste de flanco no microfresamento de COS AR60 com  $v_c$ =62,5 m/min (a) e 125 m/min (b) e de GUF com  $v_c$ =62,5 m/min (c) e  $v_c$ =125 m/min (d)



Fonte - Elaborada pela autora

O desgaste de flanco máximo obtido no microfresamento de GUF com velocidade de corte de 62,5 m/min e 125 m/min para lc=104 mm, foi de 34,85 µm e 72,91 µm, respectivamente. O aumento do desgaste de flanco deve-se, de forma majotirária, ao aumento da velocidade de corte. Para a velocidade de corte de 62,5 m/min, observa-se que a ferramenta de corte encontra-se na zona II da curva de Taylor para desgaste de ferramenta, mantendo-se com taxa de crescimento de desgaste aproximadamente constante. Contudo, considerando a velocidade de corte de 125 m/min, os níveis de desgaste obtidos para o lc=104 mm, indicam a

25

20

presença da zona III da curva de Taylor para desgaste de ferramenta, apresentando-se na iminência de falha catastrófica e fim de vida.

Já na usinagem do COS AR60, nota-se que os níveis de desgaste máximo obtidos para as duas velocidades de corte são semelhantes: 44,28 μm e 45,55 μm, respectivos às velocidades de corte de 62,5 e 125 m/min, considerando o comprimento de usinagem de lc=104 mm. A ANOVA da interação entre o material da peça e a velocidade de corte no desgaste de flanco de microfresas com índice de significância de 5% é apontada na Figura 24.

80
75
70
65
60
65
40
35
30

GUF

 $v_c = 62,5 \text{ m/min}$ 

 $v_c = 125,0 \text{ m/min}$ 

Figura 24 – Interação entre material e velocidade de corte no desgaste de flanco para lc=104 mm

Fonte - Elaborada pela autora

Material

COS AR60

Com base no gráfico de interação apresentado na Figura 24, é possível apontar que tanto a velocidade de corte quanto o tamanho de grão apresentaram significância na influência do desgaste de flanco (P-valor=0,00047 <  $\alpha$ =0,05), que evolui com o aumento da velocidade de corte e aumento do tamanho de grão do material.

Analisando os dois fatores (velocidade de corte e material) em conjunto com a variável de resposta (desgaste de flanco), não houve diferença significativa no microfresamento de COS AR60 nas duas velocidades de corte, enquanto o GUF apresentou diferença significativa para ambas as entradas. Os lascamentos não uniformes sofridos ao longo do microcorte no COS AR60 podem ter influenciado o crescimento do desgaste de flanco, visto que após o lascamento, uma nova geometria de corte é criada e, com isso, há uma alteração na dinâmica do corte. Ainda, tal diferença pode ser explicada com base na microestrutura dos materiais,

sendo o GUF um aço monofásico ferrítico com tamanho médio de grão de 0,7 µm, e o COS AR60 um aço de baixo-carbono bifásico (ferrita-perlita) com tamanho médio de grão de 11 um.

A heterogeneidade na microestrutura da peça leva a variações significativas no processo de usinagem à medida que o corte passa de uma fase para outra. Essas variações afetam o microcorte e, por conseguinte, a força de usinagem e a formação de cavaco, e também a qualidade da superfície usinada (CARDOSO; DAVIM, 2012). Devido ao tamanho reduzido de grão, a microusinagem do GUF tende a ser mais isotrópica e a do COS AR60 considerada mais anisotrópica.

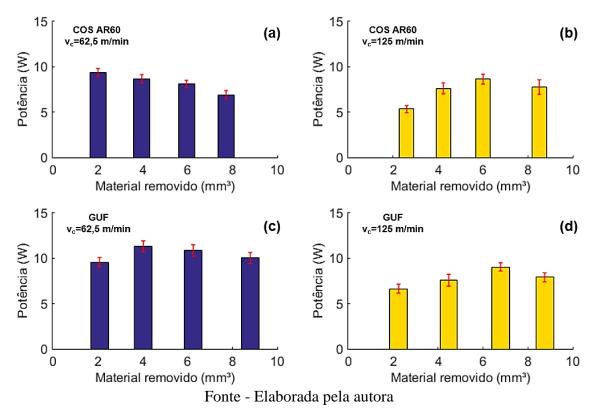
Nesta perspectiva, com a diminuição do tamanho de grão há também o aumento de contornos de grão para determinada área de análise, o que dificulta o movimento das discordâncias durante o corte e aumenta a resistência mecânica do material. A lei de Hall-Petch fundamenta que, com a diminuição do contorno do grão, há o incremento proporcional do limite de escoamento do material com o inverso da raiz quadrada do diâmetro médio de grão (CALLISTER; RETHWISH, 2009).

Assim, apesar de haver uma diminuição do tamanho de grão, a velocidade de corte e a taxa de deformação no GUF são grandezas diretamente proporcionais e que possuem influência nos valores de limite de escoamento, tensão de ruptura e cisalhamento do material (MACHADO et al., 2009). Dessa forma, com o aumento dessas propriedades, o cisalhameto do GUF requisitou mais esforços em relação ao COS AR60, que podem ser comprovados a partir da potência média consumida, principalmente para v<sub>c</sub> maiores, promovendo um desgaste mais acentuado na condição de v<sub>c</sub>=125 m/min quando comparado à condição de v<sub>c</sub>=62,5 m/min.

Partindo-se desse pressuposto, é provável que haja uma influência da resistência ao choque e cisalhamento na movimentação e volume das discordâncias no maior desgaste, tendo em vista que a energia charpy do GUF é maior do que a do COS AR60. Já para o COS AR60, por apresentar menor energia charpy, é necessário menos esforços mecânicos para cisalhar o material.

No ponto de vista do monitoramento, a evolução/predominância dos desgastes de flanco e de cratera podem ser observados nos sinais de potência e de EA. Os valores de potência média consumida no microfresamento de GUF e COS AR60 em função do volume removido de cavaco para as duas velocidades de corte estão apresentados na Figura 25, e os sinais de potência com ajuste de *offset* no apêndice D.

Figura 25 - Potência média consumida no microfresamento de COS AR60 com v<sub>c</sub>=62,5 m/min (a) e 125 m/min (b) e de GUF com v<sub>c</sub>=62,5 m/min (c) e 125 m/min (d)



A Figura 25 expõe que, no microfresamento de COS AR60 com  $v_c$ =62,5 m/min, a potência média consumida decresceu a medida que o volume de material removido pela microfresa aumentou, enquanto para a velocidade de corte de 125 m/min, a tendência foi de crescimento. Essa variação obtida de potência durante o microfresamento é um indicativo da diferença de esforços durante o corte visto que a potência é diretamente proporcional à força de corte e à velocidade de corte.

De forma semelhante, o GUF também apresentou uma predominância na redução da potência média consumida com o aumento do volume de material removido para a menor velocidade de corte, enquanto a predominância do crescimento do nível de potência consumida com o aumento do volume de material removido. Tal comportamento pode estar associado aos tipos de desgate apresentados pelas microfresas ao longo do corte, uma vez que há uma

tendência de redução da potência de corte com o aumento do desgaste de cratera, e o aumento da potência de corte com o aumento do desgaste de flanco – uma vez que esses tipos de desgaste requerem do processo esforços de corte distintos.

Em outras palavras, para uma ferramenta nova, toda a energia utilizada no corte é consumida ao longo do plano de cisalhamento (~75%) e ao longo da superfície de saída da ferramenta (~25%), e, à medida que a ferramenta é submetida ao processo de corte, essa energia sofrerá modificações em função do desgaste da microfresa. Nessa perspectiva, o desgaste de cratera irá induzir a curvatura do cavaco que, por sua vez, diminuirá o comprimento do contato entre superfície de saída da ferramenta e cavaco, portanto, resultando em uma diminuição nos esforços de corte. Enquanto o aumento da energia específica é obtido com a redução da área da seção de corte, ocasionado pela formação de desgaste de flanco nas superfícies de folga principal e secundária (SHAW, 2005).

Ainda analisando os níveis de potência de corte apresentado na Figura 25 e os dados apresentados no Apêndice D, pode-se extrair que a média de potência consumida no microfresamento de canais em COS AR60 e GUF diminuiram com o aumento da velocidade de corte em 11,3% e 25,4%, respectivamente. Essa redução da potência está associada de forma intrínseca com os esforços do corte e, por conseguinte, aos tipos de desgaste apresentados, conforme discutido anteriormente. Dessa forma, embora o desgaste de cratera não tenha sido quantificado neste trabalho, uma das formas de se apontar a predominância do tipo de desgaste que ocorre ao longo do microfresamento é a partir do monitoramento da potência de corte.

Outras respostas quanto ao processo de microfresamento podem ser obtidas a partir da análise do sinal de EA. Os sinais no domínio do tempo referentes ao monitoramento da usinagem dos microcanais estão dispostos no Apêndice E, enquanto apresentados em termos do valor médio de amplitude na Figura 26.

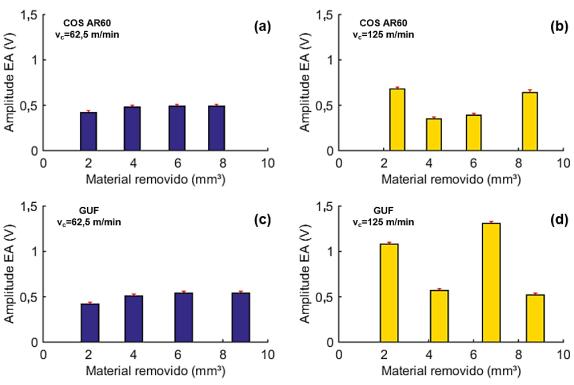


Figura 26 - Amplitude do sinal de EA no microfresamento de COS AR60 (a) com  $v_c=62.5$  m/min (a) e 125 m/min (b) e de GUF com  $v_c=62.5$  m/min (c) e 125 m/min (d)

Fonte - Elaborada pela autora

Com base na Figura 26, percebe-se a presença de dois comportamentos: um crescimento e estabilização da amplitude do sinal de EA com o aumento do volume de material removido para o microfresamento de ambos os materiais na velocidade de corte de 62,5 m/min, correlacionado com o aumento uniforme dos níveis de desgaste de flanco (Figura 23) nas mesmas condições de análise. Uma redução dos níveis de EA, portanto, é característico da presença de desgaste de cratera, uma vez que a remoção do material é facilitada para ângulos mais positivos. Dessa forma, pode-se apontar uma relação direta entre desgaste de flanco e de cratera, e a amplitude do sinal de EA no domínio do tempo.

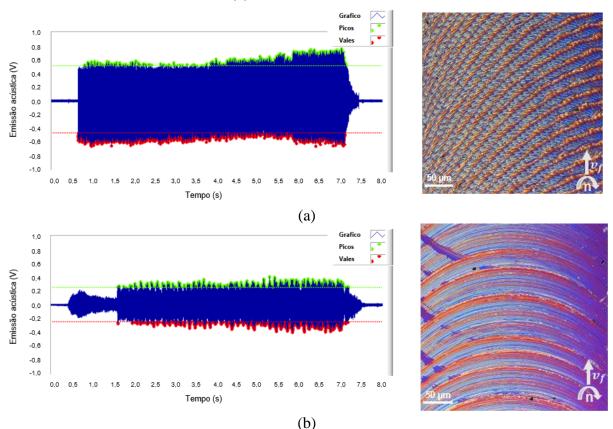
Essa observação também pode ser observada de forma semelhante no estudo realizado por Hung e Lu (2013). O trabalho desenvolvido por esses autores foi baseado na formulação de um modelo para prever os níveis de amplitude do sinal de EA com os de desgaste de flanco no microfresamento, estudando também os espectros de potência do sinal de EA. Os resultados teóricos e experimentais obtidos por Hung e Lu (2013) indicaram que tanto a amplitude do sinal EA no domínio do tempo proveniente do modelo de geração de EA modificado quanto a obtida experimentalmente aumentou em conjunto com o desgaste de flanco da ferramenta durante o

corte. O desgaste de cratera foi obtido mas não foi mensurado nem comparado aos níveis de amplitude dos sinais de EA.

Ainda na Figura 26, nota-se o aumento atípico dos níveis de amplitude de EA para ambos os materiais quando usinados a 125 m/min. Os pontos em questão representam a amplitude do sinal de EA para lc=26 mm e 78 mm no GUF e de 26 mm e 104 mm no COS AR60. Esse o aumento expressivo da amplitude do sinal de EA, e da potência consumida, pode estar estreitamente correlacionado com a ocorrência de um corte instável.

Assim, duas amostras de sinais de EA adquiridos no microfresamento de GUF e COS AR60 com v<sub>c</sub>=125 m/min são apresentadas nas Figura 27 e Figura 28, juntamente com a topografia dos respectivos microcanais, para melhor análise do fenômeno identificado.

Figura 27 - Amplitude do sinal de EA e topografía do microcanal para lc=26 mm (a) e 52 mm (b) no GUF com  $v_c=125$  m/min



Fonte - Elaborada pela autora

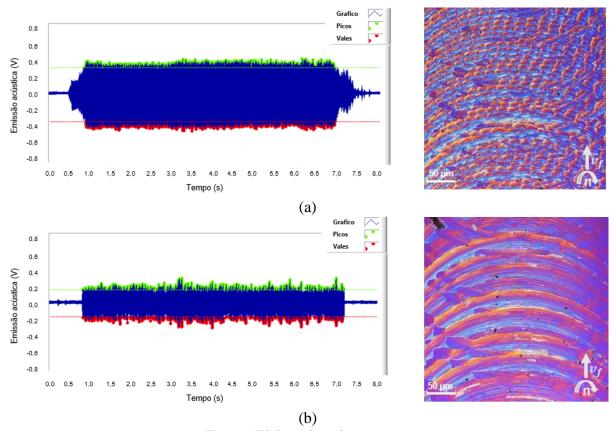


Figura 28 - Amplitude do sinal de EA e topografia do microcanal para lc=26 mm (a) e 52 mm (b) no COS AR60 com  $v_c=125$  m/min

Fonte - Elaborada pela autora

Analisando as Figura 27 e Figura 28 é possível inferir que, na microusinagem de ambos os materiais a 125 m/min, o sinal de EA detectou a ocorrência de *chatter*. Esse fenômeno está diretamente correlacionado com a dinâmica do porta-ferramenta, junto com o acoplamento gerado pela força de corte durante a operação, podendo ser identificado pelo cruzamento das marcas de avanço, pelas altas aplitudes de sinal de EA e pelo espectro de frequências EA (SINGH *et al.*, 2015).

Vale ressaltar que os microcanais que apresentaram *chatter* foram também os que apresentaram maior profundidade de usinagem para os respectivos materiais no microfresamento com  $v_c$ =125 m/min (Tabela 10, Apêndice D). Portanto, a variação entre a profundidade de usinagem programada e real no microfresamento do canal pode ter sido crítica para a variação dos esforços de corte e, por conseguinte, a ocorrência de um corte instável.

Um outro ponto importante a respeito desse fenômeno foi a transição de estabilidade do corte identificada ao longo do microcanal (lc=104 mm) fabricado em COS AR60 com velocidade de corte de 125 m/min, apresentado na Figura 29.

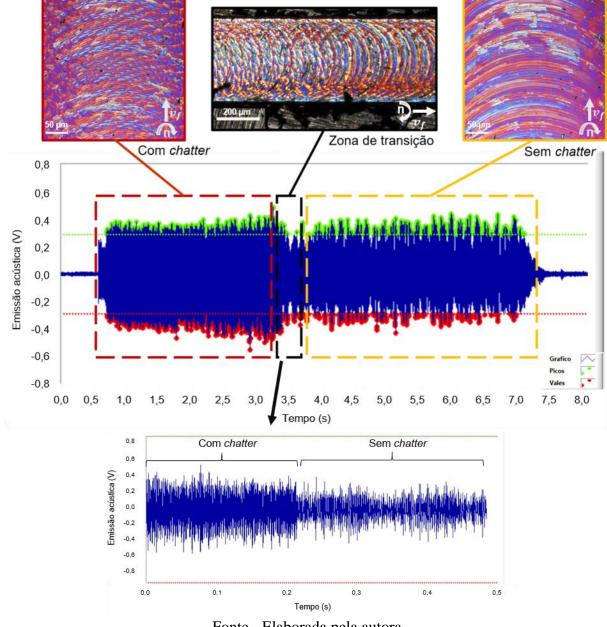


Figura 29 - Sinal de EA do microfresamento de COS AR60 com lc=104 mm e vc=125 m/min

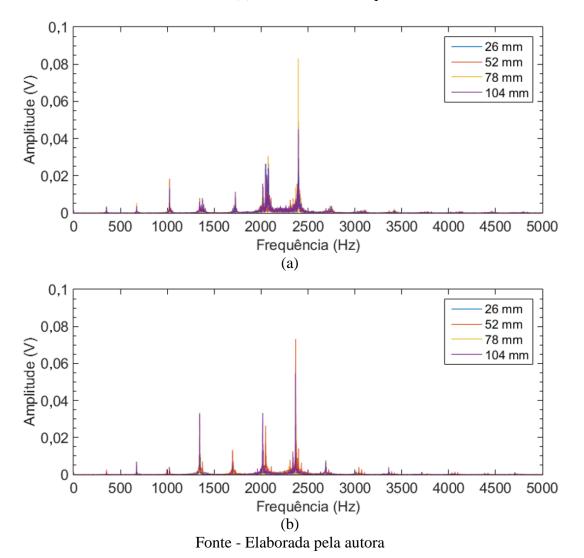
Fonte - Elaborada pela autora

Por ser um fenômeno auto-excitado, a transição de corte instável para corte estável ao longo do microfresamento pode ocorrer, e uma hipótese para justificar essa transição é a nãouniformidade do COS AR60, de forma que ao encontrar grãos com características distintas, o amortecimento do sistema pode aumentar e o corte com chatter passar a ser sem chatter. Também, vale ressaltar que a baixa rigidez de microfresas, em conjunto com as altas rotações do processo de microfresamento, também são fatores que contribuem para a instabilidade dinâmica do corte.

As flutuações dos esforços mecânicos durante o corte quando associados a tais características, podem resultar em acabamento fora das tolerâncias de processo estimadas e a falha catastrófica da ferramenta (QUINTANA; CIURANA, 2011). Portanto, identificar ainda durante o corte a ocorrência de *chatter* é fundamental para a adequar os parâmetros de corte e preservar a integridade da ferramenta.

Para entender melhor esse fenômeno, uma análise da faixa significativa dos sinais de EA no domínio da frequência com respeito ao processo de microfresamento é apresentada nas Figura 30 e Figura 31. Os sinais no domínio da frequência na faixa de resposta linear do sensor (até 15 kHz) encontram-se no Apêndice F.

Figura 30 - Sinais de EA do microfresamento de GUF com v<sub>c</sub>=62,5 m/min (a) e 125 m/min (b) no domínio da frequência



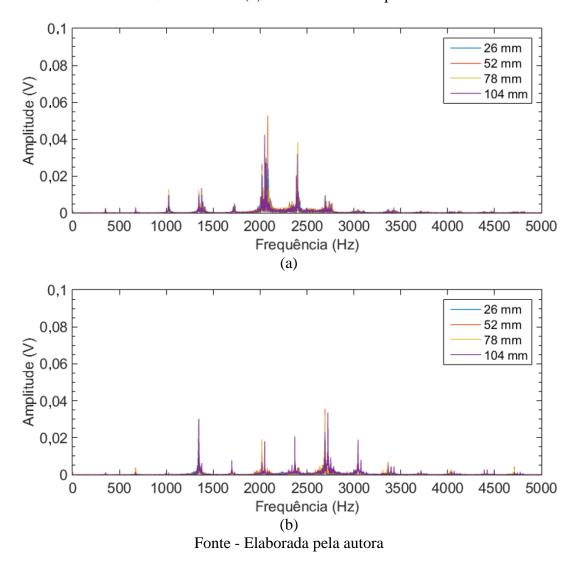
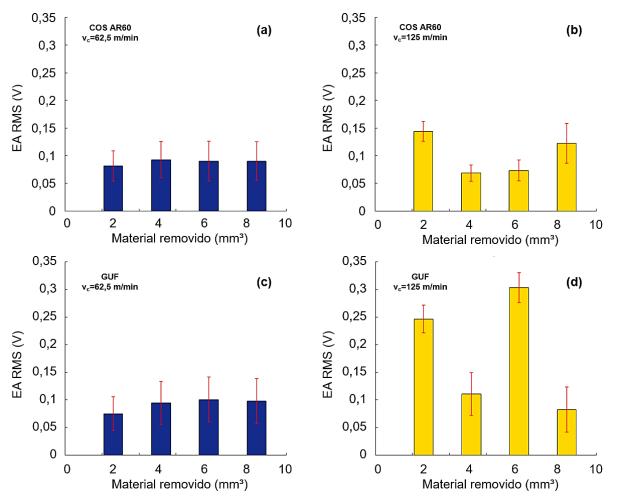


Figura 31 - Sinais de EA do microfresamento de COS AR60 com  $v_c$ =62,5 m/min (a) e  $v_c$ =125 m/min (b) no domínio da frequência

Em ambas as Figura 30 e Figura 31, para a velocidade de corte de 62,5 m/min, pode-se identificar a frequência de excitação do sistema (~353 Hz) e de seus primeiros harmônicos. Para a maior velocidade de corte, além da frequência de excitação do sistema (~672 Hz), o aumento da amplitude do pico referente à frequência de 1344 Hz, é perceptível. Dessa forma, a frequência identificada em 1344 Hz é representativa do *chatter*, reconhecida também nas marcas de *chatter* impressas na topografia dos microcanais (Figura 27a e Figura 28a).

Esse é mais um indício que comprova a ocorrência de *chatter*, visto que a vibração nãolinear do corte instável adiciona frequências ao processo. Esse mesmo comportamento é observado também na Figura 31b para os comprimentos de usinagem de 26 mm e 104 mm, tendo como referência o espectro de frequências do corte com velocidade de corte de 62,5 m/min (Figura 31a). Uma outra forma de analisar sinais de EA, conforme apresentado no item 2.3 deste trabalho, é através de RMS. Os valores de EA RMS do microfresamento de GUF e de COS AR60 estão dispostos na Figura 32.

Figura 32 - EA RMS para o microfresamento de COS AR60 com  $v_c$ =62,5 m/min (a) e  $v_c$ =125 m/min (b) e de GUF com  $v_c$ =62,5 m/min (c) e  $v_c$ =125 m/min (d)



Fonte - Elaborada pela autora

O comportamento das médias RMS do sinal de EA apresenta-se semelhante ao das médias obtidas na análise da amplitude do sinal, porém em menor magnitude, visto que para cada ponto de média RMS foram considerados 1250 pontos do sinal de EA (constante de tempo de 1 ms), e não apenas a diferença entre o valor médio de um conjunto de picos e de vales. A tendência do sinal de EA RMS é semelhante à apresentada pelos sinais de potência, discutidos anteriormente, de forma que para o crescimento de amplitudes de EA RMS pode-se observar predominância de desgaste de flanco, enquanto a redução é um indicativo da predominância do desgaste de cratera. A fundamentação para esse ponto também se baseia na energia dissipada

com o atrito entre a superfície de folga e a peça (aumentando níveis de EA), e a superfície de saída e o cavaco (reduzindo os níveis de EA) (DINIZ; LIU; DORNFELD, 1992).

Para verificar a influência da evolução do sinal de EA RMS com a velocidade de corte foi aplicado o planejamento fatorial 2<sup>k</sup>, com dois fatores e com índice de significância de 10% (devido a uma maior variabilidade do sinal de EA com fatores externos aos ensaios, e.g. temperatura, umidade). O gráfico de efeito obtido está posto na Figura 33.

0,20 0,18 0,16 0,14 0,10 0,08 0,06 0,04 0,02 62,5 125,0 v<sub>c</sub> (m/min)

Figura 33 - Efeito da velocidade de corte no sinal de EA RMS

Fonte - Elaborada pela autora

Com base na Figura 33, é possível apontar que a velocidade de corte possui influência significativa no sinal de EA RMS (P-valor=0,07507 < α=0,10), e por conseguinte, na evolução do desgaste da microfresa. O material da peça não apresentou influência significativa nos níveis de EA RMS. O gráfico de interação e as tabelas ANOVA são apresentados no Apêndice G.

Este trabalho apresentou um estudo acerca do monitoramento da condição da microfresa no microfresamento em termos de desgaste e de estabilidade de corte. A análise dos resultados levantados nos ensaios de microfresamento, em conjunto com a revisão da literatura, levam às seguintes conclusões:

- A análise visual das ferramentas após lc=104 mm apontou a presença de abrasão e adesão, como também a perda de revestimento, lascamentos não uniformes e a presença de desgaste de flanco e de cratera;
- Embora a adesão seja um mecanismo de desgaste governado por baixas velocidades de corte, houve a formação de APC na microusinagem de GUF e de COS AR60 com v<sub>c</sub>=125 m/min, observada através de análises de MEV e EDS da microfresa;
- Tanto a velocidade de corte quanto o material apresentaram significância na influência do desgaste de flanco, que evolui com o aumento de v<sub>c</sub> e redução do tamanho de grão do material – considerando intervalo de confiança de 95%;
- O monitoramento da potência de corte é sensível à evolução dos tipos de desgaste que predominam no corte, de forma que desgaste de flanco predomina quando há o crescimento dos níveis de potência de corte, e desgaste de cratera na sua redução;
- De forma análoga aos resultados obtidos com o monitoramento de potência, o mapeamento dos sinais de EA em termos de amplitude e EA RMS também indicou os tipos de desgaste obtidos, de forma que para maiores amplitudes de sinal, há predominância de desgaste de flanco, enquanto desgaste de cratera para menores amplitudes;
- Os sinais de EA RMS apresentaram sensibilidade ao aumento da rotação e não houve diferença significativa em relação aos materiais do corpo de prova;
- Os sinais de EA são extremamente sensíveis à instabilidade de corte e podem ser utilizados como excelentes indicadores de ocorrência de chatter no microfresamento.

#### 6 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

O monitoramento em operações de microfresamento é essencial para a obtenção da qualidade da usinagem, principalmente diante dos desafios encontrados na determinação do fim de vida da microfresa. Este trabalho buscou contribuir com a instrumentação necessária para o monitoramento da ferramenta durante processos de microusinagem, porém esse é um campo de pesquisa que pode ser melhor explorado.

Os conhecimentos apresentados neste trabalho podem ser ampliados através da continuidade desta pesquisa nos seguintes tópicos:

- Projeto de um tool setter (PAD) em material não polimérico que possua baixa impedância acústica e que não ocasione desgaste considerável à microfresa, para que o sinal RMS de microfresas desgastadas sejam obtidos e comparados à media RMS para a microfresa nova (RMS de calibração). De acordo com o material usinado e as condições de corte, acredita-se ser possível identificar a condição da microfresa ao longo da microusinagem ao usinar o material do PAD esporadicamente e comparar a evolução dos níveis RMS com o RMS de calibração;
- Desenvolver uma metodologia para medição de desgaste de cratera em microfresas;
- Utilizar de recursos de processamento de imagens para identificar e quantificar desgaste em microfresas;
- Monitorar desgaste de microfresas por meio da fusão de sinais de potência e EA no microfresamento de materiais de diferentes ligas;
- Utilizar outras formas de processamento de sinais, e.g. transformada de wavelet, redes neurais artificiais, fuzzy-logic, etc. para tentar identificar padrão no comportamento dos sinais de EA.

ALHADEFF, L. L.; MARSHALL, M. B.; CURTIS, D. T.; SLATTER, T. Protocol for tool wear in micro-milling. **Wear**. v. 420-421, p. 54-67, 2019.

ARAI, R. Contribuições ao microfresamento de superfícies complexas. 2018. 134 f. Tese (Doutorado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2018.

ARAMCHAROEN, A.; MATIVENGA, P. T. Size effect and tool geometry in micromilling of tool steel. **Precision Engineering**, v.33, n.4, p. 402–407, 2009.

ASSIS, C. L. F. **Microfresamento de aços com grãos ultrafinos**. 2013. 101 f. Tese (Doutorado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2013.

ASSIS, C. L. F.; JASINEVICIUS, R. G.; RODRIGUES, A. R. Micro end-milling of channels using ultrafine-grained low-carbon steel. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, v.77, n.5, p.1155-1165, 2015.

BISSACCO, G.; HANSEN, H. N.; De CHIFFRE, L. Micromilling of hardened tool steel for mould making applications. **Journal of Materials Processing Technology**, v.167, n.2–3, p. 201–207, 2005.

BLAU, P. J. (Ed.). **ASM HANDBOOK, Volume 18: Friction, Lubrication, and Wear Technology**. 1<sup>st</sup> ed. Ohio: ASM International, 1992. v.18: Friction, Lubrication, and Wear Technology, Wear, pp. 320-628.

BOOTHROYD, G.; KNIGHT, W. A. **Fundamentals of machining and machine tools**. 2<sup>nd</sup> ed. New York: Marcel Dekker Inc, 1989.

BOSWELL, B.; ISLAM, M. N.; DAVIES, I. J. A review of micro-mechanical cutting. **International Journal of Advanced Manufacturing Technology**. v.94, n.1–4, p. 789–806, 2018.

BRAND, S. **The (Updated) Last Whole Earth**. 1<sup>st</sup> ed. New York: Random House, p. 603. 1974.

BRIGHAM, E. O. **The fast Fourier transform and its applications**. 1<sup>st</sup> ed. New Jersey: Prentice Hall, 1988.

CALLISTER, W. D.; RETHWISH, D. G. **Materials Science and Engineering:** An Introduction. 8<sup>a</sup> ed. Hoboken: John Wiley & Sons, 2009.

CARDOSO, P.; DAVIM, J. P. Micro milling of metallic materials - A brief overview. **Transactions of Famena**. v.36, n.2, p. 79–85, 2012.

CHAE, J.; PARK, S. S.; FREIHEIT, T. Investigation of micro-cutting operations. **International Journal of Machine Tools and Manufacture**. v.46, n.3–4, p. 313–332, 2006.

CHENG, K.; HUO, D. (Eds) **Micro-Cutting:** Fundamentals and Applications, West Sussex: John Wiley & Sons, 2013.

COSIPA Companhia Siderúrgica Paulista. **Certificado de qualidade nº 472990.** Ferro e Aço Nossa Sra de Fátima Ltda. Nota Fiscal nº 44086. Emissão: 10 fev. 2005.

DINIZ, A. E.; LIU, J. J.; DORNFELD, D. A. Correlating tool life, tool wear and surface roughness by monitoring acoustic emission in finish turning. **Wear**. v. 152, p. 395-407, 1992.

DHULUBULU, A. S. Acoustic Emission (AE) monitoring of the milling process with coated metal carbide inserts using TRIM C270 cutting fluid. 2015. 110 f. Dissertação (Mestrado) – The University of Toledo, Toledo, 2011.

DOW, T. A.; MILLER, E. L.; GARRARD, K. Tool force and deflection compensation for small milling tools. **Precision Engineering**. v.28, n.1, p. 31–45, 2004.

GAUTSCHI, G. Acoustic Emission Sensors. In: **Piezoelectric Sensorics**. Berlim: Springer, 2002. p. 271.

GRIFFIN, J. M.; DIAZ, F.; GEERLING, E.; CLASING, M.; PONCE, V.; TAYLOR, C.; TURNER, S.; MICHAEL, E. A.; MENA, F. P.; BRONFMAN, L. Control of deviations and prediction of surface roughness from micro machining of THz waveguides using acoustic emission signals. **Mechanical Systems and Signal Processing**. v.85, p. 1020–1034, 2017.

HUNG, C.; LU, M. Model development for tool wear effect on AE signal generation in micromilling. **International Journal of Machine Tools and Manufacture**. v.66, p. 1845–1858, 2013.

INASAKI, I. Application of Acoustic Emission Sensor Machining Processes. **Ultrasonics**. v.36, p. 273–281, 1998.

INTERNATIONAL STANDARD. **ISO 8688-1:** Tool life testing in milling – Part 1: face milling. Geneva, 1989.

JEMIELNIAK, K.; ARRAZOLA, P. J. Application of AE and cutting force signals in tool condition monitoring in micro-milling. **CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology**. v.1, n.2, p. 97–102, 2008.

KANNATEY-ASIBU, E.; DORNFELD, D. A. A study of tool wear using statistical analysis of metal-cutting acoustic emission. **Wear**. v.76, n.2, p. 247–261, 1982.

- KOMATSU, T. YOSHINO, T.; MATSUMURA, T.; TORIZUKA, S. Effect of crystal grain size in stainless steel on cutting process in micromilling. **Procedia CIRP**. v.1, n.1, p. 150–155, 2012.
- KÖNIG, W.; KUTZNER, K.; SCHEHL, U. Tool monitoring of small drills with acoustic emission. **International Journal of Machine Tools and Manufacture**. v.32, n.4, p. 487–493, 1992.
- KOVVURI, V. R. **Experimental study of built-up-edge formation in micro milling**. 2015. 131 p. Dissertação (Mestrado) Texas A&M University, Texas, 2015.
- KUMAR, A. S.; DURAI, A. R.; SORNAKUMAR, T. Wear behaviour of alumina based ceramic cutting tools on machining steels. **Tribology International**. v.39, n.3, p. 191–197, 2006.
- LEE, D. E.; DeVOR, R. E.; KAPOOR, S. G.; EHMANN, K. F. Precision Manufacturing Process Monitoring with Acoustic Emission. In WANG, L.; GAO, R. X. (Eds) **Condition Monitoring and Control for Intelligent Manufacturing**. Londres: Springer, 2005. p. 33–54.
- LIU, X.; DeVOR, R. E.; KAPOOR, S. G.; EHMANN, K. F. The Mechanics of Machining at the Microscale: Assessment of the Current State of the Science. **Journal of Manufacturing Science and Engineering**. v.126, n.4, p. 666–678, 2004.
- LU, M. C.; WAN, B. S. Study of high-frequency sound signals for tool wear monitoring in micromilling. **International Journal of Advanced Manufacturing Technology**. v.66, n.9–12, p. 1785–1792, 2013.
- MACHADO, A. R.; ABRÃO, A. M.; COELHO, R. T.; SILVA, M. B. **Teoria da usinagem dos materiais.** 1<sup>st</sup> ed. São Paulo: Editora Blucher, 2009.
- MAIA, L.H. A.; ABRÃO, A. M.; VASCONCELOS, L. W.; SALES, W. F.; MACHADO, A. R. A new approach for detection of wear mechanisms and determination of tool life in turning using acoustic emission. **Tribology International**. v 92, p. 519-532, 2015.
- MALEKIAN, M.; PARK, S. S.; JUN, M. B. G. Tool wear monitoring of micro-milling operations. **Journal of Materials Processing Technology**. v.209, n.10, p. 4903–4914, 2009.
- MARSCHALL, K.; GAUTSCHI, G. H. In-process monitoring with piezoelectric sensors. **Journal of Materials Processing Tech**. v.44, n.3–4, p. 345–352, 1994.
- McINTIRE, P.; MILLER, R. K. (Eds.). **Nondestructive Testing Handbook**. 2<sup>nd</sup> ed. Columbus: ASNT, 1987. v.5: Acoustic Emission Testing, 603 p.
- \_\_\_\_\_. **Nondestructive Testing Handbook**. 2nd ed. Columbus: ASNT, 1987. v.5: Section 1, pp. 11 44.

- MIAN, A. J.; DRIVER, N.; MATIVENGA, P. T. Identification of factors that dominate size effect in micro-machining. **International Journal of Machine Tools and Manufacture**. v.51, n.5, p. 383–394, 2011.
- NAZARCHUK, Z.; SKALSKYI, V.; SERHIYENKO, O. (Eds). **Acoustic Emission: Methodology and Application**. Cham: Springer Nature, 2017.
- NILSSON, J. W.; RIEDEL, S. A. **Circuitos Eletricos**. 8<sup>th</sup> ed. São Paulo: Pearson Prentice Hall, 2009.
- NORCINO, A. B. Estudo do desgaste da ferramenta no microfresamento de topo de aços com grãos ultrafinos. 2018. 53 f. Tese (Doutorado) Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2018.
- OLIVEIRA, F. B.; RODRIGUES, A. R.; COELHO, R. T.; SOUZA, A. F. Size effect and minimum chip thickness in micromilling. **International Journal of Machine Tools and Manufacture**. v.89, p. 39–54, 2015.
- PRAKASH, J. R. S.; KUMAR, A. S.; RAHMAN, M.; LIM, S.C. A model for predicting tool life for coated micro end mill. **Proceedings Fourth International Machining and Grinding.** Michigan, 2001. p. 149-158.
- PRAKASH, M.; KANTHABABU, M. In-process tool condition monitoring using acoustic emission sensor in microendmilling. **Machining Science and Technology**. v.17, n.2, p. 209–227, 2013.
- QUINTANA, G.; CIURANA, J. Chatter in machining processes: A review. **International Journal of Machine Tools and Manufacture.** v. 51, n.5, p. 363-376, 2011.
- RAHMAN, M.; KUMAR, A. S.; PRAKASH, J. R. S. Micro milling of pure copper. **Journal of Materials Processing Technology**. v.116, n.1, p. 39–43, 2001.
- RAVINDRA, H. V.; SRINIVASA, Y. G.; KRISHNAMURTHY, R. Acoustic emission for tool condition monitoring in metal cutting. **Wear**. v.21, n.21, p. 78–84, 1997.
- RODRIGUES, A. R.; JASINEVICIUS, R. G. Machining scale: workpiece grain size and surface integrity in micro end milling. In: DAVIM. J. P (Ed). **Microfabrication and Precision Engineering**: Research and Development. Cambridge: Woodhead Publishing, 2017. Chap. 2, p. 27-68.
- SANTOS, A. G. Microfresamento de aço inoxidável duplex UNS S32205 com ferramentas de metal duro revestidas com nitreto de titânio. 2016. 92 f. Dissertação (Mestrado) Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2016.
- SANTOS, A. G.; SILVA, M. B.; JACKSON, M. J. Tungsten carbide micro-tool wear when micro milling UNS S32205 duplex stainless steel. **Wear**. v. 414-415, p. 109-117, 2018.

SENSIS. Monitor de Processos DM-42: 4 entradas, 2 níveis de comparação. São Carlos, 2000.

SHAW, M. C. **Metal Cutting Principles**. 2<sup>nd</sup> ed. New York: Oxford University Press, 2005.

SINGH, K. K.; SINGH, R.; KARTIK, V. Comparative study of chatter detection methods for high-speed micromilling of Ti6Al4V. **Procedia Manufacturing: 43rd Proceedings of the North American Manufacturing Research Institution of SME**. v.1, p. 593-606, 2015.

TANSEL, I.; RODRIGUEZ, O; TRUJILLO, M.; PAZ, E.; LI, W. Micro-end-milling - I. Wear and breakage. **International Journal of Machine Tools and Manufacture.** v.38, n.2, p. 1419–1436, 1998.

TRENT, E. M. **Metal Cutting**. 2<sup>nd</sup> ed. London: Butterworths & Co Ltd, 1984.

VALENTE, C. M. O. Implementação de sistema para eliminação automática de rebarbas resultantes de processos de usinagem. 2003. 287 f. Tese (Doutorado) — Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2003.

WANG, Z.; KOVVURI, V.; ARAUJO, A.; BACCI, M.; HUNG, W. N. P.; BUKKAPATNAM, S. T. S. Built-up-edge effects on surface deterioration in micromilling processes. **Journal of Manufacturing Processes**. v. 25, p. 321-327, 2016.

WEBSTER, J; DONG, W. P.; LINDSAY, R. Raw Acoustic Emission Signal Analysis of Grinding Process. **CIRP Annals**. v. 45, n. 1, p. 335-34, 1996.

WEULE, H.; HUNTRUPL, V.; TRITSCHLERL, H. Steel to Meet New Requirements in Miniaturization. **CIRP Annals**. v.50, n.1, p. 61–64, 2001.

ZENG, Y.; FORSSBERG, E. Application of vibration signal measurement for monitoring grinding parameters. **Mechanical Systems and Signal Processing**. v.8, n.6, p.703-713, 1994.

## APÊNDICE A – DESENVOLVIMENTO DE PROGRAMAS EM LABVIEW®

O LabVIEW<sup>®</sup> é uma plataforma de programação gráfica (linguagem G), baseada em fluxo de dados, que pode ser utilizada para aquisição, tratamento e apresentação de dados. Um *Virtual Instrument* (VI) foi desenvolvido em LabVIEW<sup>®</sup> 2013 para a aquisição múltipla de sinais de EA, potência e rotação nas respectivas taxas de amostragem pré-definidas. A programação utiliza dois ambientes: o painel frontal e o diagrama de blocos. O painel frontal (Figura 34a) é a parte do programa de interface com o usuário, enquanto o diagrama de blocos (Figura 34b) é a que se destina à programação, i.e. estabelecimento de fluxo de dados, operações e relações lógicas.

A programação desenvolvida para aquisição de dados foi fundamentada em um laço de repetição *while*, que recebe valores pré-definidos no programa (*buffer* para aquisição contínua) das placas de aquisição e os armazena em um arquivo de texto a cada iteração até que a condição de parada seja acionada (botão "FIM DE AQUISIÇÃO" acionado). No programa desenvolvido, o VI recebe dados de duas placas de aquisição, sendo uma dedicada aos sinais de potência e rotação, adquirindo cada um dos sinais à taxa de 5 kHz, e a outra aos sinais de EA, adquiridos na taxa de 1,25 MHz. Essa configuração foi definida diante da limitação da taxa de aquisição de cada placa. Por meio de funções matemáticas, os valores de calibração para o sinal de potência (16.667 W/V) e de rotação (10.000 rpm/V) foram adicionados aos valores de tensão adquiridos. Os arquivos gerados possuem extensão \*lvm.

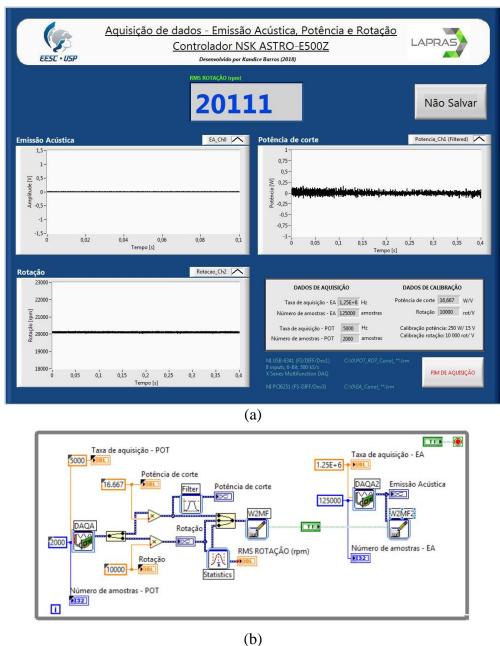


Figura 34 - Painel frontal (a) e diagrama de blocos (b) do VI desenvolvido para aquisição dos sinais de EA, potência e rotação

Fonte - Elaborada pela autora

O processamento de sinais de potência e EA contou com a utilização do software LabVIEW® *Home and Student Edition* v. 2018. Para a análise dos sinais de potência, um VI foi desenvolvido para realizar a leitura do sinal em arquivo de texto, exposição dos dados em um gráfico de potência em função de cada ponto aquisitado, para em seguida delimitar a região de análise e realizar a análise dos dados em questão. O painel frontal e diagrama de blocos do VI são apresentados nas Figura 35a e Figura 35b, respectivamente.

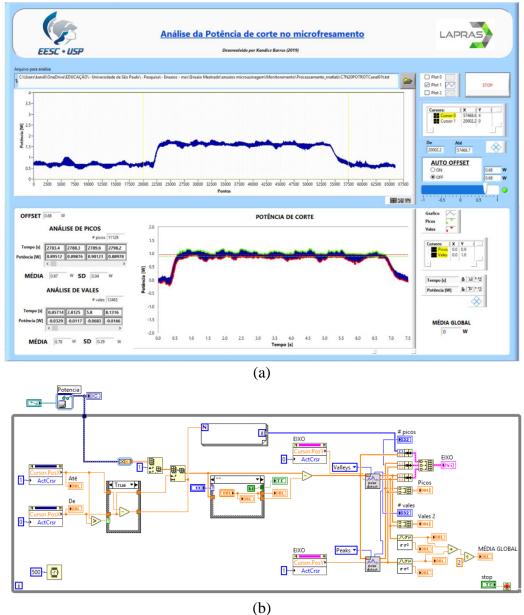


Figura 35 - Painel frontal (a) e diagrama de blocos (b) do VI desenvolvido para análise do sinal de potência

Fonte - Elaborada pela autora

Para delimitar a região de análise, foram criados dois cursores e efetivado o *link* do gráfico com os dados de posição no vetor de pontos através de *property nodes*. Os pontos delimitados pelo intervalo entre os dois cursores formam um segundo gráfico, no qual foi adicionado a identificação de picos e vales. Neste ponto, dois cursores delimitam as regiões de picos e vales, identificando os picos acima da linha de pico e os vales abaixo da linha de vale por pontos vermelhos e verde, respectivamente.

O VI também permite o ajuste de *offset* de forma automática ou manual, função que foi programada tendo em vista a análise dos sinais de potência. Esses sinais possuem dois

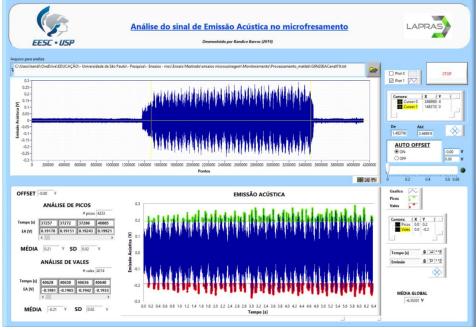
patamares característicos: um primeiro corresponde à potência de inércia do motor, e um segundo que equivale à potência utlizada no momento do corte, no qual há o contato efetivo da ferramenta com o corpo de prova.

Assim, para a análise de cada arquivo, foi realizado o seguinte procedimento:

- 1. Informar a localização do arquivo e iniciar o programa;
- 2. Delimitar a região de análise por meio dos cursores do primeiro gráfico;
- 3. Utilizar o ajuste de offset automático para identificar o nível de potência do 1º patamar;
- 4. Utilizar o ajuste de offset manual, informando o valor obtido no item "c" como referência para o nível de potência do 2º patamar;
- 5. Redefinir a região de análise para o intervalo de corte;
- 6. Utilizar as linhas de pico e vale para definir os picos e vales de análise;
- 7. Obter o valor de média global de picos e vales, definida como sendo a linha média entre a média dos picos e vales da região de análise.

O conceito utilizado na elaboração do VI para análise dos sinais de potência foi extrapolado e utilizado para análise dos sinais de EA (Figura 36). Para os sinais de EA, diferentemente da análise realizada no sinal de potência, não houve a necessidade de utilização do ajuste de offset, e os pontos de análise foram determinados em, aproximadamente, 4000 picos e 4000 vales dentro da região do sinal referente ao microcorte. A média dos valores de pico e a média dos valores de vale foi utilizada para a definição da amplitude do sinal.

Figura 36 - Painel frontal do VI desenvolvido para análise da amplitude do sinal de EA



Fonte - Elaborada pela autora

### APÊNDICE B – IMAGENS DAS MICROFRESAS PRÉ-ENSAIO

Para o auxílio na identificação das condições de ensaio para cada ferramenta utilizada, a nomenclatura descrita na Tabela 7 foi adotada.

Tabela 7 - Nomenclatura utilizada para a identificação das microfresas e condições de ensaio

Nomenclatura da ferramenta	Ferramenta	Material	Velocidade de corte (m/min)
<b>E1</b>	MS2MSD0100	GUF	62,5
<b>E2</b>	MS2MSD0100	GUF	125
<b>E3</b>	MS2MSD0100	COS AR60	62,5
E4	MS2MSD0100	COS AR60	125

Figura 37 - Vista de topo (a), da aresta 1 (b) e da aresta 2 (c) da ferramenta E1

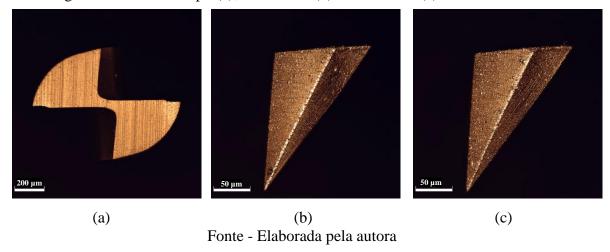


Figura 38 - Vista de topo (a), da aresta 1 (b) e da aresta 2 (c) da ferramenta E2

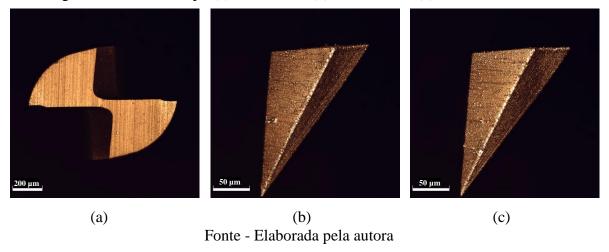


Figura 39 - Vista de topo (a), da aresta 1 (b) e da aresta 2 (c) da ferramenta E3

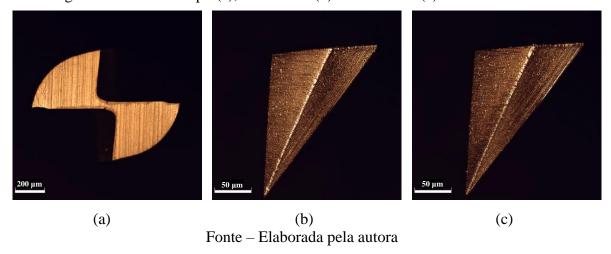
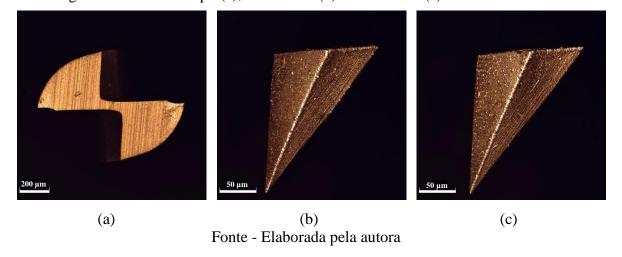


Figura 40 - Vista de topo (a), da aresta 1 (b) e da aresta 2 (c) da ferramenta E4



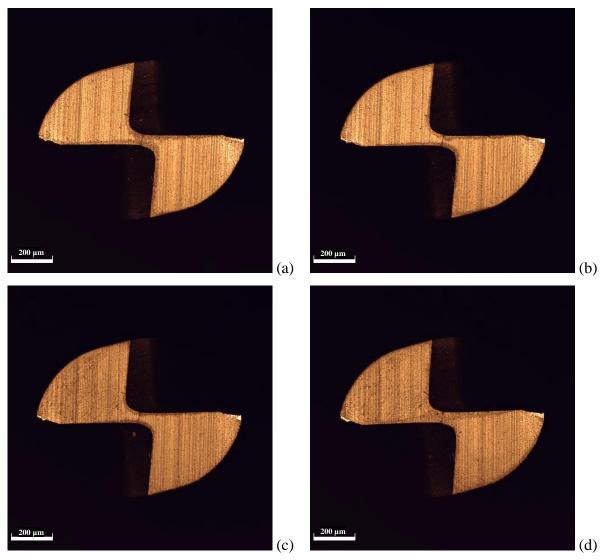
# APÊNDICE C – IMAGENS DA EVOLUÇÃO DO DESGASTE DE FLANCO E DE CRATERA NAS MICROFRESAS

Para o auxílio na identificação dos valores de desgaste de flanco máximo obtido em cada ferramenta, foram considerados os valores medidos e apresentados na Tabela 9. Enquanto o desgaste de cratera não foi medido haja vista a perda de referência da superfície de saída ao longo do corte.

Tabela 9 - Valores medidos para desgaste de flanco máximo das microfresas em cada condição de ensaio

Material	v <sub>c</sub> (m/min)	lc (mm)	VB Aresta 1 (μm)	VB Aresta 2 (μm)
		26	25,960	25,417
	62.5	52	26,519	26,038
	62,5	78	29,396	29,616
GUF -		104	34,852	33,388
GUF		26	17,844	18,728
	125	52	25,960 26,519 29,396 <b>34,852</b>	28,740
	123	78	46,799	51,650
		104	72,907	28,740 51,650 67,899 14,950
		26	16,198	14,950
	62,5	52	26,704	20,789
	02,3	78	34,698	31,505
COS AR60		104	44,280	42,217
COS AROU		26	21,001	16,694
	125	52	25,880	23,738
	123	78	35,140	31,827
		104	45,551	41,596

Figura 41 - Vista de topo da ferramenta para lc=26 mm (a), 52 mm (b), 78 mm (c) e 104 mm (d) no microfresamento de GUF com  $v_c$ =62,5 m/min



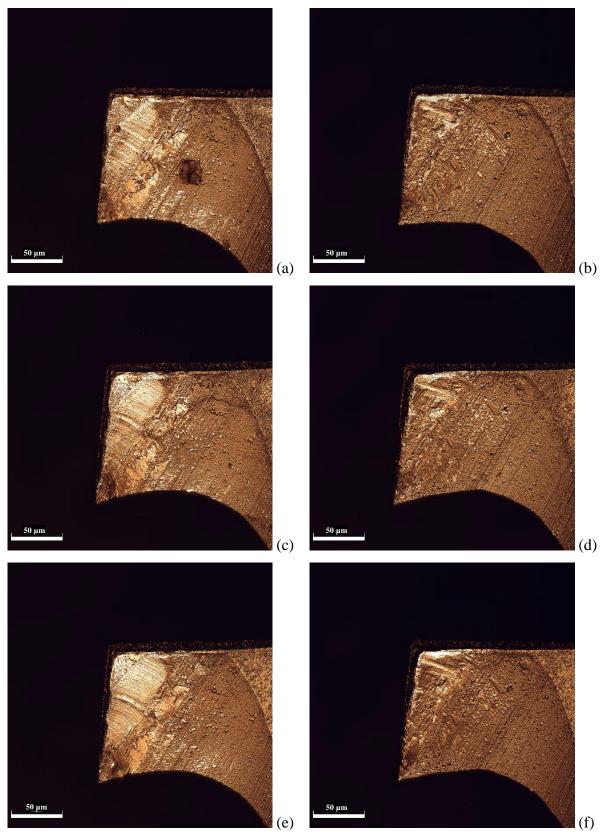
Fonte - Elaborada pela autora

(a) (b) (c) (d) (e)

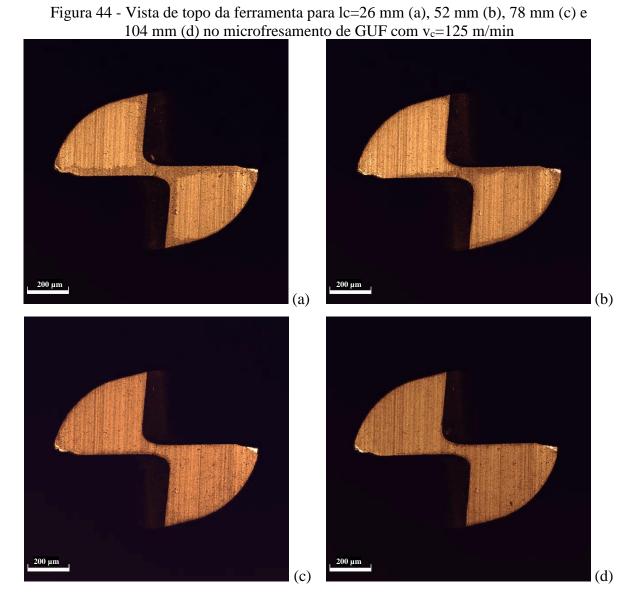
Figura 42 - Superfície de folga da aresta 1 e da aresta 2 para lc=26 mm (a, b), 52 mm (c, d), 78 mm (e, f) no microfresamento de GUF com  $v_c$ =62,5 m/min

Fonte - Elaborada pela autora

Figura 43 - Superfície de saída da aresta 1 (esquerda) e da aresta 2 (direita) para lc=26~mm (a, b), 52 mm (c, d), 78 mm (e, f) no microfresamento de GUF com  $v_c=62.5~m/min$ 

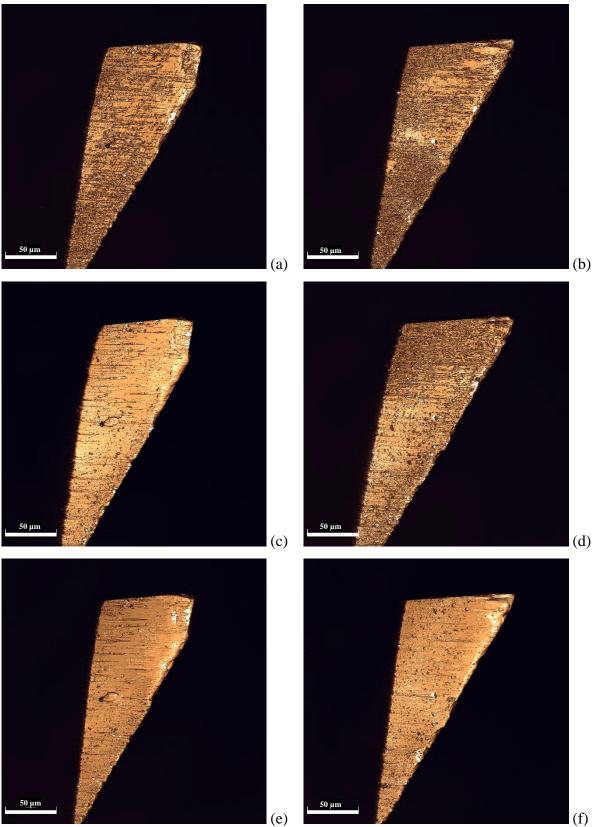


Fonte - Elaborada pela autora



Fonte - Elaborada pela autora

Figura 45 - Superfície de folga da aresta 1 e da aresta 2 para lc=26 mm (a, b), 52 mm (c, d), 78 mm (e, f) no microfresamento de GUF com  $v_c$ =125 m/min



Fonte - Elaborada pela autora

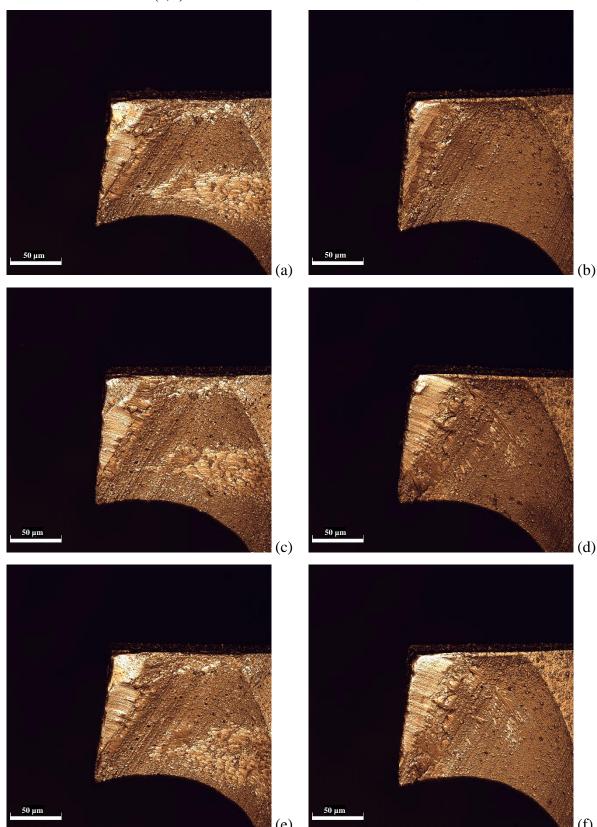
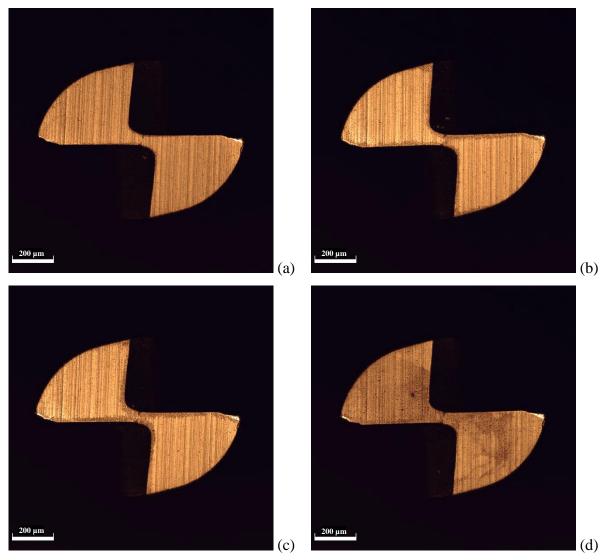


Figura 46 - Superfície de saída da aresta 1 e da aresta 2 para lc=26 mm (a, b), 52 mm (c, d), 78 mm (e, f) no microfresamento de GUF com  $v_c$ =125 m/min

Fonte - Elaborada pela autora

Figura 47 - Vista de topo da ferramenta para lc=26 mm (a), 52 mm (b), 78 mm (c) e 104 mm (d) no microfresamento de COS AR60 com  $v_c=62,5$  m/min



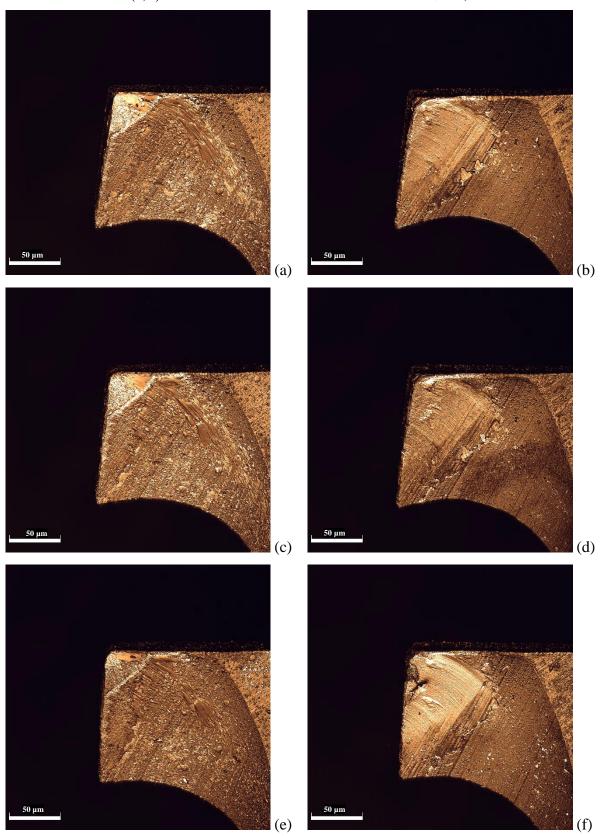
Fonte - Elaborada pela autora

(a) (b) (d) (c) (e)

Figura 48 - Superfície de folga da aresta 1 e da aresta 2 para lc=26 mm (a, b), 52 mm (c, d), 78 mm (e, f) no microfresamento de COS AR60 com  $v_c$ =62,5 m/min

Fonte - Elaborada pela autora

Figura 49 - Superfície de saída da aresta 1 e da aresta 2 para lc=26 mm (a, b), 52 mm (c, d), 78 mm (e, f) no microfresamento de COS AR60 com  $v_c=62,5$  m/min



Fonte - Elaborada pela autora

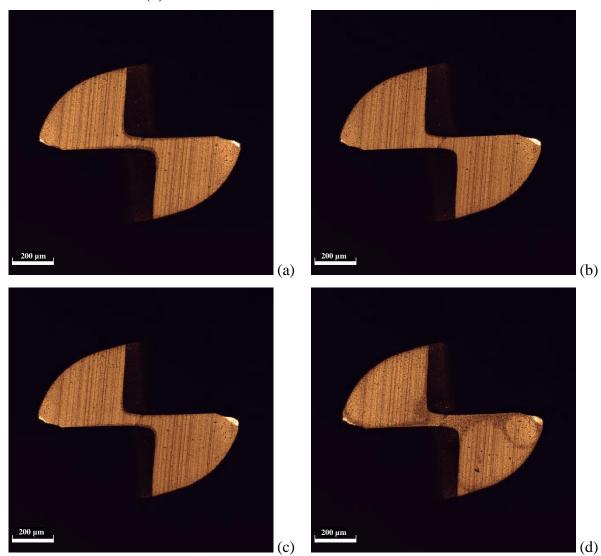
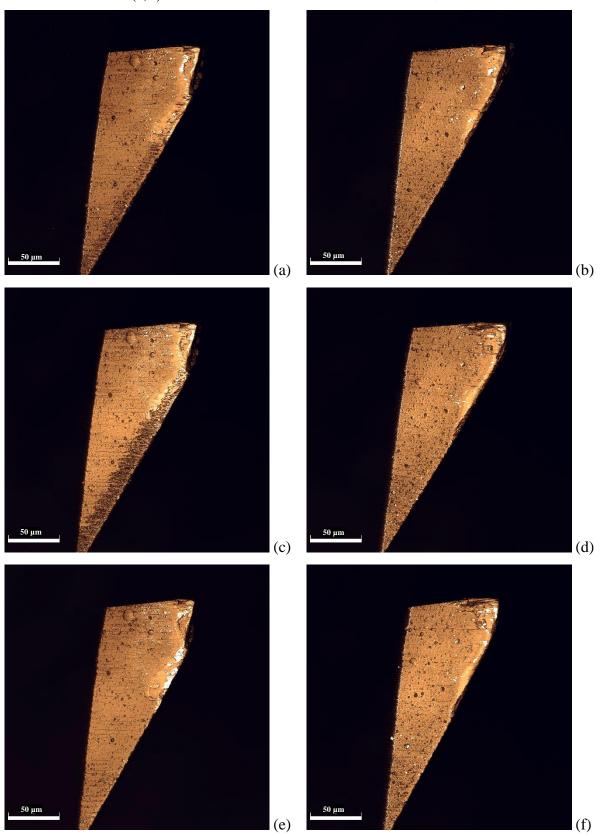


Figura 50 - Vista de topo da ferramenta para lc=26 mm (a), 52 mm (b), 78 mm (c) e 104 mm (d) no microfresamento de COS AR60 com  $v_c=125$  m/min

Fonte - Elaborada pela autora

Figura 51 - Superfície de folga da aresta 1 e da aresta 2 para lc=26 mm (a, b), 52 mm (c, d), 78 mm (e, f) no microfresamento de COS AR60 com  $v_c=125$  m/min



Fonte - Elaborada pela autora

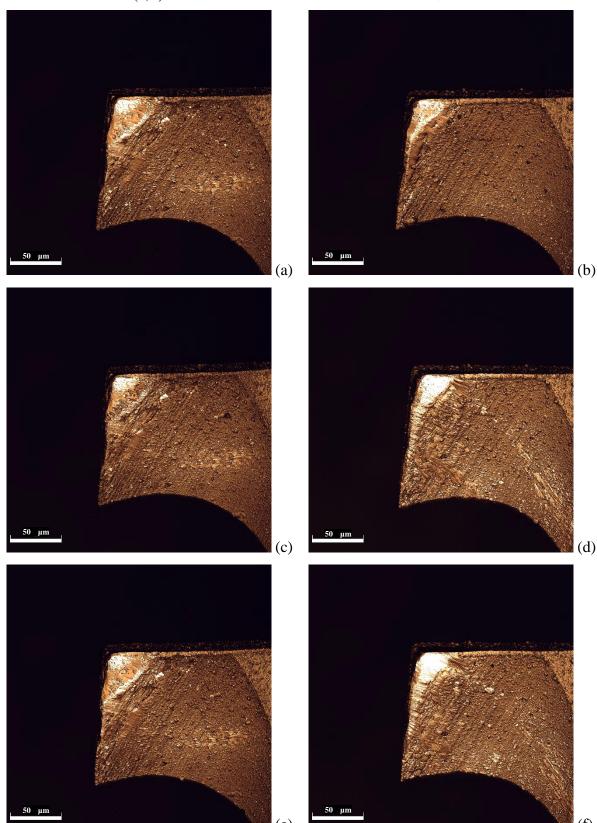


Figura 52 - Superfície de saída da aresta 1 e da aresta 2 para lc=26 mm (a, b), 52 mm (c, d), 78 mm (e, f) no microfresamento de COS AR60 com  $v_c$ =125 m/min

Fonte - Elaborada pela autora

#### APÊNDICE D – SINAIS DE POTÊNCIA COM AJUSTE DE *OFFSET*

A potência média consumida nos ensaios de microfresamento é apresentada na Tabela 9.

Tabela 9 - Potência média consumida nos ensaios de microfresamento

		Potência média consumida (W)			
Material	$v_c$ (m/min)	lc=26 mm	lc=52 mm	lc=78 mm	lc=104 mm
GUF	62,5	9,58	11,32	10,85	10,04
	125	6,65	7,58	9,05	7,90
COS AR60	62,5	9,36	8,68	8,11	6,92
	125	5,33	7,62	8,63	7,76

Fonte - Elaborada pela autora

Devido à variação de temperatura ao longo dos ensaios, e sua influência sobre o deslocamento real e o programado da máquina-ferramenta, os dados de  $a_p$  e  $a_e$  medidos a posteriori (Tabela 10) foram utilizados no cálculo do volume de material removido.

Tabela 10 - Parâmetros de usinagem reais dos ensaios de microfresamento

Material	( l •)	Parâmetros (µm)	Comprimento de usinagem (mm)			
	v <sub>c</sub> (m/min)		26	52	<b>78</b>	104
	62.5	$\mathbf{a}_{\mathbf{p}}$	79,176	74,378	84,166	96,294
GUF	62,5	$\mathbf{a}_{\mathbf{e}}$	1016,653	1009,115	1011,725	1016,579
GUr –	125	$\mathbf{a}_{\mathbf{p}}$	86,236	86,365	87,757	75,631
	123	$\mathbf{a}_{\mathbf{e}}$	1002,405	992,558	1014,382	996,864
COS AR60 62,5	62.5	$\mathbf{a}_{\mathbf{p}}$	78,241	74,809	76,004	67,377
	02,3	$\mathbf{a}_{\mathbf{e}}$	995,36	999,102	1007,838	1005,723
	125	$\mathbf{a}_{\mathbf{p}}$	101,114	63,343	68,999	97,085
	125	$\mathbf{a}_{\mathbf{e}}$	991,74	991,662	985,465	992,253

14.0 12.0 10.0 8.0 Potência (W) 6.0 4.0 2.0 0.0 -2.0 0.0 4.0 4.5 Tempo (s) (a) 14.0 12.0 10.0 Potência (W) 6.0 4.0 2.0 0.0 -2.0 -4.0 1.0 4.0 0.0 4.5 7.0 8.0 Tempo (s) (b) 14.0 12.0 Potência (W) 6.0 2.0 0.0 -2.0 -4.0 4.0 Tempo (s) (c) 12.0 10.0 Potência (W) 6.0 4.0 2.0 0.0 -2.0 -4.0 4.0 4.5 Tempo (s) 0.0 1.0 1.5 2.0 5.0 7.0 7.5 8.0 (d)

Figura 53 - Sinal de potência do microfresamento de GUF com  $v_c$ =62,5 m/min e lc=26 mm (a), 52 mm (b), 78 mm (c) e 104 mm (d)

12.0 10.0 Potência (W) 6.0 4.0 2.0 0.0 -2.0 Tempo (s) (a) 14.0 12.0 10.0 8.0 Potência (W) 6.0 4.0 2.0 -2.0 -4.0 0.0 1.0 4.0 4.5 Tempo (s) (b) 14.0 12.0 10.0 Potência (W) 6.0 4.0 0.0 -2.0 -4.0 4.0 4.5 Tempo (s) (c) 12.0 10.0 8.0 Potência (W) 6.0 2.0 0.0 -2.0 -4.0 0.0 1.0 4.0 4.5 3.0 7.0 7.5 Tempo (s) (d) Fonte - Elaborada pela autora

Figura 54 - Sinal de potência do microfresamento de GUF com  $v_c$ =125 m/min e lc=26 mm (a), 52 mm (b), 78 mm (c) e 104 mm (d)

14.0 12.0 10.0 8.0 Potência (W) 6.0 4.0 2.0 0.0 -2.0 0.0 4.0 4.5 Tempo (s) (a) 14.0 12.0 10.0 8.0 Potência (W) 6.0 4.0 2.0 0.0 -2.0 -4.0 4.0 8.0 0.0 4.5 Tempo (s) (b) 14.0 12.0 10.0 8.0 Potência (W) 6.0 4.0 2.0 0.0 -2.0 -4.0 4.0 Tempo (s) (c) 12.0 10.0 8.0 Potência (W) 6.0 4.0 2.0

Figura 55 - Sinal de potência do microfresamento de COS AR60 com  $v_c$ =62,5 m/min e lc=26 mm (a), 52 mm (b), 78 mm (c) e 104 mm (d)

(d) Fonte - Elaborada pela autora

4.0 4.5 5.0

Tempo (s)

6.0

7.0

8.0

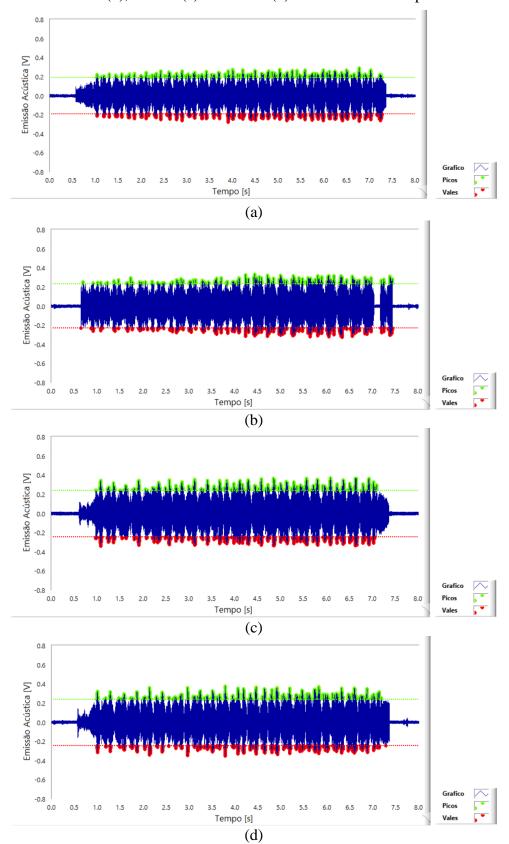
-2.0 -4.0 0.0 0.5 1.0 1.5

14.0 12.0 10.0 8.0 Potência (W) 6.0 4.0 0.0 -2.0 0.0 1.0 1.5 4.0 4.5 Tempo (s) (a) 14.0 12.0 10.0 8.0 Potência (W) 6.0 4.0 2.0 0.0 -2.0 -4.0 4.0 4.5 Tempo (s) 0.0 (b) 14.0 12.0 10.0 Potência (W) 6.0 4.0 2.0 0.0 -2.0 -4.0 0.0 2.0 3.0 4.0 4.5 7.0 7.5 8.0 Tempo (s) (c) 14.0 12.0 10.0 8.0 Potência (W) 6.0 4.0 2.0 -2.0 -4.0 0.0 1.0 1.5 3.0 4.0 4.5 5.0 6.0 6.5 7.0 7.5 8.0 Tempo (s) (d)

Figura 56 - Sinal de potência do microfresamento de COS AR60 com  $v_c$ =125 m/min e lc=26 mm (a), 52 mm (b), 78 mm (c) e 104 mm (d)

## APÊNDICE E – SINAIS DE EA NO DOMÍNIO DO TEMPO

Figura 57 - Sinal de EA no microfresamento de GUF para  $v_c$ =62,5 m/min e lc=26 mm (a), 52 mm (b), 78 mm (c) e 104 mm (d) no domínio do tempo

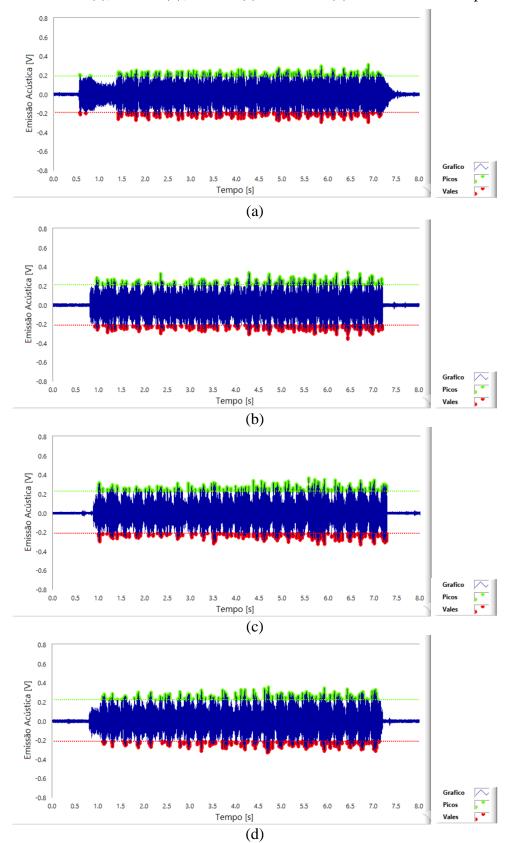


Fonte - Elaborada pela autora

1.0 8.0 0.6 Emissão Acústica [V] 0.4 0.0 -0.2 -0.4 -0.6 -0.8 -1.0 0.0 4.0 Tempo [s] (a) 1.0 0.8 0.6 Emissão Acústica [V] 0.4 0.2 0.0 -0.2 -0.4 -0.6 -0.8 -1.0 3.5 4.0 4.5 7.5 8.0 Tempo [s] (b) 1.0 0.8 0.6 Emissão Acústica [V] 0.4 0.2 0.0 -0.2 -0.4 -0.6 -0.8 4.0 7.5 0.0 4.5 6.0 8.0 Tempo [s] (c) 1.0 0.8 0.6 Emissão Acústica [V] 0.4 0.2 0.0 -0.2 -0.4 -0.6 -0.8 1.0 4.0 4.5 7.0 7.5 8.0 Tempo [s] (d)

Figura 58 - Sinal de EA no microfresamento de GUF para  $v_c$ =125 m/min e lc=26 mm (a), 52 mm (b), 78 mm (c) e 104 mm (d) no domínio do tempo

Figura 59 - Sinal de EA no microfresamento de COS AR60 para  $v_c$ =62,5 m/min e lc=26 mm (a), 52 mm (b), 78 mm (c) e 104 mm (d) no domínio do tempo



Fonte - Elaborada pela autora

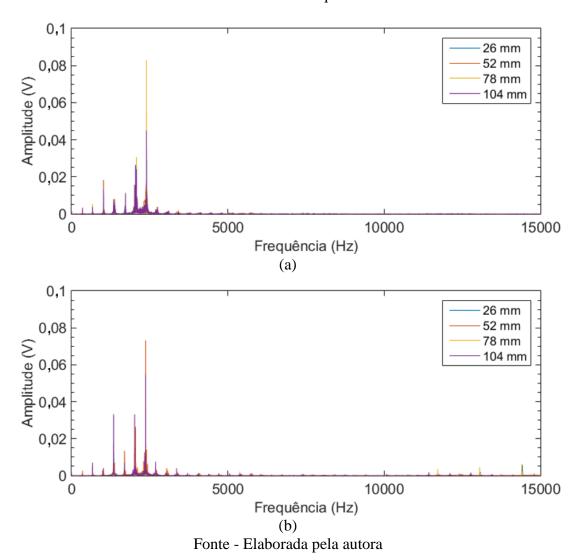
0.6 Emissão Acústica [V] 0.4 0.0 -0.2 -0.4 -0.6 -0.8 0.0 4.0 Tempo [s] (a) 8.0 0.6 0.4 Emissão Acústica [V] 0.2 0.0 -0.2 -0.4 -0.6 -0.8 3.5 4.0 Tempo [s] (b) 0.8 0.6 Emissão Acústica [V] -0.6 -0.8 4.0 0.0 3.0 3.5 4.5 7.0 7.5 8.0 Tempo [s] (c) 0.8 0.6 Emissão Acústica [V] 0.2 0.0 -0.2 -0.4 -0.6 -0.8 0.0 1.0 4.0 7.5 8.0 Tempo [s] (d)

Figura 60 - Sinal de EA no microfresamento de COS AR60 para  $v_c$ =125 m/min e lc=26 mm (a), 52 mm (b), 78 mm (c) e 104 mm (d) no domínio do tempo

Fonte - Elaborada pela autora

# APÊNDICE F – SINAIS DE EA NO DOMÍNIO DA FREQUÊNCIA

Figura 61 - Sinal de EA do microfresamento de GUF para  $v_c$ =62,5 m/min (a) e 125 m/min (b) no domínio da frequência



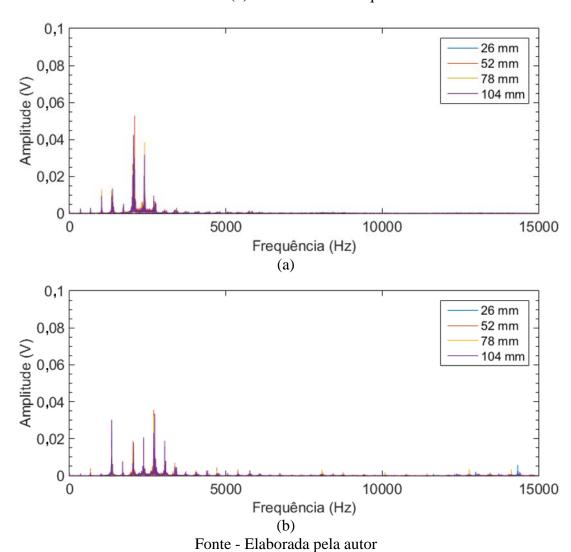


Figura 62 - Sinal de EA do microfresamento de COS AR60 para  $v_c$ =62,5 m/min (a) e 125 m/min (b) no domínio da frequência

## APÊNDICE G – ANOVA

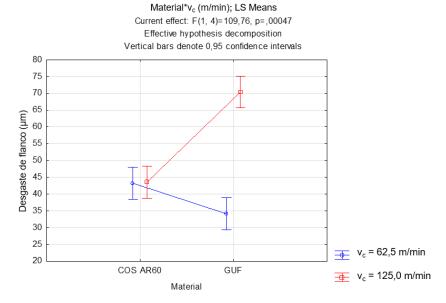
Com o intuito de verificar a influência da velocidade de corte e tamanho de grão no desgaste de flanco e no sinal de EA RMS, foi aplicado o teste estatístico de análise de variância ANOVA, apresentado neste apêndice.

#### **DESGASTE DE FLANCO**

Tabela 12 - Quadro ANOVA para efeitos de material, velocidade de corte e interação

Efeito	SS	MS	F	p
Material	156,66	156,66	26,597	0,006711
$\mathbf{v_c}$	670,07	670,07	113,761	0,000438
Interação	646,49	646,49	109,757	0,000469
Erro	23,56	5,89		

Figura 63 - Efeito do material e  $v_c$  no desgaste de flanco máximo para  $lc=104 \ mm$ 



Fonte - Elaborada pela autora

Figura 64 - Efeito do tamanho de grão no desgaste de flanco

Material; LS Means
Current effect: F(1, 4)=26,597, p=,00671
Effective hypothesis decomposition
Vertical bars denote 0,95 confidence intervals

| Section | Part of the confidence | Part of the con

Fonte - Elaborada pela autora

Figura 65 - Efeito da velocidade de corte no desgaste de flanco

V<sub>c</sub> (m/min); LS Means
Current effect: F(1, 4)=113,76, p=,00044
Effective hy pothesis decomposition
Vertical bars denote 0,95 confidence intervals

65
60
60
55
40
35
30
62,5
125,0
V<sub>c</sub> (m/min)

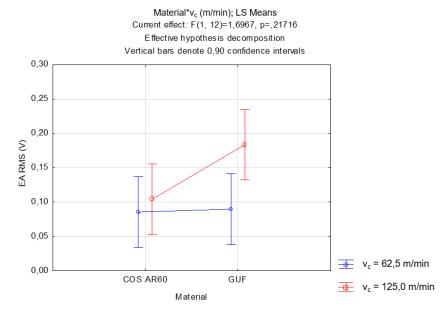
### **SINAL DE EA RMS**

Tabela 13 - Quadro ANOVA para efeitos de material, v<sub>c</sub> e interação

Efeito	SS	MS	F	p
Material	0,006967	0,006967	2,08904	0,173964
$\mathbf{v_c}$	0,012667	0,012667	3,79830	0,075069
Interação	0,005658	0,005658	1,69670	0,217165
Erro	0,040019	0,003335		

Fonte - Elaborada pela autora

Figura 66 - Interação entre material e v<sub>c</sub> nos valores de EA RMS



Fonte - Elaborada pela autora

Figura 67 - Efeito da velocidade de corte no sinal de EA RMS

