

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO  
EM ENGENHARIA MECÂNICA**

**DISSERTAÇÃO DE MESTRADO**

**Estudo experimental, via análise de  
vibrações, acerca da caracterização de  
desgaste em componentes mecânicos com  
diferentes combinações de lubrificantes e  
aditivos**

**Autor: Jonathan Oliveira Nery**

**Orientador: Prof. Dr. Sebastião Simões da Cunha Jr.**

**Coorientador: Prof. Dr. Gilbert Silva**

AGOSTO de 2019  
Itajubá – MG

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO  
EM ENGENHARIA MECÂNICA**

**Jonathan Oliveira Nery**

**Estudo experimental, via análise de  
vibrações, acerca da caracterização de  
desgaste em componentes mecânicos com  
diferentes combinações de lubrificantes e  
aditivos**

**Dissertação submetida ao Programa de Pós- Graduação  
em Engenharia Mecânica como parte dos requisitos para  
obtenção do título de Mestre em Ciências em Engenharia  
Mecânica.**

**Área de Concentração: Projeto, Materiais e Processos**

**Orientador: Prof. Dr. Sebastião Simões da Cunha Jr.**

**Coorientador: Prof. Dr. Gilbert Silva**

AGOSTO de 2019  
Itajubá – MG

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO  
EM ENGENHARIA MECÂNICA**

**Jonathan Oliveira Nery**

**Estudo experimental, via análise de  
vibrações, acerca da caracterização de  
desgaste em componentes mecânicos com  
diferentes combinações de lubrificantes e  
aditivos**

Dissertação aprovada por banca examinadora em 30 de agosto de 2019, conferindo ao autor o título de *Mestre em Ciências em Engenharia Mecânica*.

**Banca Examinadora:**

Prof. Dr. Carlos Alberto Carvalho Castro - CEFET/MG

Prof. Dr. Felipe de Souza Eloy - UNIFEI

Prof. Dr. Gilbert Silva - IEM/UNIFEI

Prof. Dr. Sebastião Simões da Cunha Júnior - IEM/UNIFEI

AGOSTO de 2019  
Itajubá – MG

## **Dedicatória**

*Dedico este trabalho a Deus, por ser meu guia em todos os momentos.*

*Aos meus familiares, que entenderam e me apoiaram em toda essa jornada.*

*“Ninguém pode voltar atrás e fazer um novo começo. Mas qualquer um pode recomeçar e fazer um novo fim.”*

Chico Xavier

*"Mede o que é mensurável e torna mensurável o que não é."*

Galileu Galilei

## **Agradecimentos**

Ao orientador deste trabalho, Dr. Sebastião Simões Cunha Jr. pela excelente orientação, pelo apoio em todos os momentos, pelos ensinamentos, e pela sua amizade.

Ao professor Dr. Gilbert Silva pela coorientação, e pelo apoio, sempre que necessário.

Aos técnicos, dos laboratórios da UNIFEI, Jonas, Marcos e Claudemir, pela presteza, ajuda e contribuição.

Ao Dr. Carlos e Ms. Eduardo, do CEFET Varginha, pelas contribuições.

À minha esposa Andreza pela força e compreensão, aos meus filhos que me dão força para continuar, mesmo que ainda não percebam. Aos meus pais que sempre me apoiaram e proporcionaram este momento.

Aos meus amigos da Pós-Graduação pelos momentos disfrutados juntos durante esse período de aprendizagem.

Aos professores do Instituto de Engenharia Mecânica - IEM, que transmitiram muito conhecimento útil por meio das disciplinas cursadas.

Enfim, agradeço a todos aqueles que cooperaram de forma direta ou indireta para a realização deste trabalho.

## Resumo

**NERY, J. O. (2019)**, *Estudo experimental, via análise de vibrações, acerca da caracterização de desgaste em componentes mecânicos com diferentes combinações de lubrificantes e aditivos*, Itajubá, 96 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Instituto de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Itajubá.

A eficiência de um lubrificante no controle do atrito e do desgaste de sistemas mecânicos está ligada à confiabilidade, consumo energético e vida útil de máquinas e equipamentos. A falta de controle da condição destas máquinas pode causar graves perdas de produção devido às falhas inesperadas. O monitoramento por vibrações mecânicas busca criar condições de identificar e avaliar potenciais falhas mecânicas ou elétricas em programas de manutenção preditiva, aplicada na identificação de defeitos como desbalanceamento, desalinhamento, defeito em rolamentos, falha de lubrificação, dentre outros. Neste trabalho, desenvolveu-se um estudo experimental, via análise de vibrações, a partir de amostras submetidas a desgaste por deslizamento, para diferentes combinações de óleos lubrificantes e aditivos. Realizou-se a correlação entre o desgaste gerado nas amostras, com os sinais vibracionais coletados durante os ensaios, para diferentes faixas de frequência. Analisou-se a superfície do desgaste via microscopia eletrônica de varredura (MEV) e sua composição por eletroscopia de energia dispersiva (EDS). Os resultados demonstram boa correlação entre algumas das faixas de frequência estudadas e o desgaste. Uma redução do desgaste médio foi registrada com o uso de aditivos, na condição de extrema pressão e velocidade de deslizamento de 0,49 m/s.

*Palavras-chave:* Vibrações mecânicas, Atrito, Desgaste por deslizamento, Aditivos antidesgaste.

## **Abstract**

**NERY, J. O. (2019)**, *Experimental study, via vibration analysis, about the characterization of wear on mechanical components with different combinations of lubricants and additives*, Itajubá, 96 p. MSc. Thesis - Mechanical Engineering Institute, Federal University of Itajubá.

The efficiency of a lubricant in controlling friction and wear of mechanical systems is linked to the reliability, energy consumption and life of machines and equipment. The lack of control the condition of these machines can cause serious production losses due to unexpected failures. Mechanical vibration monitoring seeks to create conditions to identify and evaluate potential mechanical or electrical failures in predictive maintenance programs, applied to identify defects such as unbalance, misalignment, bearing defect, lubrication failure, among others. In this work, an experimental study was developed, via vibration analysis, from samples submitted to sliding friction, for different combinations of lubricating oils and additives. The correlation between the wear generated in the samples and the vibrational signals collected during the tests was performed for different frequency ranges. The wear surface was analyzed by scanning electron microscopy (SEM) and its composition by energy dispersive spectroscopy (EDS). The results show a good correlation between some of the studied frequency bands and the wear. A reduction of the average wear was registered with the use of additives, in the condition of extreme pressure and sliding speed of 0.49 m/s.

*Keywords:* Mechanical vibrations, Friction, Sliding wear, Anti-wear additives.

# SUMÁRIO

SUMÁRIO.....	i
Lista de Figuras .....	iii
Lista de Tabelas .....	viii
Simbologia.....	ix
Letras Latinas .....	ix
Letras Gregas.....	ix
Siglas e Abreviaturas .....	x
<b>Capítulo 1</b>	
<b>INTRODUÇÃO .....</b>	<b>1</b>
1.1 Objetivos.....	3
1.2 Estrutura da dissertação .....	3
<b>Capítulo 2</b>	
<b>REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....</b>	<b>5</b>
2.1 Vibrações mecânicas e atrito .....	5
2.2 Tribologia .....	9
2.2.1 Fundamentos da mecânica de contato e atrito .....	10
2.2.2 Teoria de Hertz .....	12
2.3 Desgaste por deslizamento .....	15
2.3.1 Desgaste adesivo .....	18
2.3.2 Desgaste abrasivo .....	19
2.3.3 Desgaste por fadiga .....	21
2.3.4 Desgaste Triboquímico .....	24
2.4 Lubrificantes e aditivos de extrema pressão.....	25

<b>Capítulo 3</b>	
<b>MATERIAIS E MÉTODOS .....</b>	<b>30</b>
3.1 Bancada de ensaios .....	30
3.2 Materiais utilizados .....	32
3.3 Equipamentos de monitoramento utilizados durante os ensaios .....	34
3.4 Equipamentos utilizados para análise da superfície do desgaste.....	35
3.5 Procedimentos experimentais .....	36
<b>Capítulo 4</b>	
<b>RESULTADOS E DISCUSSÕES .....</b>	<b>41</b>
4.1 Experimentos realizados.....	41
4.2 Análise preliminar dos dados vibracionais .....	43
4.3 Área de desgaste das Amostras .....	50
4.4 Área de contato segundo a Teoria de Hertz.....	53
4.5 Correlação entre desgaste, vibração e temperatura .....	54
4.5.1 Comparativo do nível global de vibração por faixa de frequência.....	54
4.5.2 Relação entre temperatura e desgaste .....	66
4.5.3 Resultados obtidos via Microscópio Eletrônico de Varredura .....	68
4.5.4 Resultados obtidos via Espectroscopia por Energia Dispersiva.....	71
4.5.5 Relação entre desgaste e lubrificante utilizado.....	74
<b>Capítulo 5</b>	
<b>CONCLUSÕES E PERSPECTIVAS FUTURAS.....</b>	<b>78</b>
<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>81</b>
<b>ANEXO I.....</b>	<b>84</b>

## Lista de Figuras

Figura 2.1 - Diversos tipos de ruído de freio e seu conteúdo espectral aproximado.....	7
Figura 2.2 - Rugosidade em diferentes escalas... ..	11
Figura 2.3 - Influência da rugosidade superficial na lubrificação de duas peças ajustadas. ....	11
Figura 2.4 - Seção transversal de uma superfície apresentando diferentes zonas ou camadas.	12
Figura 2.5 - Franjas de interferência no contato de duas lentes cilíndricas iguais com seus eixos inclinados a 45°. (a) sem carga, (b) com carga.....	13
Figura 2.6 - Contato de duas esferas.....	13
Figura 2.7 - Contato entre superfícies. ....	14
Figura 2.8 - Fatores que influenciam o mecanismo de desgaste durante o desgaste por deslizamento. ....	17
Figura 2.9 - Mecanismos de desgaste por deslizamento: (a) Adesão de junções, transferência de material e sulcos, (b) Fadiga superficial devido a deformação plástica cíclica em sólidos dúcteis, (c) Fadiga superficial que resulta em trincas em sólidos frágeis e (d) reação triboquímica e ruptura dos filmes triboquímicos.....	17
Figura 2.10 - Desgaste adesivo.....	19
Figura 2.11 - Desgaste abrasivo. ....	20
Figura 2.12 - Desgaste por fadiga.....	22
Figura 2.13 - Tipos de desgaste por fadiga de superfície. ....	23
Figura 2.14 - Desgaste triboquímico. ....	24
Figura 2.15 - Modelo de lubrificação por filme de sacrifício.....	27
Figura 3.1 - Bancada de ensaios: 1-Coletor de vibrações Vibexpert II; 2-Sistema utilizado para monitorar temperatura do óleo; 3- Câmera Termográfica FLIR E40; 4- Motoredutor; 5- Carga; 6- Peças submetidas a desgaste e reservatório de óleo; 7- Zoom do reservatório de óleo e 8- Zoom da amostra submetida a desgaste. ....	31

Figura 3.2 - Diagrama dos parâmetros monitorados e análises realizadas .....	31
Figura 3.3 - Rolamento UC204 .....	32
Figura 3.4 - Amostras submetidas a fricção: 1 - Parte fixa, elemento rolante do rolamento UC204; 2- Parte móvel, pista interna do rolamento UC204; 3 – Acelerômetro Pruftechnik VIB 6.142R. ....	32
Figura 3.5 - Bancada de ensaio.....	33
Figura 3.6 - Elementos submetidos a desgaste .....	33
Figura 3.7 - Coletor de vibrações Vibexpert II.....	34
Figura 3.8 - Câmera termográfica Flir E40 .....	34
Figura 3.9 - Sensores de temperatura .....	35
Figura 3.10 - Estereoscópio Olympus SZ61.....	35
Figura 3.11 - Microscópio Eletrônico de Varredura.....	36
Figura 3.12 - Tela de configuração do espectro de vibração.....	37
Figura 3.13 -Exemplo de configuração das faixas de frequência para as curvas de nível global .....	37
Figura 3.14 - Valores de níveis globais em aceleração .....	38
Figura 3.15 - Imagem termográfica.....	39
Figura 3.16 - Termômetro digital de contato SKF TMDT2.....	39
Figura 4.1 – Tensão de contato para carga inicial de 56,5 kgf.....	42
Figura 4.2 – Tensão de contato para carga final de 177 kgf.....	43
Figura 4.2 - Espectros em cascata registrados em um dos ensaios.....	44
Figura 4.3 - Espectros de aceleração sobrepostos. ....	44
Figura 4.4 - Espectros de vibração do momento da aplicação da carga.....	45
Figura 4.5 - Espectro de aceleração do momento de aplicação da carga. ....	45
Figura 4.6 - Espectros dos ensaios E21 a E40, para diferentes faixas de frequência em RMS e 0-P.....	46
Tabela 4.2: Faixas de frequência dos níveis globais de aceleração RMS. ....	47
Figura 4.7- Curvas de valores de níveis globais de todas as faixas de frequência. ....	47

Figura 4.8 - Amplitude de vibração para 5,5 Hz. ....	48
Figura 4.9 - Curvas dos níveis globais de 10 Hz a 25 kHz, com diferentes bandas estreitas de frequência. ....	48
Figura 4.10 - Curvas dos níveis globais de 10 Hz a 25 kHz, com diferentes bandas largas de frequência. ....	49
Figura 4.11 - Área de desgaste para amostras E21 a E40, seguidas do lubrificante utilizado nos respectivos ensaios. 15 minutos de ensaio, carga inicial de 56,50 kgf (2 min.) e final de 177 kgf (13 min.). ....	51
Tabela 4.3 - Dados dos ensaios de E21 a E40. ....	52
Figura 4.12 - Área e volume do desgaste versus tensão de contato final por amostra. ....	53
Tabela 4.4 - Área de contato segundo a Teoria de Hertz. ....	53
Figura 4.13 - Valores de níveis globais na frequência de rotação do equipamento 5,5 Hz (g) (0-P).....	54
Figura 4.14: (a) Valores de níveis globais de 10 Hz a 25 kHz (RMS); (b) Zoom do momento de aumento de carga; (c) Área de desgaste. ....	56
Figura 4.15: (a) Valores de níveis globais de 1 kHz a 25 kHz (RMS) ; (b) Zoom do momento de aumento de carga; (c) Área de desgaste.....	57
Figura 4.16: (a) Valores de níveis globais de 8 kHz a 25 kHz (RMS) ; (b) Zoom do momento de aumento de carga; (c) Área de desgaste.....	58
Figura 4.17: (a) Valores de níveis globais de 10 Hz a 1 kHz (0-P) ; (b) Zoom do momento de aumento de carga; (c) Área de desgaste .....	60
Figura 4.18 - (a) Valores de níveis globais de 1 kHz a 2 kHz (0-P) ; (b) Zoom do momento de aumento de carga; (c) Área de desgaste. ....	61
Figura 4.19 - (a) Valores de níveis globais de 2 kHz a 8 kHz (0-P) ; (b) Zoom do momento de aumento de carga; (c) Área de desgaste .....	63
Figura 4.20 - (a) Valores de níveis globais de 8 kHz a 25 kHz (0-P); (b) Zoom do momento de aumento de carga; (c) Área do desgaste. ....	64
Tabela 4.5 - Faixas de frequência com vibração em destaque em algum momento do ensaio. ....	65
Figura 4.21 - Valores de temperatura do óleo durante os ensaios. ....	67
Figura 4.22 - Relação entre temperatura máxima registrada e desgaste. ....	67
Figura 4.23 - Imagens do desgaste obtidas no MEV.....	69
Figura 4.24 - Imagens da superfície do desgaste onde foi realizada EDS.....	70

Figura 4.25 - Distribuição de enxofre em parte da superfície desgastada, MAG: 1000x HV: 15kV WD: 7 mm .....	71
Figura 4.26 - Distribuição de elementos em parte da superfície desgastada, pesq. livre, MAG:1000x HV:15kV .....	72
Figura 4.27 - Distribuição de P, S, Cl e Al nas amostras de acordo com a concentração em porcentagem de peso não normatizada do elemento (Unn. C [% Wt.]). (a) Por elementos químicos; (b) Por amostras. ....	73
Tabela 4.6 - Relação entre desgaste e lubrificante aplicado no ensaio.....	75
Figura 4.28 - Relação entre lubrificantes e desgaste. ....	76
Figura A.1 - Gráficos de nível global ensaio E21. ....	84
Figura A.2 - Gráficos de nível global ensaio E22. ....	84
Figura A.3 - Gráficos de nível global ensaio E23. ....	85
Figura A.4 - Gráficos de nível global ensaio E24. ....	85
Figura A.5 - Gráficos de nível global ensaio E25. ....	86
Figura A.6 - Gráficos de nível global ensaio E26. ....	86
Figura A.7 - Gráficos de nível global ensaio E27. ....	87
Figura A.8 - Gráficos de nível global ensaio E28. ....	87
Figura A.9 - Gráficos de nível global ensaio E29. ....	88
Figura A.10 - Gráficos de nível global ensaio E30. ....	88
Figura A.11 - Gráficos de nível global ensaio E31. ....	89
Figura A.12 - Gráficos de nível global ensaio E32. ....	89
Figura A.13 - Gráficos de nível global ensaio E33. ....	90
Figura A.14 - Gráficos de nível global ensaio E34. ....	90
Figura A.15 - Gráficos de nível global ensaio E35. ....	91
Figura A.16 - Gráficos de nível global ensaio E36. ....	91
Figura A.17 - Gráficos de nível global ensaio E37. ....	92
Figura A.18 - Gráficos de nível global ensaio E38. ....	92
Figura A.19 - Gráficos de nível global ensaio E39. ....	93

Figura A.20 - Gráficos de nível global ensaio E40. ....	93
Figura B.1 - Certificado de calibração do coletor de vibrações Vibexpert II e acelerômetro. .	94
Figura B.2 - Dados do acelerômetro calibrado.....	95
Figura B.3 - Certificado de calibração do coletor de vibrações Vibexpert II e acelerômetro. .	95
Figura B.3 - Certificados de calibração da câmera termográfica. ....	96

## Lista de Tabelas

Tabela 3.1 - Equipamento utilizado nos ensaios. ....	30
Tabela 3.2 - Dados dos ensaios preliminares de E1 a E20. ....	40
Tabela 4.1 - Dados dos ensaios de E21 a E40. ....	42
Tabela 4.2: Faixas de frequência dos níveis globais de aceleração RMS. ....	47
Tabela 4.3 - Dados dos ensaios de E21 a E40. ....	52
Tabela 4.4 - Área de contato segundo a Teoria de Hertz. ....	53
Tabela 4.5 - Faixas de frequência com vibração em destaque em algum momento do ensaio. ....	65
Tabela 4.6 - Relação entre desgaste e lubrificante aplicado no ensaio. ....	75

## Simbologia

### Letras Latinas

$a$	Raio de contato
$A$	Área de contato segundo a teoria de Hertz
$E^*$	Módulo de elasticidade efetivo para teoria de Hertz
$E_1$	Módulo de elasticidade do material do elemento 1
$E_2$	Módulo de elasticidade do material do elemento 2
$F$	Força de atrito
$N$	Força normal
$P$	Carga aplicada a teoria de Hertz
$R_1$	Raio 1
$R_2$	Raio 2
$\nu_1$	Coefficiente de Poisson do elemento 1
$\nu_2$	Coefficiente de Poisson do elemento 2

### Letras Gregas

$\mu$	Coefficiente de atrito
$\delta$	Deformação de contato, teoria de Hertz

## Siglas e Abreviaturas

0-P	Zero a pico
AW	Antidesgaste
EDS	Eletroscopia de energia dispersiva
EP	Extrema pressão
FM	Modificadores de atrito
MEV	Microscopia eletrônica de varredura
RMS	Valores médios quadrados, ou valor eficaz
SAE	Sociedade dos Engenheiros Automotivos dos Estados Unidos

# Capítulo 1

## INTRODUÇÃO

Para que se tenha produtividade e redução de custo na indústria, as máquinas precisam funcionar com grande confiabilidade. Falhas inesperadas podem causar graves paradas de produção. Medidas e análises de vibrações criam condições de identificar e avaliar potenciais de falha, associando as vibrações manifestadas pela máquina às causas que as geram, formando a base de um programa de manutenção preditiva. Alguns dos defeitos identificados pela técnica de análise de vibrações são desbalanceamento, desalinhamento, folga, defeito em rolamentos, defeito em engrenagens (ALMEIDA, 2013).

A análise de vibrações mecânicas é empregada em diferentes áreas da engenharia, no monitoramento de condição dos mais variados tipos de máquinas rotativas, como motores elétricos, sistemas de transmissão, mancais de rolamento. Pode ser empregada no monitoramento de máquinas de baixa rotação e altíssima rotação, em máquinas estacionárias, em veículos terrestres, em aeronaves, dentre outros.

Inúmeros tipos de óleos lubrificantes, com diferentes combinações de aditivos, são necessários para o bom funcionamento de máquinas e equipamentos. Em algumas situações, em condições extremas, aditivos destinados para este fim são empregados. Sistemas de transmissão de potência, como redutores, e mancais de rolamento, em especial os de baixa rotação, são exemplos de sistemas que podem ser submetidos às condições de extrema pressão.

A tribologia é apresentada por Qiu *et al.* (2017), como sendo um assunto interdisciplinar, que abrange disciplinas como matemática, física, química, mecânica, termodinâmica, metalurgia e materiais. Com o aprimoramento da teoria e da pesquisa aplicada, a tribologia passa a ser reconhecida como fator crucial no desempenho de rolamentos e outros componentes mecânicos, refletindo no desempenho de máquinas e equipamentos.

Um enorme prejuízo com deficiências tribológicas, é causado principalmente pela grande quantidade de perdas de energia e materiais que ocorrem simultaneamente em praticamente todos os dispositivos mecânicos em operação. Quando avaliados, tomando como base uma única máquina, as perdas são pequenas. No entanto, quando a mesma perda é multiplicada por inúmeras máquinas de um tipo semelhante, os custos se tornam muito grandes (STACHOWIAK E BATCHEOR, 2000).

Quase um terço da energia do mundo é consumida pelo atrito e a maioria dos elementos de máquinas falham e são substituídos devido ao desgaste excessivo. Portanto, reduzir o atrito e o desgaste é uma prioridade no que tange ao aumento de eficiência energética em qualquer tipo de sistema mecânico e na maximização da vida útil dos componentes destes sistemas. Melhorar o desempenho dos lubrificantes é uma excelente maneira de minimizar este problema (SONG, 2012).

A tribologia e a vibração mecânica costumavam ser divididas em dois campos distintos. No entanto, a área relacionada a interações atrito-vibração, vem recebendo considerável atenção de engenheiros e cientistas, iniciando uma combinação entre tribologia e vibrações mecânicas como ferramentas eficientes para lidar e analisar a vasta quantidade de casos práticos (CHEN, 2014).

Ainda segundo Chen (2014), em sistemas submetidos ao atrito, as vibrações resultantes muitas vezes exibem várias propriedades não lineares, transitórias e incertas, contudo com intervalos importantes de frequência. Além disso, pequenas mudanças nos parâmetros interfaciais podem ter um efeito significativo nas vibrações resultantes. As condições de contorno do problema não são fixas ou previamente conhecidas, mas dependem das condições ambientais, das condições de operação, das interações do sistema e também das variações no tempo.

É possível descrever como um aditivo específico funciona em termos de atrito e controle de desgaste. No entanto, Stachowiak e Batcheor (2000) apontam que a previsão do desempenho do lubrificante a partir da especificação química ainda não é possível e isso restringe a pesquisa ao teste de aplicações específicas.

O presente trabalho, além de analisar diferentes faixas de frequência que possam apresentar correlação com o desgaste, busca avaliar a viabilidade do uso de parâmetros vibracionais durante a realização de ensaios convencionais de desgaste, que ainda são necessários na avaliação do desempenho de lubrificantes, e na avaliação atrito-vibração, como apresentados por Stachowiak e Batcheor (2000) e Chen (2014).

As rotinas de coleta e análise de dados vibracionais foram feitas com auxílio de um coletor

de vibrações Vibexpert II, da Pruftechnik, com certificado de calibração e programas comerciais. Os dados de temperatura foram validados por uma câmera termográfica comercial, Flir E40, com certificado de calibração. Resultados dos testes experimentais foram utilizados na correlação entre vibração e desgaste, temperatura e desgaste. Inferências a partir dos resultados obtidos com e sem aditivos foram apresentadas. As análises morfológicas da superfície desgastada, assim como as medidas da área dos desgastes, foram realizadas por microscopia óptica. Os mecanismos de desgaste foram avaliados, em algumas amostras, pelo diagnóstico de imagens do Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV). Foram levantados dados a partir da espectroscopia por energia dispersiva (EDS) dos elementos presentes em parte das superfícies desgastadas.

## 1.1 Objetivos

O objetivo principal deste trabalho é a identificação de desgaste em componentes mecânicos com diferentes combinações de lubrificantes e aditivos, via análise de vibrações, a partir de ensaios experimentais.

A partir do objetivo principal, têm-se os seguintes objetivos específicos:

- Buscar correlação entre desgaste e características vibracionais, em diferentes faixas de frequência;
- Relacionar o desgaste com a temperatura durante os ensaios;
- Comparar o desgaste entre os diferentes lubrificantes utilizados;
- Analisar e comparar os elementos químicos presentes na superfície de algumas peças submetidas ao desgaste.

## 1.2 Estrutura da dissertação

Este trabalho está dividido em cinco capítulos, além das Referências Bibliográficas e Anexos. A maneira na qual são divididos é apresentada a seguir.

No Capítulo 1, faz-se uma introdução a respeito do trabalho elaborado juntamente com o objetivo principal e objetivos específicos.

No Capítulo 2, apresenta-se uma breve revisão bibliográfica de conteúdos relevantes para o desenvolvimento deste trabalho, de pesquisadores na área.

O Capítulo 3 trata de materiais e métodos utilizados no decorrer deste trabalho.

No Capítulo 4, os resultados são apresentados e discutidos. Este Capítulo inicia com a apresentação de como determina-se as faixas de frequência vibratória alvo de análise e correlação com desgaste. Em seguida, correlações entre desgaste e vibração, para diferentes faixas de frequência de vibração, tanto em RMS, quanto de zero a pico, serão discutidas. Ainda neste Capítulo são realizadas comparações de desgaste entre os diferentes lubrificantes e aditivos para uma mesma metodologia de ensaio experimental. Imagens da região desgastada obtidas por meio do Microscópio Eletrônico de Varredura e dados obtidos por EDS são discutidos, o que permite um comparativo pertinente a respeito dos principais aditivos, como enxofre, fósforo e cloro, utilizados em lubrificantes aplicados às condições extremas de carga, e como ficam dispersos na superfície desgastada. Enquanto que neste Capítulo os gráficos são apresentados por faixa de frequência, para todos os ensaios, no Anexo I, são apresentados todos os gráficos, de diferentes faixas de frequência, ensaio por ensaio, o que permite um comparativo entre as faixas de frequência para um mesmo experimento.

Por fim, no Capítulo 5, conclusões com base nos resultados são apresentadas, juntamente com sugestões de trabalhos futuros.

O Anexo II contém os certificados de calibração do coletor de vibrações e da câmera termográfica.

## Capítulo 2

### REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Este capítulo apresenta os fundamentos teóricos necessários para a análise dos experimentos e apresentação dos resultados e discussões desta dissertação. Ele foi dividido em subtópicos que abrangem os temas de vibrações, tribologia, lubrificantes e aditivos.

#### 2.1 Vibrações mecânicas e atrito

Vibrações mecânicas são aplicadas a diferentes áreas, como no projeto de máquinas e estruturas, no controle de vibrações de diferentes sistemas, em máquinas e equipamentos como forma de monitorar a condição de funcionamento e na identificação de diversos defeitos. Neste trabalho, vibração mecânica será utilizada como meio de prever atrito e desgaste durante ensaios de desgaste por deslizamento na presença de diferentes óleos lubrificantes e aditivos.

Quando as superfícies de dois objetos são colocadas em contato e podem deslizar uma contra a outra, há uma resistência ao movimento. Segundo Chen (2014), essa resistência é a força de atrito que acontece quando um corpo sólido se move sobre outro. O atrito é um dos problemas mais importantes na tribologia, que é a ciência e a tecnologia da interação entre superfícies em movimento relativo, desgaste e lubrificação. Vibração é o movimento de oscilação dos objetos e sua relação com as forças associadas a esse movimento. O atrito e a interação de interfaces, frequentemente, dão origem a diversas formas de ondas e oscilações dentro de sólidos, que são propagadas para o seu entorno.

Para Taylor (2003), fricções por deslizamento, onde existe movimento relativo entre superfícies, os sinais vibracionais são de bandas largas e resultam em falhas súbitas e

catastróficas.

Para Wen e Huang (2018), o monitoramento por vibração é uma maneira importante de determinar o estado de desgaste de um sistema mecânico. Com a análise de espectros dos sinais de vibração, pode-se prever o surgimento de desgaste sério.

Segundo Chen (2014), o contato e o atrito entre as duas superfícies é um processo de transição e dissipação de energia. A energia cinética dos corpos não é simplesmente transferida para o outro corpo, mas também dissipada pelo movimento microscópico da interface irregular, como asperezas, partículas e átomos. O atrito geralmente dá origem às vibrações, que se propagam pelos meios ao redor. As vibrações também afetam a interface do atrito, uma vez que o atrito e as vibrações interagem entre si. Ainda segundo Chen (2014), o atrito é um processo complexo no qual as forças são transmitidas, a energia mecânica é convertida, a topografia da superfície é alterada, o material de interface pode ser removido ou formado, e podem ocorrer mudanças físicas e químicas.

Os coeficientes de atrito não são propriedades intrínsecas dos materiais, mas dependem das propriedades das superfícies de contato, suas condições operacionais, condições ambientais e até mesmo suas interações. A tribologia e a vibração mecânica costumavam ser divididas em dois campos distintos. No entanto, a área relacionada às interações atrito-vibração, vem recebendo considerável atenção de engenheiros e cientistas, iniciando uma combinação entre tribologia e vibrações mecânicas como ferramenta eficientes para lidar e analisar a vasta quantidade de casos práticos (CHEN, 2014).

Os diversos tipos de ruído podem ser classificados pela frequência que emitem, como mostra a Figura 2.1, sendo divididos em ruídos de baixa, média e alta frequência (AKAY, 2002).

Os ruídos de baixa frequência ocorrem até 1000 Hz, a região chamada de média frequência compreende a faixa entre 1 kHz e 7 kHz e os ruídos de alta frequência ocorrem a partir de 7 kHz. (SUETTI, 2011)

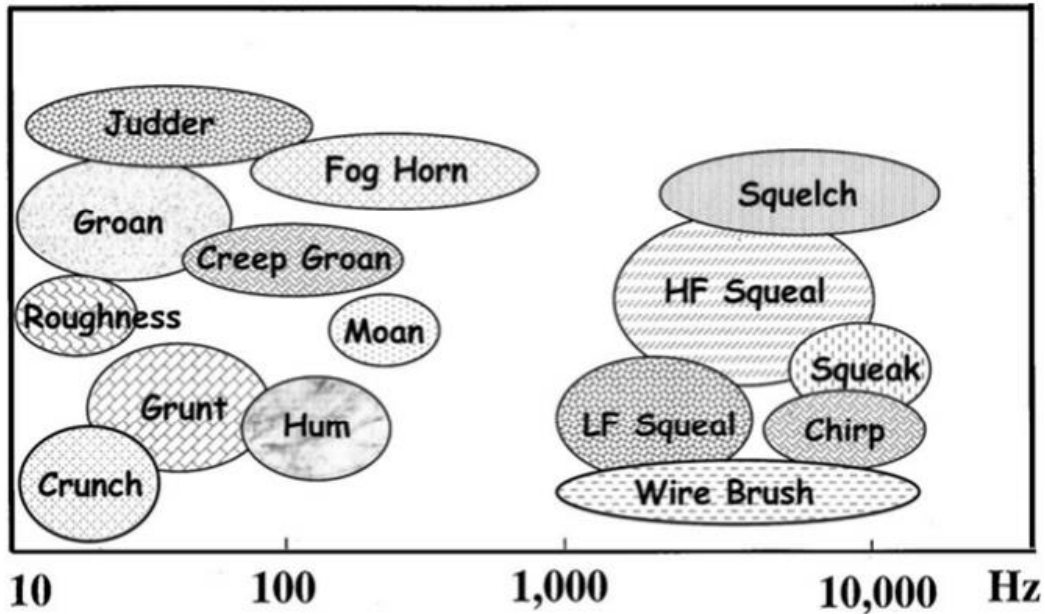


Figura 2.1 - Diversos tipos de ruído de freio e seu conteúdo espectral aproximado. Fonte: Akay (2012).

As interações atrito-vibração ocorrem na vida cotidiana, em numerosos sistemas científicos e de engenharia. Chen (2014) cita alguns exemplos como sons musicais de instrumentos de cordas, ruídos de freio de automóveis e motocicletas, ruídos de rodas de veículos sobre trilhos, ruídos de roletes de trilhos de elevadores, ruídos de articulações robóticas, trepidação de máquinas-ferramentas, rangido de dobradiças de porta, giz no quadro negro, etc. As interações atrito-vibração cobrem numerosos fenômenos da ciência e engenharia.

Para Chen (2014), as vibrações resultantes apresentam intervalos importantes de frequência. Ainda segundo o autor, pequenas mudanças nos parâmetros interfaciais podem ter um efeito significativo nas vibrações resultantes, assim, as escalas dos fatores de influência variam de níveis macro, micro e nanômetro. As condições de contorno do problema não são fixas ou previamente conhecidas, mas dependem das condições ambientais, das condições de operação, das interações do sistema e também das variações no tempo. Devido à complexidade das interações de atrito-vibração, o autor coloca como um problema não resolvido em muitas aplicações de engenharia. E como a modelagem e as previsões não são confiáveis, a abordagem "tentativa e erro" tem sido amplamente utilizada.

O objetivo da pesquisa em interações de atrito-vibração, segundo Chen (2014), assume muitas formas. Dentre elas: desenvolver uma compreensão fundamental das vibrações e sons induzidos por atrito, bem como suas interações em várias escalas; para reduzir o atrito usando vibrações e som; realizar alguns processos físicos para produtos, como o motor ultrassônico; fazer uso de vibrações e sons para explorar fenômenos em processos complexos onde outros meios são inacessíveis, como monitoramento de atrito de interface e para reduzir e eliminar a

instabilidade e o ruído em sistemas de engenharia causados por atrito, dentre outros.

Segundo Almeida (2013), a lubrificação inapropriada de um mancal também pode causar vibração. Se faltar lubrificação no mancal, ou se for usado lubrificante errado, poderá ocorrer um roçamento parcial excessivo entre o eixo e o mancal estacionário. Esta fricção excita vibração no mancal e em outras partes da máquina. Quando um dedo úmido é passado sobre a superfície de um vidro, uma vibração semelhante é produzida. As vibrações resultantes são de alta frequência e não são múltiplos da rotação do eixo.

Ainda segundo Almeida (2013), se o atrito for parcial ou intermitente, a rigidez do eixo varia temporariamente, ficando mais rígido durante o período de contato. Neste caso, a vibração do sistema passa a ser não linear, e as vibrações resultantes têm componentes de frequências sub-harmônicas da rotação e/ou inter-harmônicas.

Para Rao (2009), a excitação é não determinística ou aleatória quando o valor da excitação em dado instante não pode ser previsto. E para esses casos, um grande número de registros da excitação pode exibir alguma regularidade estatística, sendo possível estimar médias como os valores médios quadrados (RMS) da excitação.

Vários esquemas foram desenvolvidos para realizar a análise e melhorar a descrição de sinais de vibração transientes, de acordo com Penha (1999). Ainda segundo o autor, existem duas abordagens numa análise tempo-frequência do sinal existente. A primeira consiste em dividir o sinal em fatias no tempo e então analisar cada uma destas fatias separadamente. Já a segunda, busca filtrar diferentes bandas de frequência do sinal e então cortar estas bandas no tempo e analisar o seu conteúdo de energia.

Segundo Chen (2014), têm havido alguns esforços para identificar os parâmetros de interface por meio da análise do ruído, pelo qual o ruído gerado com deslizamento de contato entre superfícies pode ser valioso como uma forma de monitoramento de superfície "não-invasivo". Aponta ainda que foi demonstrado que o ruído gerado pela interface pode ser usado para detectar desgaste e diagnosticar falhas potenciais em uma variedade de contatos de interface.

Para um dado sistema, segundo Chen (2014), verifica-se que o sinal de ruído filtrado dentro de uma certa largura de banda de espectro contém uma frequência especificada na qual a amplitude é máxima. Essa frequência, chamada frequência dominante, é considerada uma constante de material independente da rugosidade superficial e da carga de contato. Ainda segundo o autor, a frequência dominante de um dado material é proporcional à velocidade do som neste material.

## 2.2 Tribologia

A tribologia, para Both (2011), é definida como a ciência que estuda a interação entre superfícies com movimento relativo entre si e os fenômenos que ocorrem em decorrência disso. Ainda segundo o autor, a tribologia estuda o atrito, desgaste e lubrificação, e ainda, lida com aspectos físicos, mecânicos, químicos e metalúrgicos do movimento relativo.

Para Stachowiak e Batcheor (2000) o atrito e o desgaste são melhor controlados com uma camada fina ou um filme intermediário de material que separa os corpos deslizantes, rolantes e impactantes. Não há praticamente nenhuma restrição sobre o tipo de material que pode formar tal filme. Sólidos, líquidos e gases são igualmente eficazes. Se nenhum material de filme for fornecido, o próprio processo de desgaste pode gerar um filme substituto. O objetivo da tribologia, ainda segundo Stachowiak e Batcheor (2000), é encontrar o material de filme ideal para uma dada aplicação, ou prever a sequência de eventos quando um contato deslizante / rolante / impactante é deixado para gerar seu próprio filme intermediário. Para Gonçalves (2017), os fenômenos tribológicos são sistêmicos, dependem fortemente das condições do tribossistema em que estão atuando.

A tribologia, segundo Takadoun (2008), é um campo amplo e multidisciplinar de estudo e pesquisa destinado à redução do desgaste em materiais, aumento da vida útil e confiabilidade de sistemas mecânicos e mecatrônicos e controlar (ou otimizar) o atrito. Em alguns casos, como em freios, o objetivo é o máximo de atrito, enquanto em outros o objetivo é minimizar os seus efeitos. O objetivo duplo requer uma abordagem que combine a mecânica de contato com a físico-química de superfícies e interfaces.

A tribologia é um campo muito novo da ciência, segundo Stachowiak e Batcheor (2000), sendo a maior parte do conhecimento obtido após a Segunda Guerra Mundial. Em comparação, outros campos da engenharia, como a termodinâmica e mecânica, são relativamente antigas e bem estabelecidas. Ainda segundo os autores, a tribologia ainda está em um estado imperfeito e sujeita a algumas controvérsias que impediram a difusão de informações para alguns campos.

Para Trindade (2014), o desempenho de máquinas está diretamente ligado ao conhecimento e ao estudo dos fenômenos superficiais que ocorrem nas partes metálicas sujeitas a movimento relativo entre si.

### 2.2.1 Fundamentos da mecânica de contato e atrito

Atrito e desgaste, segundo Gonçalves (2017), não são propriedades intrínsecas dos materiais e são influenciados pela interação de diversos fatores, dentre os quais têm-se, por exemplo: tipo de movimento relativo, geometria de contato, velocidade de deslizamento, temperatura, além das propriedades mecânicas, físicas e químicas dos materiais e de suas superfícies.

O atrito, para Chen (2014), é uma força tangencial resistente de uma interface deslizante em um sistema dinâmico. O atrito, ainda segundo o autor, foi demonstrado estar relacionado à topografia da superfície, e a investigação do atrito foi convencionalmente atribuída à determinação da área real de contato e à compreensão do mecanismo de contato.

A explicação para o atrito ser independente da área de contato aparente só foi elaborada em meados de 1940, por Bowden e Tabor, que apontaram que devido à rugosidade das superfícies, existe uma diferença entre a área de contato aparente e a área de contato real, sendo a área real que determina a magnitude do coeficiente de atrito. Sendo que se a área real de contato for proporcional à força normal, a Lei do Atrito, Equação (2.1), é seguida normalmente (SUETTI, 2011).

$$F = \mu N \quad (2.1)$$

Onde,  $F$  é a força de atrito,  $\mu$  o coeficiente de atrito, e  $N$  a força normal.

Na natureza e na prática de engenharia, segundo Chen (2014), não há superfícies topograficamente lisas. Todas as superfícies sólidas, embora lisas em uma escala maior, são comparativamente ásperas em uma escala menor. Assim, ainda segundo Chen (2014), as superfícies sólidas são quase sempre compostas de variações aleatórias na altura da superfície em alguma escala, como ilustrado na Figura 2.2.

A textura ou acabamento superficial é definido em termos de rugosidade, ondulações, marcas e falhas. (ANSI B46-1, 1995 Apud FALQUETO, 2015)

(Intencionalmente deixado em branco)

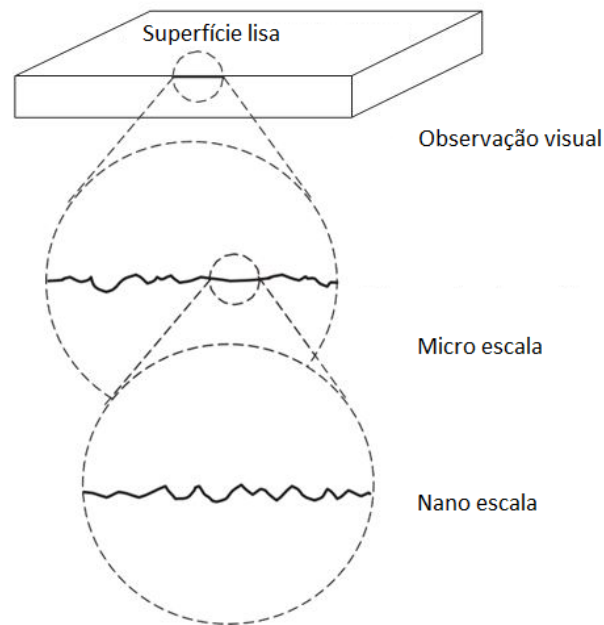


Figura 2.2 - Rugosidade em diferentes escalas. Fonte: Adaptado de Chen (2014).

Agostinho *et al.* (2004) apresentam a importância do acabamento superficial na lubrificação. Segundo os autores, pela Figura 2.3, nota-se que se as saliências forem maiores que a espessura da película de óleo, poderá haver contato metal com metal. Influenciando também de maneira decisiva, não só a altura da saliência, como também a sua forma.

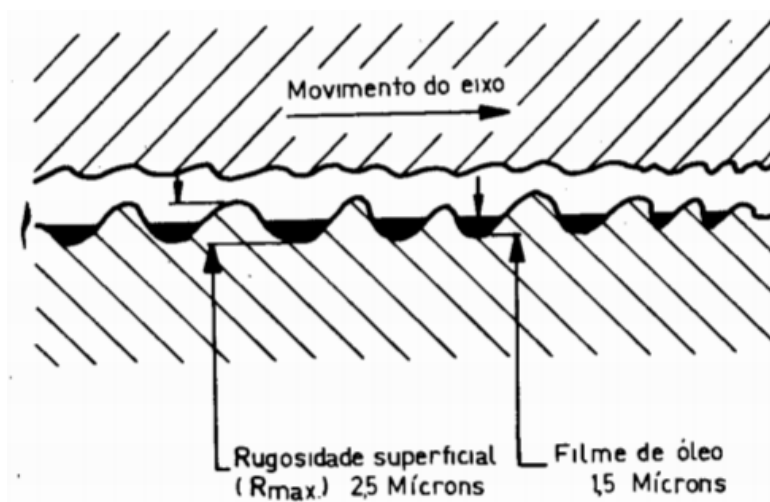


Figura 2.3 - Influência da rugosidade superficial na lubrificação de duas peças ajustadas. Fonte: Agostinho, Rodrigues e Lirani (2004).

Takadom (2008) apresenta a seção transversal de uma superfície com diferentes zonas ou camadas, conforme a Figura 2.4.

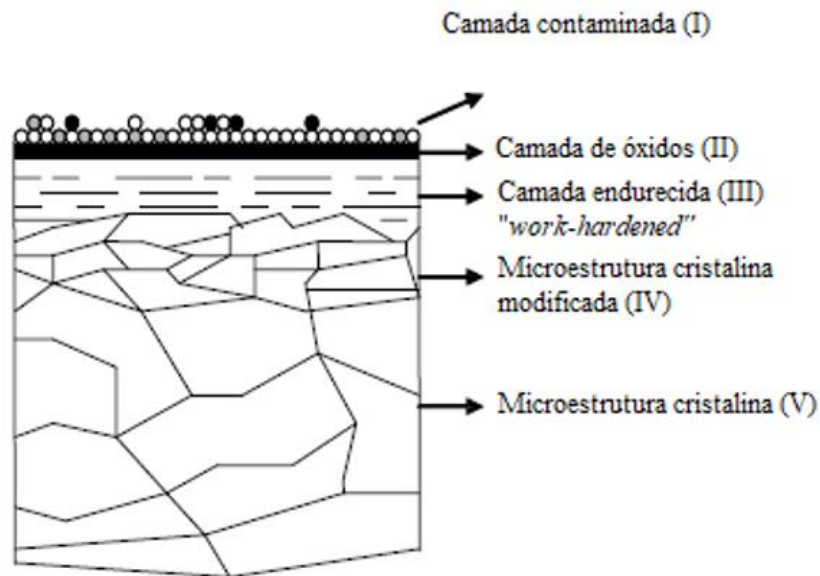


Figura 2.4 - Seção transversal de uma superfície apresentando diferentes zonas ou camadas. Fonte: Adaptado de Takadoum (2008).

Explica-se que: A primeira zona (I) é uma zona de contaminação constituída por uma camada de gases adsorvidos, como vapor de água, hidrocarbonetos e outros poluentes atmosféricos. Esta camada superficial se estende a uma profundidade de alguns nanômetros. A segunda zona (II) é composta de produtos resultantes da interação com o meio ambiente e geralmente consiste de óxidos cuja composição depende tanto do metal base quanto do meio ambiente. A terceira zona (III) corresponde a uma estrutura material que foi significativamente “endurecida pelo trabalho” e onde a matriz cristalina é essencialmente destruída. Esta camada, muitas vezes referida como a camada de Beilby, se estende a uma profundidade de cerca de um micrômetro. A quarta zona (IV) é aquela que foi mecanicamente deformada a partir do acúmulo de tensões residuais. Sua espessura varia de vários micrômetros a várias dezenas de micrômetros. A quinta zona (V) corresponde à estrutura não modificada do material original (TAKADOUM, 2008).

### 2.2.2 Teoria de Hertz

Hertz foi o pioneiro em analisar as tensões e deformações entre dois corpos sólidos em contato. O estudo do contato entre os corpos deu início quando ele ao utilizar lentes de vidro em contato, notou uma franja de interferência entre as lentes. Dessa forma, sugeriu que o contato entre as superfícies das lentes gerava uma deformação elástica devido à pressão entre elas. A Figura 2.5 mostra as franjas de interferência entre lentes, como as notadas por Hertz (JOHNSON, 1985).

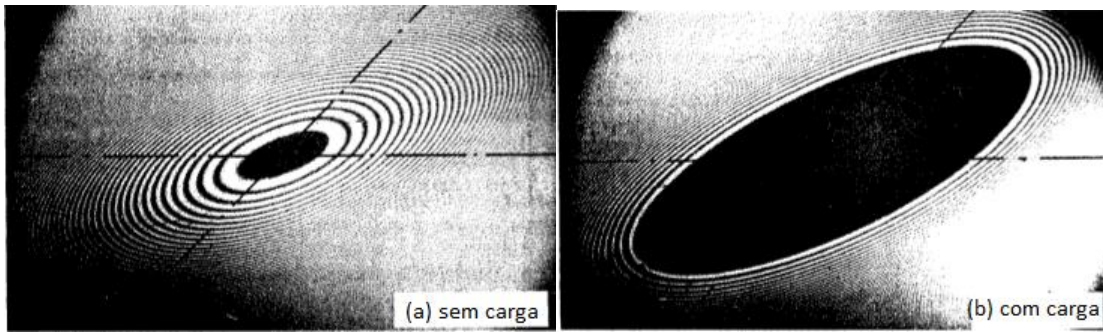


Figura 2.5 - Franjas de interferência no contato de duas lentes cilíndricas iguais com seus eixos inclinados a 45°. (a) sem carga, (b) com carga. Fonte: Adaptado de Johnson (1985).

Quando dois sólidos são colocados em contato, segundo Johnson (1985), eles tocam inicialmente em um único ponto ou ao longo de uma linha. Sob a ação da menor carga, eles se deformam na vizinhança de seu ponto de primeiro contato, de modo que eles se tocam em uma área que é finita, embora pequena, comparada com as dimensões dos dois corpos.

Chen (2014) apresenta o roteiro para cálculo da área de contato, segundo a teoria de Hertz. Supondo duas esferas em contato e raios  $R_1$  e  $R_2$ , respectivamente. A Figura 2.6 ilustra as esferas após o carregamento.

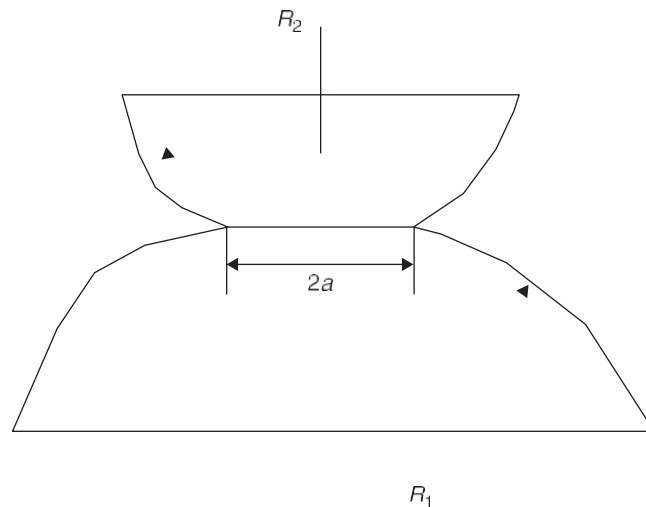


Figura 2.6 - Contato de duas esferas. Fonte: Chen (2014).

Para definir o módulo de elasticidade efetivo envolvendo os módulos de elasticidade e os coeficientes de Poisson,  $E_1$ ,  $E_2$ ,  $\nu_1$  e  $\nu_2$ , a Equação (2.2) é apresentada:

$$E^* = \left[ \frac{(1-\nu_1^2)}{E_1} + \frac{(1-\nu_2^2)}{E_2} \right]^{-1} \quad (2.2)$$

Onde,  $E^*$  é o módulo de elasticidade efetivo,  $E_1$  e  $E_2$  são os módulos de elasticidade do material de cada esfera,  $\nu_1$  e  $\nu_2$ , os coeficientes de Poisson de cada uma das esferas.

O raio de contato,  $a$ , é obtido pela Equação (2.3):

$$a = \left( \frac{3RP}{4E^*} \right)^{1/3} \quad (2.3)$$

Onde  $P$  é a carga e  $R$  é o raio de curvatura, definido por  $R = \left[ \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right]^{-1}$ . Para deformação de contato,  $\delta$ , Chen (2014) apresenta a Equação (2.4):

$$\delta = R1 + R2 - d \quad (2.4)$$

Onde,  $d$  é a distância entre os centros das esferas. Chen (2014) ainda apresenta outra relação para deformação de contato, conforme Equação (2.5):

$$\delta = \frac{a^2}{R} \quad (2.5)$$

Por sua vez, conforme apresentado por Chen (2014), a área de contato é dada por:

$$A = \pi a^2 = \pi R \delta \quad (2.6)$$

Na teoria de Hertz, apresentada por Chen (2014), a suposição é que as duas superfícies em contato não têm atrito, de modo que as tensões de cisalhamento são consideradas subdesenvolvidas na interface. Esta suposição “sem atrito” é frequentemente apropriada para materiais duros onde as forças adesivas são relativamente sem importância.

As asperezas na superfície de sólidos compatíveis, segundo Chen (2014), podem sofrer deformação, e o contato perfeito será provável em uma área maior, conforme Figura 2.7.

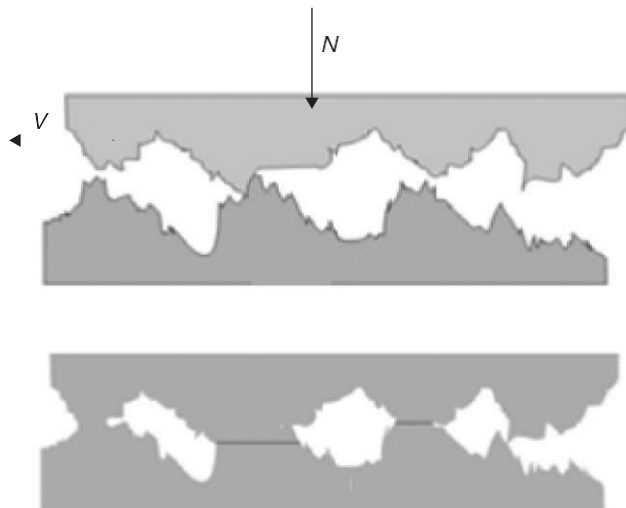


Figura 2.7 - Contato entre superfícies. Fonte: Chen (2014).

Segundo Chen (2014), o contato entre superfícies sólidas é descontínuo e a área real de contato é uma pequena fração da área de contato nominal. As superfícies de contato reais são a soma do contato de aspereza e geralmente são muito menores que a superfície aparente.

## 2.3 Desgaste por deslizamento

Desgaste é definido pela *American Society for Testing and Materials* (ASTM) como a alteração de uma superfície por perda ou deslocamento progressivo de material devido ao movimento relativo entre esta superfície e uma ou mais substâncias de contato. (ASTM G40-15, 2015 Apud BANDEIRA, 2017) .

A resistência ao desgaste depende de diferentes fatores, segundo Berger (2014), tais como: a dureza do material; presença, tamanho e distribuição de partículas duras na microestrutura; tipo, resistência e tenacidade da matriz; e ainda, o mecanismo de desgaste envolvido.

Para Zum Ghar (1987), o desgaste deslizante pode ser caracterizado como um movimento relativo entre duas superfícies sólidas lisas em contato sob carga, onde o dano superficial durante o deslizamento translacional não ocorre por penetrações profundas devidas às asperezas ou partículas estranhas. Muitos parâmetros diferentes de um sistema tribológico estão envolvidos, até certo ponto, no atrito e no desgaste de pares deslizantes.

Para Chen (2014) o atrito está sempre associado ao desgaste. Eles sempre coexistem e ambos são o resultado da fricção entre as superfícies e as interações entre si. O desgaste é o efeito do atrito nas superfícies do material que se friccionam, ocorrendo como resultado da interação entre duas superfícies de contato. O desgaste é, geralmente, associado à perda de material dos corpos em movimento relativo. A formação e remoção de filmes de interface devido ao desgaste podem levar a mudanças substanciais e variação no atrito. Como o atrito, o desgaste é controlado pelas propriedades do material, pelas condições ambientais e operacionais e pela geometria dos corpos em contato. Ainda segundo Chen (2014), dois materiais exibindo o mesmo coeficiente de atrito podem exibir diferentes taxas de desgaste, porque a energia é particionada de maneira diferente entre os materiais e dentro deles.

A rugosidade e a textura da superfície, que dependem do método de fabricação, pertencem às propriedades micro geométricas, enquanto carga, velocidade de deslizamento, vibração, forma e dimensões dos sólidos coincidentes pertencem às propriedades de carga e macro geométricas. As propriedades bioquímicas das superfícies, tais como átomos adsorvidos, quantidade e tipo de filmes de superfície, como óxidos, reatividade química e condutividade térmica e elétrica não são independentes de propriedades ambientais como lubrificantes, umidade, temperatura e pressão da atmosfera. O desgaste por deslizamento é significativamente influenciado pelas propriedades metalúrgicas tais como dureza, estrutura cristalina e ductilidade, que juntamente com a carga aplicada, afetam a área real de contato em uma

determinada temperatura de contato (ZUM GAHR, 1987).

Chen (2014) ao realizar um balanço da energia associada aos processos de atrito e desgaste, aponta que a energia mecânica do deslizamento pode ser convertida em calor, vibrações e som, na deformação do material ou na criação de novas superfícies por fratura. Da mesma forma, pode ser armazenada no material como a energia associada a defeitos microestruturais.

A temperatura da superfície nas áreas de contato, de acordo com Chen (2014), tem uma grande influência no desgaste, nas propriedades do material, na degradação do material, e do lubrificante. O atrito pode não ser suficiente para causar um aumento substancial de temperatura no corpo, mas pode ser suficiente para causar um aumento substancial de temperatura na superfície. O aumento da temperatura da superfície, ainda segundo o autor, pode influenciar a geometria da superfície por meio da expansão térmica, causando pontos altos na superfície, que concentram a carga e levam a desgaste local severo. A temperatura elevada pode levar a mudanças físicas e químicas nas camadas superficiais, que podem levar a transições substanciais em mecanismos de atrito e fenômenos de desgaste.

Fatores que influenciam o mecanismo de desgaste durante o desgaste por deslizamento, segundo Zum Gahr (1987), são apresentados no diagrama da Figura 2.8.

Nos contatos por deslizamento, segundo Zum Gahr (1987), o desgaste pode ocorrer com mecanismos de desgaste por adesão, abrasão, fadiga e/ou triboquímico. Apesar de poder conter os quatro mecanismos de desgaste, ou uma interação entre eles, frequentemente, ainda segundo o autor, os danos superficiais são provocados principalmente por abrasão.

A Figura 2.9 apresenta os mecanismos de desgaste por deslizamento destacados por Zum Gahr (1987).

Cada um dos mecanismos de desgaste, que podem acontecer durante o desgaste por deslizamento, são detalhados separadamente nos Itens 2.3.1, 2.3.2, 2.3.3 e 2.3.4.

(Intencionalmente deixado em branco)

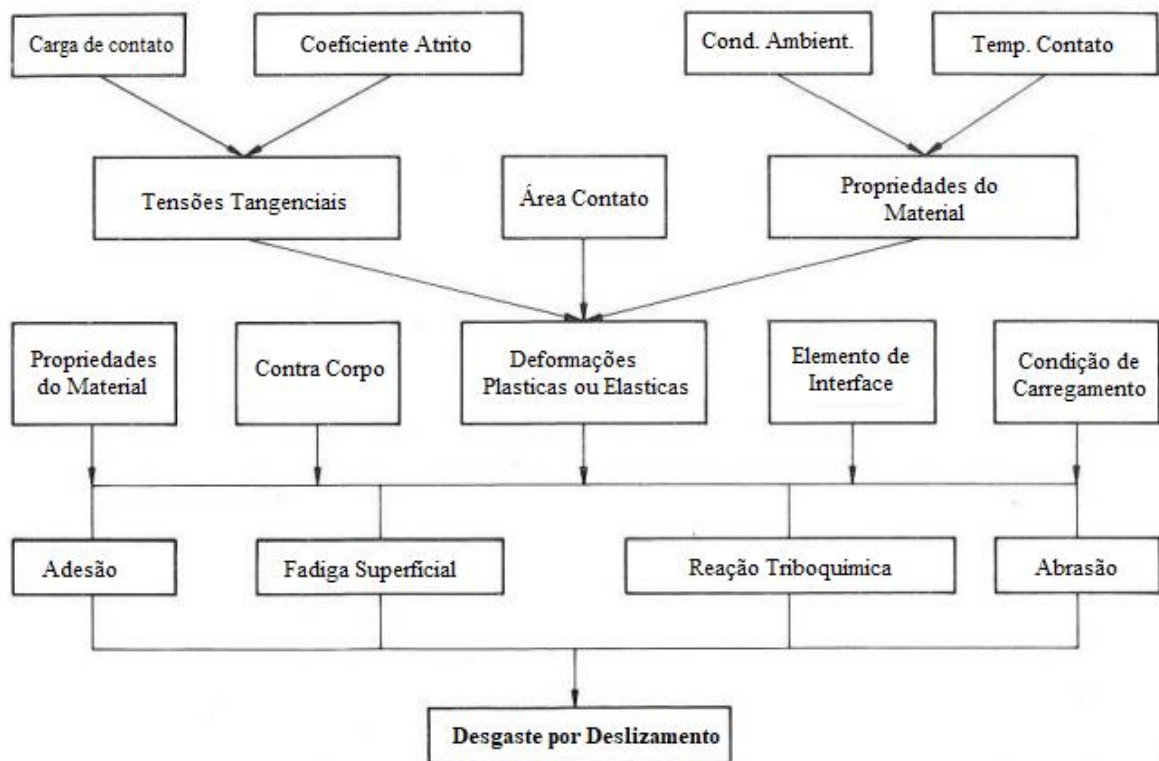


Figura 2.8 - Fatores que influenciam o mecanismo de desgaste durante o desgaste por deslizamento. Fonte: Adaptado de Zum Gahr (1987).

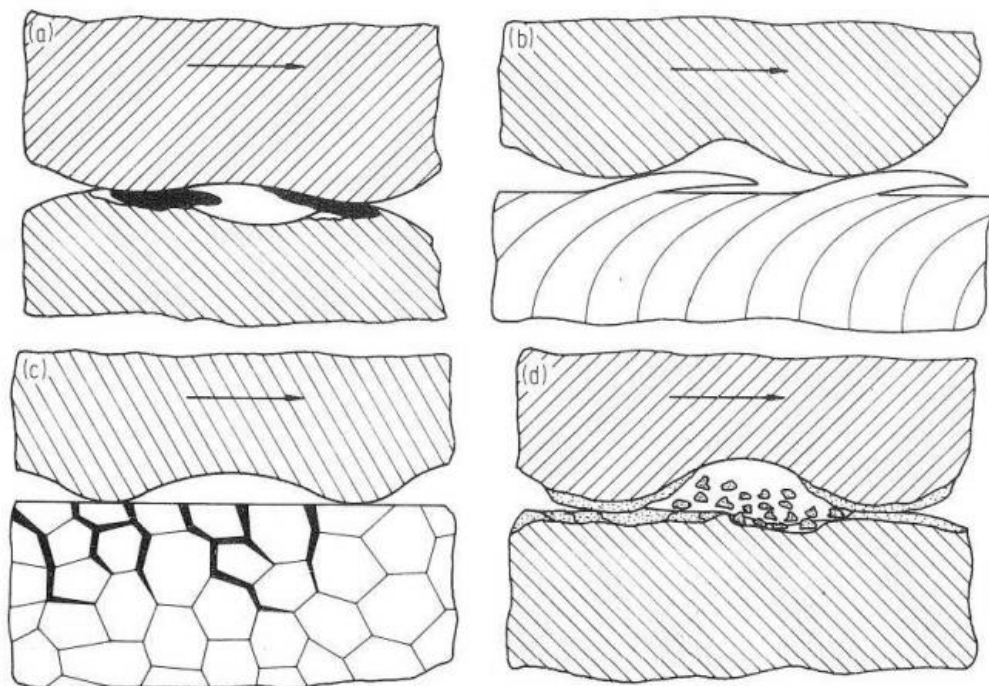


Figura 2.9 - Mecanismos de desgaste por deslizamento: (a) Adesão de junções, transferência de material e sulcos, (b) Fadiga superficial devido à deformação plástica cíclica em sólidos dúcteis, (c) Fadiga superficial que resulta em trincas em sólidos frágeis e (d) reação triboquímica e ruptura dos filmes triboquímicos. Fonte: Zum Gahr, (1987).

Wen e Huang (2018), além da classificação de desgaste geralmente adotada, aponta as seguintes:

- a) **Abrasão**: o efeito do deslizamento na superfície de atrito produz partículas abrasivas e ranhuras longitudinais.
- b) **Pitting**: o dano por fadiga de metal na superfície forma buracos devido às ações repetidas das tensões de contato.
- c) **Peeling**: devido ao reforço da deformação sob a carga, a superfície do metal torna-se quebradiça, gerando microfissuras e fazendo com que materiais se desprendam.
- d) **Scuffing**: por causa do efeito adesivo, a superfície forma pontos adesivos com alta intensidade de conexão, de tal forma que o cisalhamento rompe os pontos, causando sérios desgastes com uma certa profundidade.
- e) **Microdesgaste**: todas as formas de danos acima podem ser vistas sob o microscópio.

Segundo Wen e Huang (2018), embora não seja perfeito, os desgastes por deslizamento geralmente são classificados, como já mencionadas anteriormente, por desgaste adesivo, desgaste abrasivo, desgaste por fadiga e desgaste triboquímico.

Wen e Huang (2018) chamam a atenção para o fato de que os fenômenos reais de desgaste geralmente existem em várias formas diferentes. Após a ocorrência de um tipo de desgaste, outro também pode aparecer. Por exemplo, resíduos de desgaste por fadiga podem causar desgaste abrasivo, e o desgaste abrasivo pode fazer com que a superfície limpa forme um desgaste triboquímico ou adesivo. No atrito, ainda segundo o autor, o desgaste adesivo, o desgaste triboquímico, o desgaste abrasivo e o desgaste por fadiga ocorrem ao mesmo tempo.

### 2.3.1 Desgaste adesivo

O desgaste adesivo, ilustrado pela Figura 2.10, segundo Takadoum (2008), é caracterizado pelo aparecimento de junções (ou micro ligas) entre as superfícies sujeitas ao atrito. Quando essas junções são fracas, o cisalhamento ocorre na interface das duas superfícies e não há desgaste. No entanto, ainda segundo o autor, quando as junções são fortes, o material mais macio é sujeito a cisalhamento e, como consequência, é transferido para o material mais duro.

Na Figura 2.10,  $F_n$  representa a força normal, e  $V$  a velocidade relativa entre as superfícies.

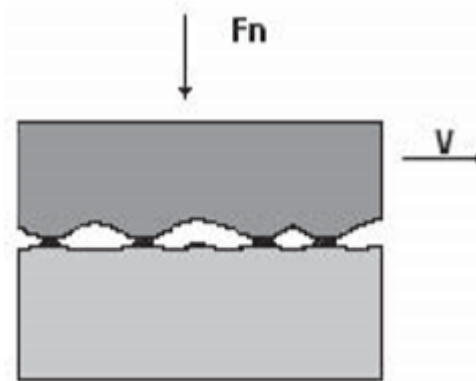


Figura 2.10 - Desgaste adesivo. Fonte: Takadoum (2008).

O "fenômeno da adesão", segundo Zum Gahr (1987), é importante para entender a transferência de carga tangencial, que é a força de atrito, entre superfícies muito lisas. Forças de superfície envolvidas na adesão podem ser efetivas apenas em distâncias muito curtas, de até cerca de 3 nm. Assim, ainda segundo o autor, para uma forte adesão, torna-se necessário o crescimento da área real de contato durante o deslizamento. Um filme superficial, mesmo que fino, pode reduzir substancialmente as forças de adesão.

A área de contato entre as superfícies, de acordo com Wen e Huang (2018), é de grande relevância neste tipo de desgaste. Ainda segundo Wen e Huang (2018), uma dependência de escala da força de atrito foi modelada por Hurtado e Kim (1999), chamada modelo HK, usando um modelo de deslocamento micromecânico de deslizamento de atrito entre duas superfícies para uma ampla gama de raios de contato. De acordo com o modelo HK, a área de contato entre as superfícies, está diretamente relacionada com as forças de atrito, que também dependem das tensões de cisalhamento até uma determinada área de contato crítica. A partir desta determinada área de contato crítica, após uma transição que ocorre com aumento da área de contato e progressiva redução da tensão de cisalhamento, a força de atrito se torna independente da área de contato.

Wen e Huang (2018), esclarecem ainda, que ao considerar o contato real de uma fricção com lubrificante, diferente da teoria de Hertz, a área de contato elástica é geralmente uma elipse.

### 2.3.2 Desgaste abrasivo

O desgaste abrasivo, ilustrado pela Figura 2.11, segundo Takadoum (2008), ocorre quando um material duro é colocado em contato com um material macio. Este tipo de desgaste pode causar riscos, ranhuras e levar à remoção de material.

Na Figura 2.11,  $F_n$  representa a força normal, e  $V$  a velocidade relativa entre as superfícies.

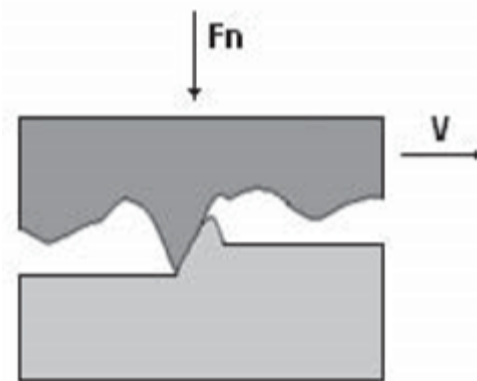


Figura 2.11 - Desgaste abrasivo. Fonte: Takadoun (2008).

Qiu *et al.* (2017) apresentam três tipos de desgaste abrasivo:

- a) Partículas abrasivas externas se movem entre duas superfícies deslizantes, que é semelhante à retificação e podem ser conhecidas como desgaste abrasivo de três corpos. Em geral, uma tensão de contato extremamente alta pode ser causada entre as partículas abrasivas e as superfícies de metal no desgaste de três corpos, que geralmente está além da força de esmagamento das partículas abrasivas. A tensão de compressão poderá levar a deformações plásticas e fadiga na superfície de metais dúcteis e trincas ou lascas em superfície de metais frágeis (QIU *et al.* 2017).
- b) Uma partícula abrasiva se move ao longo de uma superfície sólida para produzir desgaste superficial, o que é chamado de desgaste abrasivo de dois corpos. Se uma partícula abrasiva se move na direção paralela a uma superfície sólida, a tensão de contato na superfície é baixa, de tal modo que riscos ou pequenos sulcos aparecem na superfície. Se a partícula abrasiva se mover na direção perpendicular à superfície sólida, o desgaste causado é referido como desgaste por impacto. Em tal situação, a partícula colide com a superfície em alta tensão, de tal modo que riscos profundos poderão ser produzidos na superfície e grande quantidade de material poderá ser retirado da superfície (QIU *et al.* 2017).
- c) Em um par de fricção, onde um pico duro de uma das superfícies atua como uma partícula abrasiva na outra superfície, também é conhecido como desgaste abrasivo de dois corpos (QIU *et al.* 2017).

O desgaste abrasivo, para Wen e Huang (2018), é a forma mais comum de desgaste. Segundo estatísticas, cerca de metade da perda total devido a danos por desgaste é causada pelo

desgaste abrasivo. A dureza relativa do material das partículas abrasivas, carga e velocidade de deslizamento são peças importantes no desgaste abrasivo.

Já para Wen e Huang (2018), os mecanismos de desgaste abrasivo podem ser classificados como:

- a) **Micro corte:** As partículas abrasivas são pressionadas contra a superfície pela carga normal e a força de atrito pode gerar micro cortes na superfície.
- b) **Desbaste por compressão (*Squeezed spalling ou pressed spall*):** As partículas abrasivas sob a ação da carga são pressionadas na superfície de atrito e deixam entalhes.
- c) **Danos por fadiga:** A superfície, sob a ação da pressão de contato cíclico da partícula abrasiva, sofre dano por fadiga.

### 2.3.3 Desgaste por fadiga

Segundo Wen e Huang (2018), as cavidades formadas em superfícies submetidas a deslizamento e sob a ação de tensões cíclicas de contato são conhecidas como desgaste por fadiga superficial ou desgaste por fadiga de contato. Para Wen e Huang (2018) e Qiu *et al.* (2017), rolamentos e engrenagens falham principalmente por este tipo de desgaste. Micro desgaste causado pela variação de tensão devido à rugosidade, segundo Wen e Huang (2018), também pertence ao desgaste por fadiga. No entanto, ainda segundo os autores, a microfadiga de superfície ocorre em geral, apenas no amaciamento.

Em geral, o desgaste por fadiga superficial não pode ser evitado mesmo sob a condição de boa lubrificação (QIU *et al.*, 2017).

Para Takadoun (2018), em consequências das tensões introduzidas nas camadas superficiais do material, micro trincas paralelas à superfície se desenvolvem dentro do material. Quando atingem um tamanho crítico, geram detritos semelhantes a flocos, conforme Figura 2.12.

Na Figura 2.12,  $F_n$  representa a força normal, e  $V$  a velocidade relativa entre as superfícies.

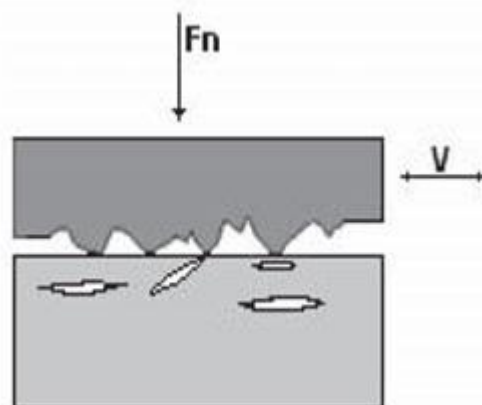


Figura 2.12 - Desgaste por fadiga. Fonte: Takadoun (2008).

Segundo Wen e Huang (2018), tem-se o desgaste por fadiga superficial (*Superficial Fatigue Wear*), e o desgaste por fadiga iniciado na superfície (*Surface Fatigue Wear*). A fadiga superficial começa a partir de uma trinca no interior do material devido à concentração de tensão. A trinca se inicia normalmente a uma profundidade típica de cerca de 0,3 mm da superfície, onde a tensão máxima de cisalhamento está localizada. Após o início da trinca, ela se propaga paralelamente à direção de rolagem, em seguida, se ramifica e propaga para a superfície. O tempo de formação da trinca por fadiga é curto, mas a propagação é lenta. O desgaste por fadiga superficial é geralmente o principal tipo de falha de rolamentos. Já a fadiga iniciada na superfície, ainda segundo os autores, ocorre principalmente em aço de alta qualidade, quando submetidos a fricção. A trinca se origina a partir da concentração de tensão na superfície, como em marcas de revoluções, marcas de impacto, ou outras marcas de desgaste. Em seguida, a trinca se propaga ao longo da direção de deslizamento da superfície para a parte interna em um ângulo de 20 a 40 graus até uma certa profundidade, depois se ramificam e formam as endentações. O tempo de formação da trinca de desgaste é muito longo, mas a taxa de propagação é muito rápida. Os autores apontam ainda, que esses dois tipos de desgaste por fadiga geralmente existem ao mesmo tempo.

De acordo com a forma dos resíduos de desgaste e do desgaste por fadiga, são divididos em dois tipos: *pitting* e descascamento. Wen e Huang (2018) classificam como “*pitting*” e “*peeling*”, já Qiu *et al.* (2017) classifica como “*pitting*” e “*spalling*”. Embora utilizem nomenclaturas diferentes, ao descrever cada tipo de fadiga, convergem para as mesmas descrições. Os resíduos do *pitting* são em sua maior parte partículas em forma de leque (*fan-shaped*) e há muitos buracos (*pits*) pequenos e profundos na superfície, enquanto que no descascamento tem-se resíduos de desgaste na forma de farpa e os buracos são grandes e rasos, conforme Figura 2.13.

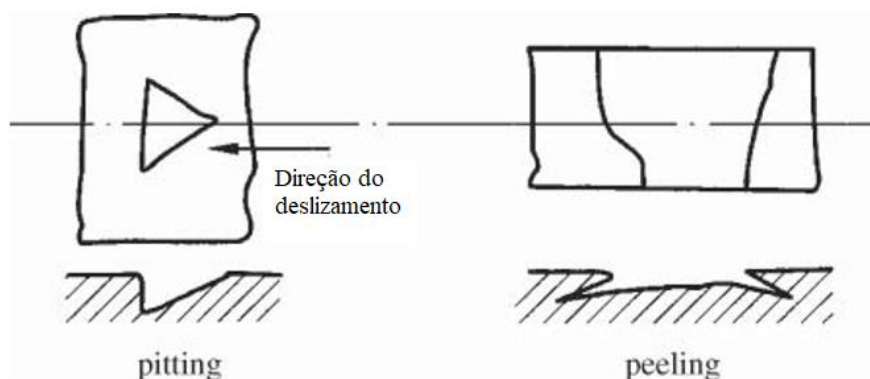


Figura 2.13 - Tipos de desgaste por fadiga de superfície. Fonte: Wen e Huang (2018).

A força de atrito da superfície de contato, segundo Wen e Huang (2018), tem uma influência significativa no desgaste por fadiga. A força de atrito aumenta o desgaste por fadiga de contato porque, sob a ação da força de atrito, a tensão de cisalhamento máxima tende a se mover para cima em direção à superfície. Ainda segundo os autores, isso aumenta a possibilidade de iniciação de trincas. Além disso, a força de atrito faz com que as tensões normais de tração promovam um rápido crescimento das trincas.

Fadiga de superfície, segundo Qiu *et al.*, (2017), pode ser induzida pela temperatura de fricção. Se a tensão da área de contato real for muito alta, deformações plásticas da superfície e alta temperatura são causadas. Em tais condições de temperatura e tensão, a organização do metal na área de contato será alterada, acarretando a dilatação da superfície. Com isso, ainda segundo o autor, trincas na camada superficial podem se tornar mais evidentes, tornando-se mais suscetível a formação de *pitting*, inclusive na presença de lubrificante.

De acordo com Qiu *et al.* (2017), resultados experimentais mostram que, com o aumento da viscosidade, o desgaste por fadiga é reduzido. Que aditivos adequados ao óleo ou lubrificantes sólidos também podem melhorar a resistência ao desgaste por fadiga. Aponta ainda a forte influência do teor de água do lubrificante na resistência ao desgaste por fadiga. No entanto, Wen e Huang (2018) aponta controvérsias sobre o tema, tratando de pontos de vista que diferem no mecanismo de influência da viscosidade no desgaste por fadiga. Geralmente, considera-se que o aumento da viscosidade do lubrificante pode melhorar a vida de fadiga devido à formação de um filme elastohidrodinâmica, que pode reduzir as interações entre as asperezas. No entanto, ainda segundo Wen e Huang (2018), este ponto de vista não pode explicar o fato de que a laminação não lubrificada não causa desgaste por fadiga, mas se óleo for adicionado, o desgaste por fadiga de contato ocorrerá rapidamente.

### 2.3.4 Desgaste Triboquímico

O desgaste triboquímico, segundo Takadoun (2008), ilustrado pela Figura 2.14, é um fenômeno que envolve o crescimento de um filme de produtos de reação devido às interações químicas entre as superfícies em contato e com o ambiente ao seu entorno. Uma das formas mais comuns de desgaste químico é o desgaste da tribo-oxidação. O aumento da temperatura devido ao atrito, ainda segundo o autor, acelera o crescimento de um filme de óxido que se desprende na superfície quando atinge uma certa espessura crítica. Os resíduos gerados podem contribuir com o processo de desgaste ou serem eliminados.

Na Figura 2.14,  $F_n$  representa a força normal, e  $V$  a velocidade relativa entre as superfícies.

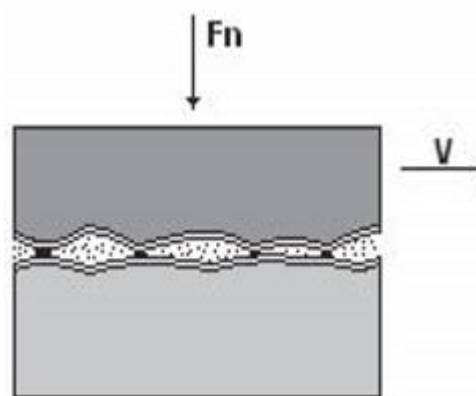


Figura 2.14 - Desgaste triboquímico. Fonte: Takadoun (2008).

Para Chen (2014), filmes de óxido podem se formar na superfície dos metais, produzindo uma camada limite. Sua espessura pode variar de alguns átomos a uma fração de um micrômetro. As camadas limites geralmente têm menor resistência ao cisalhamento do que o sólido original. O filme, ainda segundo o autor, se forma mais facilmente em superfícies ásperas, podendo existir em estado sólido, em baixa viscosidade ou no estado fluido. O filme formado na interface tem efeitos substanciais no atrito.

Wen e Huang (2018), acrescentam que no processo de atrito, o dano superficial causado pela reação química ou eletroquímica dos metais de superfície de atrito e do meio podem ser classificados como desgaste por oxidação e desgaste por corrosão.

No desgaste por oxidação, segundo Wen e Huang (2018), que acontece em um meio oxidante, o filme de óxido de superfície pode ser desgastado e um novo filme de óxido pode se formar rapidamente. O desgaste por oxidação e o desgaste mecânico ocorrem alternadamente. Se o filme de óxido for resistente, ou a taxa de oxidação for maior do que a taxa de desgaste, o filme de óxido pode desempenhar o papel de antiatrito e proporcionar resistência ao desgaste.

Os fatores que afetam o desgaste por oxidação incluem a carga de contato, a velocidade relativa do deslizamento, a temperatura, a dureza do filme de óxido, o meio, as condições de lubrificação e as propriedades do material.

O desgaste por corrosão, segundo Qiu *et al.* (2017), é causado pela ação entre as superfícies de metal e o meio. O mecanismo do desgaste por corrosão é semelhante ao desgaste da oxidação, mas com desgaste mais profundo e maior perda de material. Os resíduos presentes são grânulos e filamentos. São compostos do metal da superfície e do meio. Além do cuidado na seleção do óleo lubrificante, o material submetido a deslizamento também é um fator importante na taxa de desgaste por corrosão.

## 2.4 Lubrificantes e aditivos de extrema pressão

Lubrificantes são utilizados para um bom funcionamento e na preservação de componentes mecânicos como rolamentos, engrenagens, correntes, sistemas hidráulicos, dentre outros. Estão presentes em diversos setores, como na indústria alimentícia, automotiva, siderúrgica, mineração, cimento, dentre outras. Cada setor industrial tem suas particularidades com relação a velocidade, temperatura, carga e contaminantes. Logo, diferentes tipos de lubrificantes, que atendam às suas demandas específicas, levam fornecedores de lubrificantes a desenvolverem um grande número de lubrificantes.

Dentro desta grande quantidade de lubrificantes disponíveis, alguns são destinados para aplicação em condições de extrema pressão, nas quais componentes mecânicos são expostos a grandes tensões de contato. São voltados para o uso em caixas de engrenagens veiculares, redutores industriais, mancais de rolamento e deslizamento, dentre outras aplicações. Na sua maioria, são óleos lubrificantes com formulações para extrema pressão, contudo, também são comercializados aditivos voltados para controle do atrito e desgaste. São aditivos antidesgaste, antiatrito ou condicionadores de metais. Em inglês, *anti-wear* ou *anti-friction metal conditioner*.

O objetivo da lubrificação, para Qiu *et al.* (2017), é formar um filme de lubrificante com menor resistência ao cisalhamento entre as superfícies de fricção. Os filmes de lubrificação podem ser líquidos, gasosos ou sólidos.

Se a lubrificação hidrodinâmica ou elastohidrodinâmica não puder ser realizada, a adição de lubrificante contendo alguns aditivos nas superfícies pode reduzir o atrito e o desgaste. Isso é chamado de lubrificação limite, com filmes lubrificantes de menos de 0,1  $\mu\text{m}$ . A lubrificação limite é importante porque é amplamente aplicada a máquinas e equipamentos reais. Mesmo

que uma máquina trabalhe sob condições de lubrificação hidrodinâmica, a lubrificação limite pode ainda existir, como durante a partida, parada, sobrecarga ou defeitos (WEN e HUANG, 2018).

Wen e Huang (2018) apontam ainda que a lubrificação limite não é bem compreendida. Já que é muito difícil estudar e analisar as propriedades de um filme de lubrificação de bordas muito finas, mesmo sob condições de laboratório. Ainda segundo os autores, existem muitos fatores incontroláveis, como propriedades de superfície (geométricas, físicas e químicas), a composição do lubrificante e as condições ambientais (oxigênio, temperatura, umidade, etc.) podem afetar os resultados. Geralmente, existem vários tipos diferentes de mecanismos de lubrificação que interagem entre si, o que torna a pesquisa da lubrificação limite mais complicada. E com isso, não há uma teoria bem aceita, e sua aplicação ainda depende de experimentos.

Para Martins (1995), um parâmetro importante a ser analisado em lubrificação limite é a viscosidade, visto que é por conta dela que se define a espessura de filme lubrificante e a capacidade de carga. Contudo, no caso de superfícies que trabalham em condições extremas, o controle da viscosidade não dispensa a necessidade de aditivos com propriedades químicas específicas para garantir uma espessura mínima da película lubrificante para prevenir o desgaste.

A estabilidade do lubrificante é outro ponto relevante de acordo com Wen e Huang (2018). Na lubrificação, a oxidação faz com que o lubrificante se deteriore e reduza significativamente a vida útil. Portanto, é necessária uma boa estabilidade de um lubrificante. Se a temperatura exceder o limite máximo permitido, a oxidação é acelerada. Ainda segundo o autor, outros requisitos para um lubrificante incluem as capacidades de resfriamento, vedação, anticorrosão, remoção de cavacos, segurança contra incêndios e compatibilidade com o meio ambiente. Tudo dependendo da sua aplicação.

Quatro formas básicas de lubrificação, em condições extremas, são apresentadas por Stachowiak e Batcheor (2000): (i) a formação de uma camada ultraviscosa perto da superfície desgastada, (ii) a blindagem de uma superfície de metal oxidada por uma camada monomolecular de surfactantes lineares adsorvidos, (iii) a separação das superfícies de contato por camadas retidas de detritos finamente divididos e talvez amorfos e (iv) a supressão do contato metal com metal sob pressões extremas pela formação de filmes sacrificantes do produto da oxidação/corrosão, dependendo da temperatura, em superfícies metálicas desgastadas.

Sob condições de alta velocidade, carga pesada e temperatura média, segundo Wen e

Huang (2018), os aditivos de pressão extrema, como enxofre, fósforo e cloro, podem reagir rapidamente com as superfícies metálicas para gerar um filme espesso. Um filme, com uma alta temperatura de fusão, baixa resistência ao cisalhamento e forte ligação com a superfície do metal, pode proteger a superfície contra o desgaste adesivo. Ainda segundo o autor, durante o deslizamento, se o filme de reação tiver sido desgastado, um novo será rapidamente formado para impedir que as duas superfícies entrem em contato. Esse mecanismo apresentado por Wen e Huang (2018) é ilustrado pela Figura 2.15.

As asperezas são capazes de deslizar umas sobre as outras com o mínimo de danos e desgaste, enquanto o material do filme é destruído pelo cisalhamento que inevitavelmente ocorre. Se este mecanismo falhar, ocorre a aderência da aspereza e desgaste severo. O modelo de lubrificação por um filme de sacrifício, apresentado por Stachowiak e Batcheor (2000), é ilustrado na Figura 2.15.

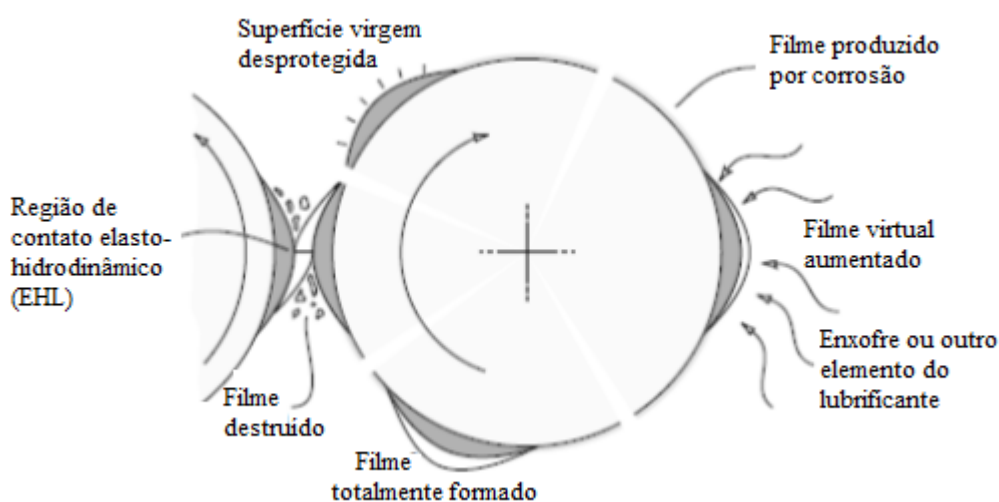


Figura 2.15 - Modelo de lubrificação por filme de sacrifício. Fonte: Adaptado de Stachowiak e Batcheor (2000).

Os lubrificantes de extrema pressão contêm aditivos que, no caso de ocorrer o rompimento da película do lubrificante, o aditivo entra em ação reagindo com as superfícies metálicas, de forma que esta reação forme uma nova película que previne o desgaste. (TRAJANO, 2013).

Segundo Wen e Huang (2018), um filme de reação química é muito mais estável que um filme de adsorção. Seu coeficiente de atrito está entre 0,10 e 0,25. Precisam ter uma certa espessura para ter bom desempenho. Normalmente, sua espessura é entre 1 e 10 nm. Dependem também da força de adesão. Se um filme de reação se prende firmemente com as superfícies de metal, ele pode proteger as superfícies contra o desgaste, caso contrário, aumenta a corrosão do metal. Ainda segundo o autor, se as propriedades químicas dos aditivos são bastante ativas, ele facilmente corrói o metal. Portanto, a quantidade e o tipo de aditivo devem ser selecionados com base nos materiais de fricção e nas condições de trabalho.

Garcia (2014), afirma que existe uma diferença crucial entre os filmes de FM (modificador de atrito) e AW / EP (antidesgaste / extrema pressão), que são suas propriedades mecânicas. Os filmes lubrificantes oriundos dos modificadores de atrito (FM) são construídos em matrizes de ordem e forma compacta de múltiplas camadas moleculares, livremente aderidas entre si com uma cabeça polar ancorada na superfície do metal. As camadas externas podem ser facilmente cisalhadas, resultando em um baixo coeficiente de atrito. Já os filmes AW / EP são depósitos semiplásticos que são difíceis de se remover por cisalhamento, tornando o coeficiente de atrito geralmente de moderado a alto.

Segundo Wen e Huang (2018), com o uso de aditivos de extrema pressão, a capacidade antidesgaste de um lubrificante normalmente aumenta de 2 a 4 vezes, podendo ser maior que 10 vezes. A pesquisa sobre os aditivos de extrema pressão vem se desenvolvendo rapidamente. Na China, ainda segundo o autor, uma variedade de aditivos de extrema pressão vem sendo desenvolvidos.

Para Ermakov (2018), a prática moderna do uso de lubrificantes mostra que o desgaste das superfícies em contato não está necessariamente relacionado à lubricidade, uma vez que é frequentemente causado por outros fatores. A elevação de temperatura na zona de contato, por exemplo, reduz a viscosidade do lubrificante e a espessura do filme lubrificante e pode resultar na ruptura do filme limite. Por esta razão, ainda segundo o autor, ao determinar a eficiência da lubrificação, é necessário antes de tudo levar em conta as peculiaridades dos processos físico-químicos que ocorrem na área de fricção entre os sólidos e resultam em efeitos integrais, isto é, na efetiva lubrificação.

Wen e Huang (2018) tratam do efeito de alguns aditivos usados na produção de filmes químicos. Alguns que além das propriedades de extrema pressão comum aos compostos de enxofre e fósforo, também introduzem compostos polares de cadeia longa para melhorar as propriedades de oleosidade, capacidade antiferrugem e antioxidação. Outros reagem com metais para formar ligas de baixo ponto de fusão, com objetivo de suavizar a superfície do metal.

Ainda segundo Wen e Huang (2018), deve-se combinar a relação entre o aditivo de extrema pressão e um agente de oleosidade. O coeficiente de atrito de um lubrificante contendo agentes de oleosidade abaixo de uma temperatura crítica é baixo. No entanto, quando a temperatura excede a temperatura crítica, o atrito e o desgaste aumentam acentuadamente. Por outro lado, o coeficiente de atrito de um lubrificante contendo alguns aditivos de extrema pressão é relativamente alto abaixo da temperatura de reação química, mas fica baixo acima de uma determinada temperatura. Com a combinação entre estes aditivos, o coeficiente de atrito pode

ser mantido estável em baixas e altas temperaturas. Deve-se também, ainda segundo o autor, se atentar ao material das superfícies metálicas com os aditivos. Os aditivos de extrema pressão são corrosivos para metais. A liga de cobre, por exemplo, sofre com o enxofre. Ainda segundo Wen e Huang (2018), deve-se ter cuidado com a quantidade de aditivos de extrema pressão, que deve ser limitada.

Uma tecnologia de auto reparo é apresentada por Wen e Huang (2018). A partir do uso de aditivos especiais em um lubrificante, nano partículas de cobre podem ser usadas como aditivo para reparar superfícies desgastadas sob a condição de atrito. Nanopartículas de outros metais ou ligas metálicas, ainda segundo o autor, podem alcançar o mesmo mecanismo. Sob certas condições de temperatura e pressão, a superfície sofre fricção intensiva e deformação plástica durante um processo de fricção. As nanopartículas adsorvidas na superfície de atrito interagem com a superfície deformada plasticamente. Wen e Huang (2018) explicam que se a temperatura da superfície for alta o suficiente, a concentração de nanopartículas diminui para formar um filme com as partículas microscópicas da superfície do metal, preenchendo os micro vales da superfície original com um filme de reparado.

Por fim, Stachowiak e Batcheor (2000) afirmam que é possível descrever como um aditivo específico funciona em termos de atrito e controle de desgaste. No entanto, que a previsão do desempenho do lubrificante a partir da especificação química ainda não é possível e isso se restringe a testes de aplicações específicas.

A partir do conhecimento dos principais tópicos e definições necessários nesta dissertação, parte-se para a metodologia deste trabalho.

## Capítulo 3

### MATERIAIS E MÉTODOS

Este capítulo contém a descrição dos materiais, dos lubrificantes, dos aditivos, da bancada de testes, dos instrumentos de medição, e dos equipamentos utilizados em todo o processo de ensaio e análise dos experimentos.

#### 3.1 Bancada de ensaios

A bancada de ensaios, vista na Figura 3.1, tem por finalidade submeter corpos de prova a desgaste por deslizamento.

Os dados do motorreductor utilizado na bancada, Figura 3.1, assim como rotação de saída e velocidade de deslizamento são apresentados na Tabela 3.1, a seguir.

Tabela 3.1 - Equipamento utilizado nos ensaios.

<b>Descrição</b>	<b>Valores</b>
Motorreductor, com motor monofásico	0,5 cavalos
Rotação de saída do reductor	5,5 Hz
Diâmetro da pista interna, submetida à fricção	28,5 mm
Diâmetro da esfera, parte fixa submetida à fricção	8 mm
Velocidade de deslizamento	0,49 m/s

As cargas aplicadas durante os ensaios são as mesmas para os ensaios apresentados na Tabela 4.2, do Capítulo 4, sendo de 554,2 N (56,50 kgf) para os 2 minutos iniciais, e de 1.736,4 N (177 kgf) por mais 13 minutos. Ensaio preliminares, apresentados na Tabela 4.1, receberam carga constante do início ao fim dos ensaios, que foi de 1.491,1 N (152 kgf), por 30 minutos.

O lubrificante utilizado durante cada ensaio é depositado em um reservatório que banha a

pista interna do rolamento submetido à fricção.

Detalhes da bancada de ensaios são apresentados na Figura 3.1.



Figura 3.1 - Bancada de ensaios: 1-Coletor de vibrações Vibexpert II; 2-Sistema utilizado para monitorar temperatura do óleo; 3- Câmera Termográfica FLIR E40; 4- Motorreductor; 5- Carga; 6- Peças submetidas a desgaste e reservatório de óleo; 7- Zoom do reservatório de óleo e 8- Zoom da amostra submetida a desgaste.

Um diagrama dos parâmetros monitorados durante os ensaios, e análises realizadas são ilustrados no diagrama da Figura 3.2.

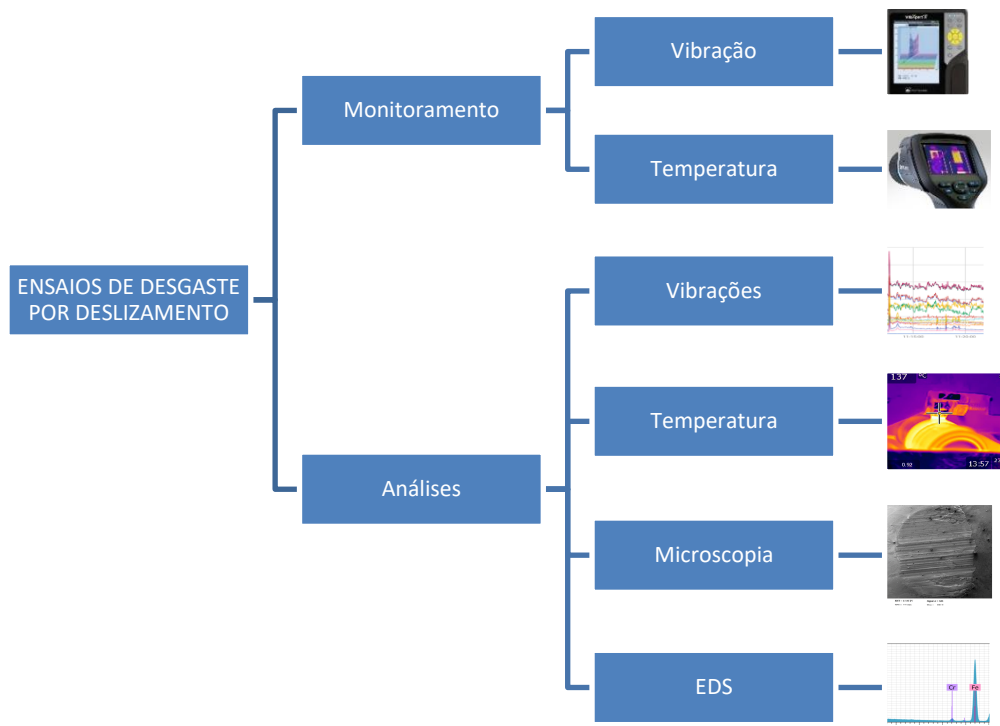


Figura 3.2 - Diagrama dos parâmetros monitorados e análises realizadas.

Durante os ensaios de desgaste por deslizamento dados de temperatura e vibrações são registrados. Em seguida, estes dados são processados no software de análise Ominitrend, exportados para uma planilha. As esferas são submetidas a análise de microscopia onde a área desgastada é registrada. Algumas amostras são submetidas a análise de microscopia e EDS no MEV.

### 3.2 Materiais utilizados

Com objetivo de garantir a padronização das amostras submetidas à fricção, foram utilizados como corpos de prova, componentes de rolamentos novos UC204, Figura 3.3, todos de um mesmo fabricante.



Figura 3.3 - Rolamento UC204.

Pistas internas, com diâmetro de 28,5mm na região submetida a deslizamento, e esferas, com diâmetro de 8 mm, dos rolamentos UC204 foram aproveitadas nos ensaios. Vistos com mais detalhes na Figura 3.4.

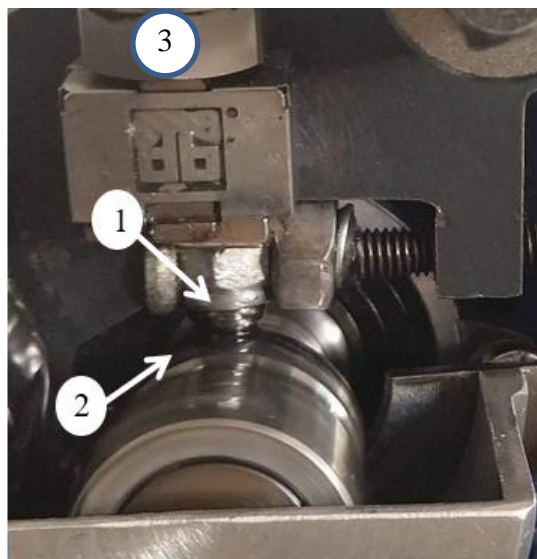


Figura 3.4 - Amostras submetidas a fricção: 1 - Parte fixa, esfera do rolamento UC204; 2- Parte móvel, pista interna do rolamento UC204; 3- Acelerômetro Pruftechnik VIB 6.142R.

Uma imagem que permite visualizar mais componentes do equipamento está na Figura 3.5, a seguir.

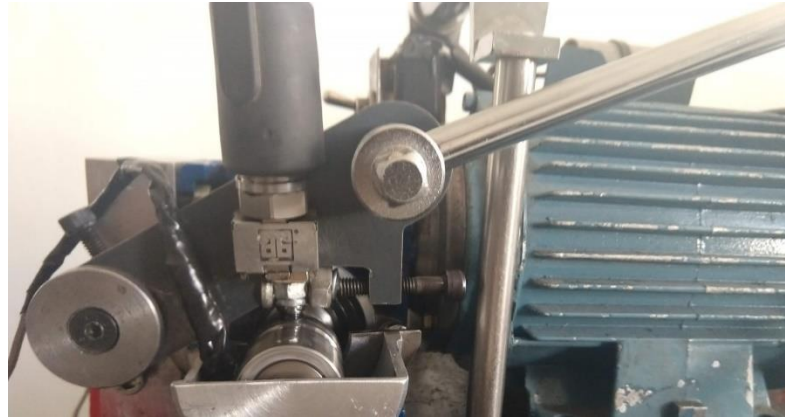


Figura 3.5 - Bancada de ensaio.

Na Figura 3.6 pode-se observar a esfera do rolamento UC204 submetida à fricção, lubrificada a óleo.

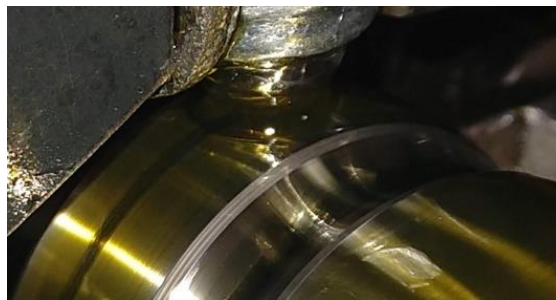


Figura 3.6 - Elementos submetidos a desgaste.

Para realização dos ensaios utilizou-se os seguintes óleos lubrificantes:

- Óleo mineral SAE 80 GL-4;
- Óleo mineral SAE 90 GL-5;
- Óleo SAE 10W30 semissintético.

Os óleos SAE 80 GL-4 e SAE 90 GL-5 são formulados para condição de extrema pressão, de acordo com seus fabricantes. O óleo SAE 10W30 não se destina à condição de extrema pressão.

Utilizaram-se três diferentes tipos de aditivos, aqui denominados:

- Aditivo A;
- Aditivo B;
- Aditivo C.

Os aditivos aplicados são antidesgaste, antiatrito ou condicionadores de metais, em inglês, *anti-wear* ou *anti-friction metal conditioner*.

### 3.3 Equipamentos de monitoramento utilizados durante os ensaios

Para monitoramento da temperatura e vibração durante os ensaios utilizaram-se os equipamentos apresentados a seguir.

O coletor de vibrações utilizado foi o Vibexpert II, Figura 3.7, da Pruftechnik que possui faixa de medição de 0 Hz a 40 kHz, com até 102.000 linhas de resolução.

Utilizou-se um acelerômetro VIB 6.142R, com frequência natural de 36 kHz e massa de 39 g. Fixado por base magnética, conforme Figura 3.4.



Figura 3.7 - Coletor de vibrações Vibexpert II. Fonte: Pruftechnik.

A câmera termográfica utilizada durante os ensaios foi a Flir E40, Figura 3.8, de aplicação industrial, com resolução de 19.200 pixels infravermelhos, faixa de temperatura de - 20 °C a 650 °C e controle de foco manual.



Figura 3.8 - Câmera termográfica Flir E40. Fonte: Flir.

Para monitoramento do óleo durante os ensaios foi utilizado um sensor de temperatura e placa *Arduino*® Nano, conforme Figura 3.9.

As temperaturas obtidas por meio desta placa são validadas pelas obtidas com a câmera termográfica Flir E40, que possui certificado de calibração.



Figura 3.9 - Sensores de temperatura.

### 3.4 Equipamentos utilizados para análise da superfície do desgaste

Para medição da área de desgaste, utilizou-se o Estereoscópio Olympus SZ61, do laboratório de materiais da Universidade Federal de Itajubá, Figura 3.10.

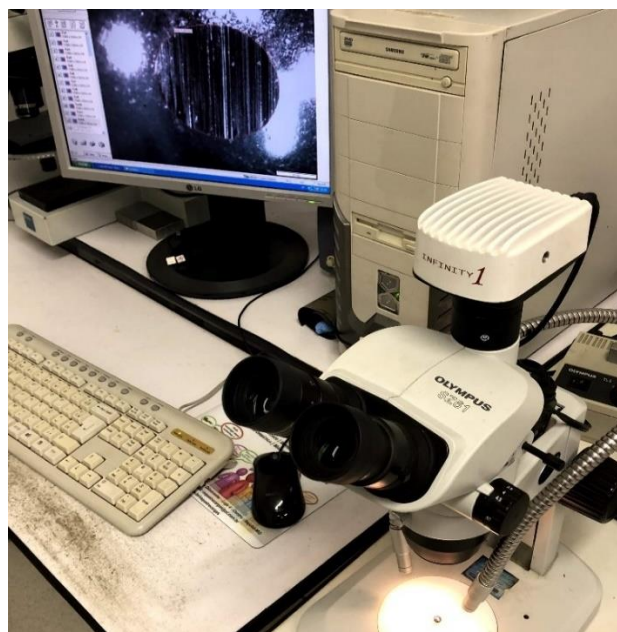


Figura 3.10 - Estereoscópio Olympus SZ61.

Para verificação da superfície desgastada, utilizou-se a microscopia eletrônica de varredura, com equipamento EVO MA15, marca ZEISS, detector BRUKER XFlash 6 | 10, da Universidade Federal de Itajubá, Figura 3.11.



Figura 3.11 - Microscópio Eletrônico de Varredura.

### 3.5 Procedimentos experimentais

A preparação da superfície das peças a serem ensaiadas deve receber atenção especial. Uma superfície limpa, livre de impurezas garante resultados mais confiáveis. Assim, cuidados com armazenamento e limpeza das amostras foram criteriosamente respeitados.

As amostras foram retiradas de rolamentos novos, UC 204, de um mesmo fabricante de rolamentos.

As partes dos rolamentos utilizadas como corpo de prova, foram pista interna e esferas. A pista interna foi a parte girante durante os ensaios, a esfera permaneceu fixa, conforme Figura 3.4. Todas as peças foram envolvidas em óleo protetor e armazenadas em recipiente com dessecador durante os intervalos entre experimentos e entre as análises.

Antes de cada experimento as esferas foram limpas com éter etílico.

Entre cada experimento a pista interna do rolamento, parte móvel, foi usinada com lixas 240, 320, 400, nesta sequência, em seguida limpas com éter etílico.

As esferas que são submetidas a fricção, são substituídas a cada ensaio e utilizadas como parâmetro para caracterização dos sinais vibracionais com relação ao desgaste.

Para monitoramento vibracional durante os ensaios, em consequência da faixa de frequência dos sinais vibracionais, que é de até 25.600 Hz, optou-se por espectros de aceleração. Cobrindo uma ampla faixa de frequência, de acordo com o que é apresentado por Taylor (2003).

O tempo de aquisição de cada espectro deve ser reduzido, permitindo a visualização das alterações de parâmetros vibracionais nos instantes em que condições tribológicas se alterassem.

A faixa de frequência analisada foi entre 2 Hz e 25.600 Hz, com 25.600 linha, janela hanning que geram boa resolução em frequência, e sem média, conforme Figura 3.12.

Informações Comuns para Setup

Classe de Setup: Máquina Spectrum Todos

Quantitativo: Aceleração

HP Filtro : 2,00 Hz

Freq : 25600,00 Hz

Nº de linha: 25600 Delta F : 1,00

Janela: Hanning

Envelope : fora

Figura 3.12 - Tela de configuração do espectro de vibração (Software Omnitrend / Pruftechnik).

Durante ensaios preliminares, foram realizadas medidas aplicando médias, contudo, para os ensaios seguintes, optou-se por medidas sem médias. Visando coletar o maior número possível de sinais, sem atenuação de sinais oriundos do atrito, que poderiam ser eliminados pelas médias.

Penha (1999) apresenta duas abordagens numa análise tempo-frequência do sinal transiente. A primeira consiste em dividir o sinal em fatias no tempo e então analisar cada uma destas fatias separadamente. Já a segunda, busca filtrar diferentes bandas de frequência do sinal e então cortar estas bandas no tempo e analisar o seu conteúdo de energia.

Com isso, valores de níveis globais, de diferentes faixas de frequência são geradas a partir dos espectros de vibração registrados durante os ensaios. As faixas de frequências relevantes para análise dos sinais vibracionais oriundos do ensaio, fazem parte da análise dos resultados.

Um modelo de configuração das faixas de frequência é apresentado na Figura 3.13.

Nome	Download	Tipo freq.	Freq. Central	Largura	Grupo
5 Hz a 6 Hz (0-P)	Verdadeiro	Absoluto	5,50 Hz	0,50 Hz	Pico
19100 Hz a 20700 Hz (RMS)	Verdadeiro	Absoluto	19900,00 Hz	800,00 Hz	RMS
15900 Hz a 18000 Hz (RMS)	Verdadeiro	Absoluto	16700,00 Hz	800,00 Hz	RMS
6kHz a 10 kHz (RMS)	Verdadeiro	Absoluto	8000,00 Hz	2000,00 Hz	RMS
10 a 10k (RMS)	Verdadeiro	Absoluto	5000,00 Hz	4950,00 Hz	RMS
10 a 10k (0-P)	Verdadeiro	Absoluto	5000,00 Hz	4950,00 Hz	Pico
10 a 24k (RMS)	Verdadeiro	Absoluto	12000,00 Hz	11990,00 Hz	RMS
10 a 24k (0-P)	Verdadeiro	Absoluto	12000,00 Hz	11990,00 Hz	Pico
1k a 10k (RMS)	Verdadeiro	Absoluto	5500,00 Hz	4490,00 Hz	RMS

Figura 3.13 - Exemplo de configuração das faixas de frequência para as curvas de nível global (Retirada do software Omnitrend).

Os valores de níveis globais são visualizados individualmente no formato da Figura 3.14:

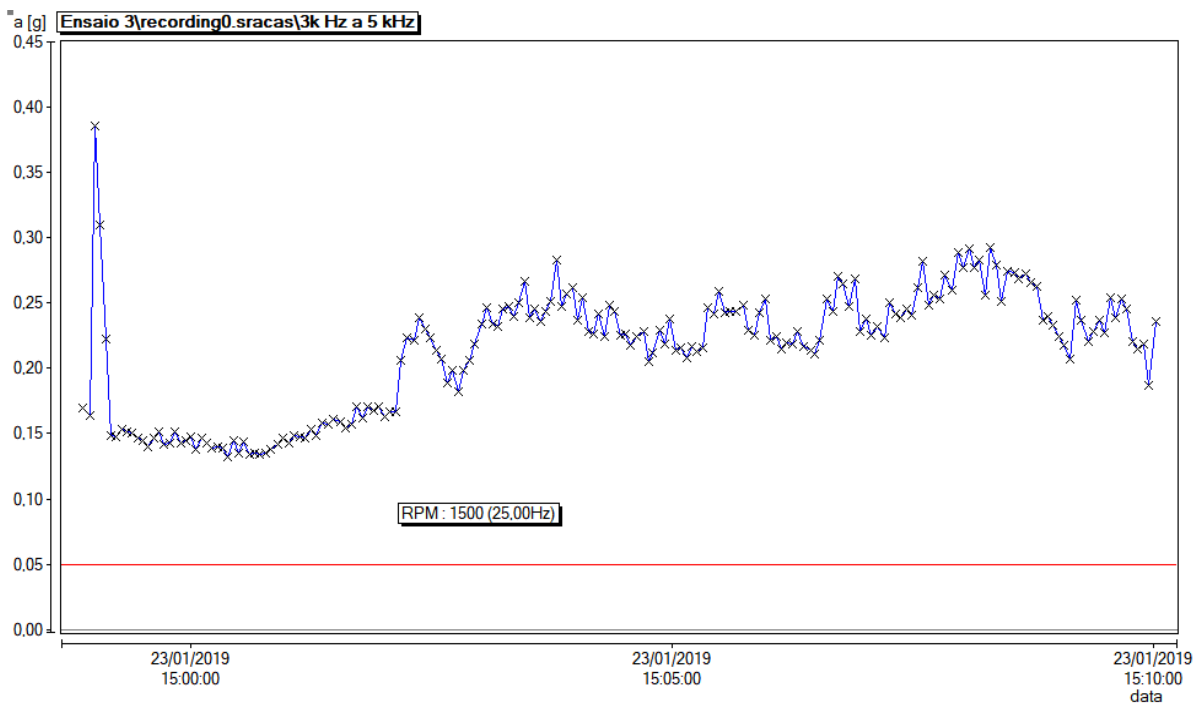


Figura 3.14 - Valores de níveis globais em aceleração (Retirado do software Omnitrend).

Para monitoramento da temperatura do lubrificante durante os ensaios optou-se por 1 registro a cada 2 segundos. Sendo que cada registro é obtido a partir da média de 10 leituras de temperatura efetuada pelo processador Arduino.

A temperatura obtida por meio do Arduino foi calibrada de acordo com os valores registrados pela câmera termográfica Flir E40 que possui certificado de calibração, conforme Anexo II desta dissertação.

Para validação da temperatura do lubrificante durante os ensaios, e avaliação da diferença de temperatura entre as peças friccionadas e o óleo lubrificante, os ensaios foram filmados com a câmera termográfica Flir E40.

A Figura 3.15 ilustra as imagens térmicas obtida durante os ensaios.

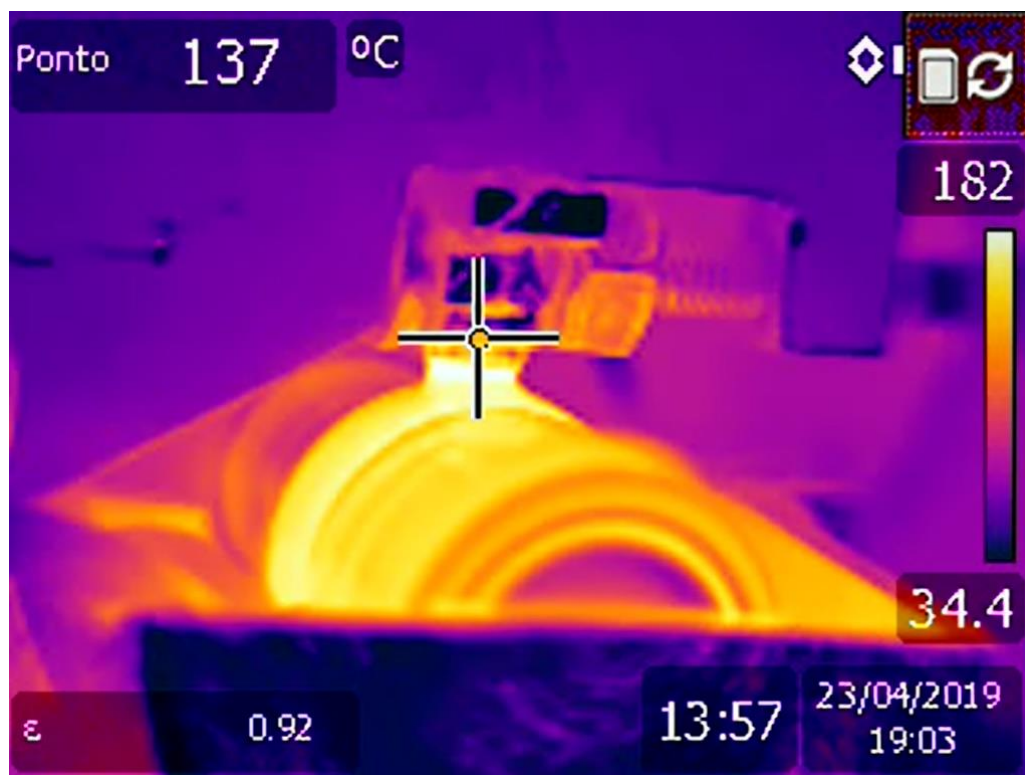


Figura 3.15 - Imagem termográfica.

A emissividade utilizada foi de 0,92. Ajustada para o óleo lubrificante, a partir das medidas realizadas com um termômetro de contato SKF TMDT2, visto na Figura 3.16.



Figura 3.16 - Termômetro digital de contato SKF TMDT2.

Ensaio preliminares foram realizados. Os dados obtidos nesses ensaios, que são apresentados na Tabela 3.2, não foram utilizados diretamente na apresentação dos resultados

deste trabalho, foram avaliados preliminarmente e aproveitados para ajustar a metodologia aplicada nos ensaios posteriores.

Os experimentos preliminares seguiram a ordem apresentada na tabela 3.2, todos com o mesmo volume de lubrificante, mesma rotação e com corpos de prova obtidos de um mesmo fabricante de rolamentos. As proporções de aditivo utilizadas foram as recomendadas pelos respectivos fabricantes.

Os ensaios preliminares, apresentados na Tabela 3.2, receberam carga total logo no início dos ensaios, totalizando 1.491,1 N (152 kgf). Os ensaios preliminares tiveram duração de 30 minutos.

Tabela 3.2 - Dados dos ensaios preliminares de E1 a E20.

<b>Nº</b>	<b>Óleo lubrificante</b>	<b>Aditivo</b>	<b>Duração (min.)</b>	<b>Carga inicial (kgf)</b>	<b>Carga final (kgf)</b>
<b>E1</b>	SAE 80 GL-4	nenhum	30 min.	152	152
<b>E2</b>	SAE 80 GL-4	nenhum	30 min.	152	152
<b>E3</b>	SAE 90 GL-5	nenhum	30 min.	152	152
<b>E4</b>	SAE 90 GL-5	Aditivo A	30 min.	152	152
<b>E5</b>	SAE 90 GL-5	Aditivo B	30 min.	152	152
<b>E7</b>	SAE 90 GL-5	Aditivo C	30 min.	152	152
<b>E8</b>	SAE 90 GL-5	Aditivo A	30 min.	152	152
<b>E9</b>	SAE 80 GL-4	nenhum	30 min.	152	152
<b>E10</b>	SAE 80 GL-4	Aditivo A	30 min.	152	152
<b>E11</b>	SAE 80 GL-4	Aditivo B	30 min.	152	152
<b>E12</b>	SAE 80 GL-4	Aditivo C	30 min.	152	152
<b>E13</b>	SAE 90 GL-5	nenhum	30 min.	152	152
<b>E14</b>	SAE 90 GL-5	Aditivo A	30 min.	152	152
<b>E15</b>	SAE 90 GL-5	Aditivo B	30 min.	152	152
<b>E16</b>	SAE 90 GL-5	Aditivo C	30 min.	152	152
<b>E17</b>	SAE 80 GL-4	Aditivo A	30 min.	152	152

## Capítulo 4

# RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo, são apresentados e discutidos os principais resultados do trabalho. Primeiramente é desenvolvida uma análise preliminar dos dados vibracionais coletados nos ensaios, que defini faixas de frequência com alterações de amplitude ao longo dos ensaios. Em seguida são apresentadas as superfícies desgastadas durante os ensaios, com suas respectivas áreas, assim como áreas de contato de acordo com a Teoria de Hertz. Correlação entre vibração e área desgastada, assim como temperatura e área desgastada são discutidas. Dados obtidos com Microscópio Eletrônico de Varredura e Espectroscopia por Energia Dispersiva são apresentados e discutidos. Por fim, uma análise da área de desgaste de acordo com os tipos de óleos lubrificantes e aditivos é desenvolvida.

### 4.1 Experimentos realizados

Os experimentos considerados no desenvolvimento deste Capítulo seguem a ordem apresentada na tabela 4.1, todos submetidos as mesmas condições de carga, quantidade de lubrificante, velocidade relativa de deslizamento e com corpos de prova obtidos de um mesmo fabricante de rolamentos. As proporções de aditivo, quando utilizados, foram nas proporções recomendadas pelos respectivos fabricantes.

Os ensaios, apresentados na Tabela 4.1, receberam 32% da carga total no início, que equivale a 554,2 N (56,5 kgf), e o restante da carga após 2 minutos, que totalizou 1.736,4 N (177 kgf). Os ensaios têm duração de 15 minutos, que é tempo suficiente para gerar desgaste independente do lubrificante utilizado neste trabalho, e manter a temperatura máxima dentro de valores seguros, de acordo com os dados registrados nos ensaios preliminares.

Tabela 4.1 - Dados dos ensaios de E21 a E40.

Nº	Óleo lubrificante	Aditivo	Duração (min.)	Carga inicial (kgf)	Carga final (kgf)
E21	SAE 80 GL-4	nenhum	15 min.	56,50	177
E22	SAE 80 GL-4	Aditivo A	15 min.	56,50	177
E23	SAE 80 GL-4	Aditivo B	15 min.	56,50	177
E24	SAE 80 GL-4	Aditivo C	15 min.	56,50	177
E25	SAE 80 GL-4	nenhum	15 min.	56,50	177
E26	SAE 80 GL-4	nenhum	15 min.	56,50	177
E27	SAE 80 GL-4	Aditivo A	15 min.	56,50	177
E28	SAE 80 GL-4	Aditivo B	15 min.	56,50	177
E29	SAE 80 GL-4	Aditivo C	15 min.	56,50	177
E30	SAE 90 GL-5	nenhum	15 min.	56,50	177
E31	SAE 90 GL-5	nenhum	15 min.	56,50	177
E32	SAE 10W30	nenhum	15 min.	56,50	177
E33	SAE 10W30	Aditivo A	15 min.	56,50	177
E34	SAE 10W30	Aditivo B	15 min.	56,50	177
E35	SAE 10W30	Aditivo C	15 min.	56,50	177
E36	SAE 10W30	nenhum	15 min.	56,50	177
E37	SAE 10W30	Aditivo A	15 min.	56,50	177
E38	SAE 10W30	Aditivo B	15 min.	56,50	177
E39	SAE 10W30	Aditivo C	15 min.	56,50	177
E40	SAE 10W30	Aditivo C	15 min.	56,50	177

Simulação via análise de elementos finitos, considerando carga de 56,5 kgf, é desenvolvida no ANSYS® Mechanical™, versão Academic Student 2019 R2, e apresentada na Figura 4.1.

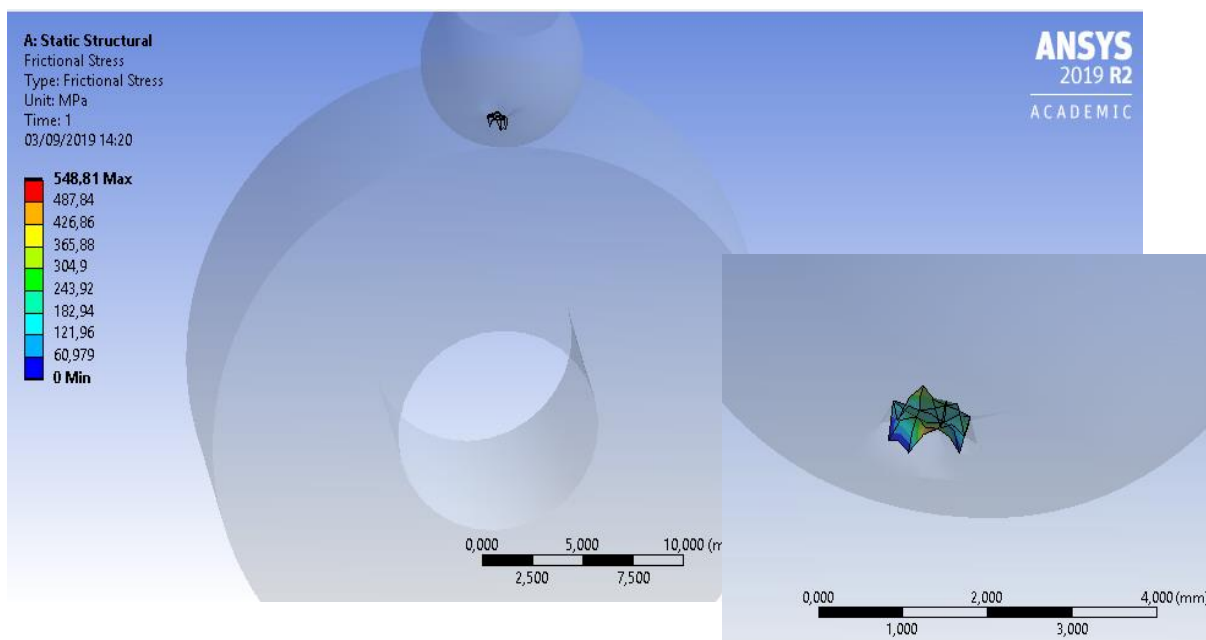


Figura 4.1 – Tensão de contato para carga inicial de 56,5 kgf. Imagem usada como cortesia da ANSYS, Inc.

A tensão máxima é de 548,81 MPa para carga inicial de 56,5 kgf (ANSYS, 2019).

Para carga máxima, de 177 kgf, outra análise de elementos finitos, desenvolvida no software ANSYS® Mechanical™, versão Academic Student 2019 R2, é apresentada na Figura 4.2.

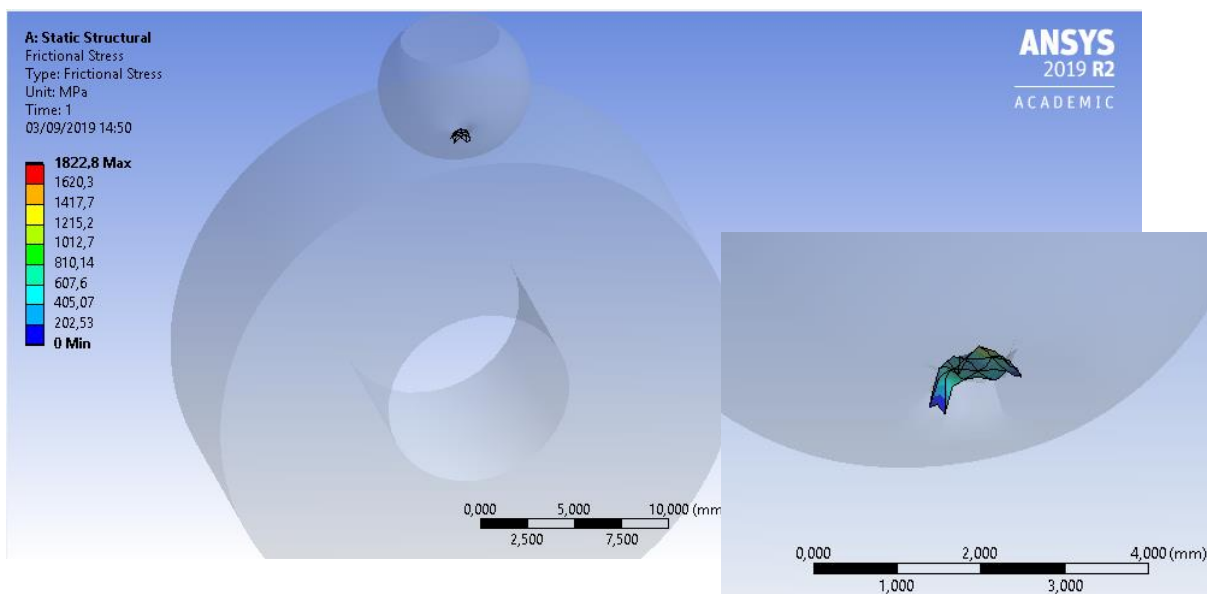


Figura 4.2 – Tensão de contato para carga final de 177 kgf. Imagem usada como cortesia da ANSYS, Inc.

A tensão máxima é de 1.822,8 MPa para carga final de 177 kgf para análise de elementos finitos (ANSYS, 2019). Contudo é importante considerar que na medida que a esfera sofre desgaste a tensão de contato diminui.

## 4.2 Análise preliminar dos dados vibracionais

Aqui definem-se as faixas de frequência de maior relevância, de acordo com os dados vibracionais obtidos durante os ensaios, e que serão utilizadas como parâmetro de análise, comparação e correlação.

O número de espectros de vibração em aceleração, gerados para 15 minutos de ensaio, foi de aproximadamente 400, todos na faixa de 2 Hz a 25.600 Hz.

Optou-se por iniciar a análise dos resultados vibracionais com os dados obtidos no ensaio E21, por seguir o padrão de carga de todos os ensaios analisados neste Capítulo. Todos os espectros registrados durante o ensaio E21 são considerados na análise preliminar. Os espectros registrados no momento em que a carga é aumentada de 55,7 kgf para 177 kgf são avaliados separadamente, já que podem conter faixas de frequência importante em consequência do aumento das tensões de contato.

Espectros de vibração em aceleração, de 10 Hz a 25.000 Hz, registrados durante o ensaio E21 são apresentados na Figura 4.2.

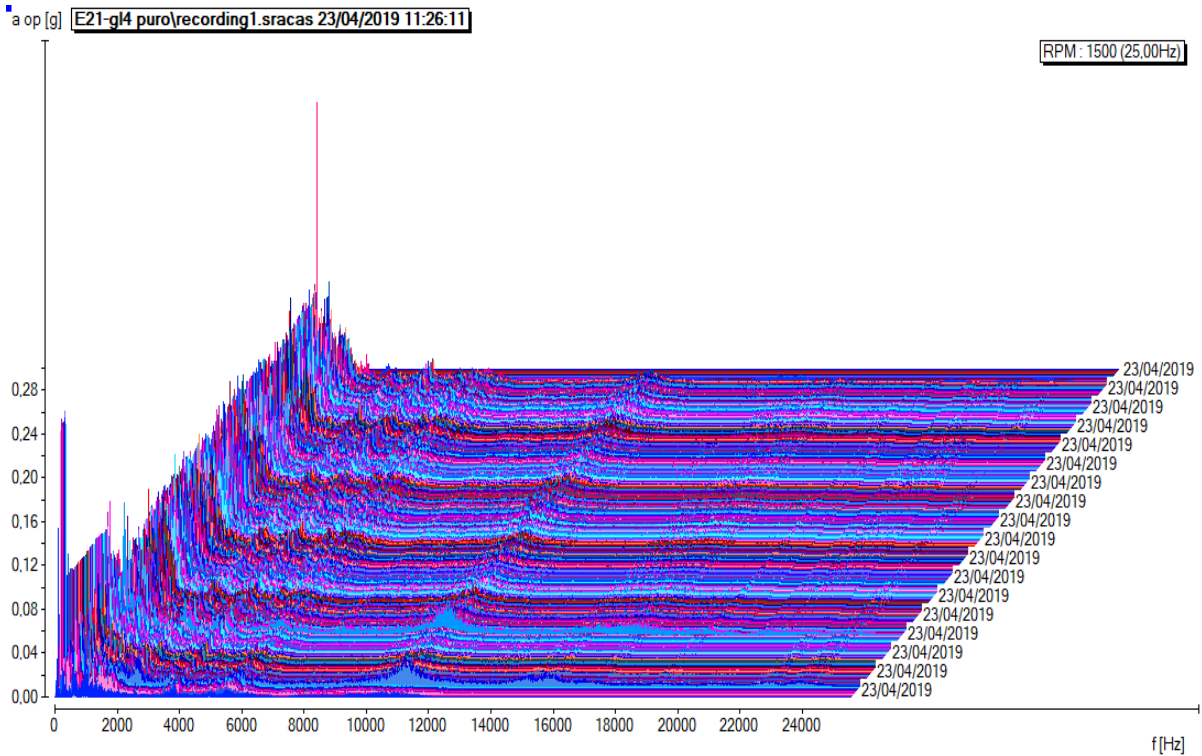


Figura 4.2 - Espectros em cascata registrados em um dos ensaios (Software Omnitrend).

Os mesmos espectros apresentados na Figura 4.2, são sobrepostos, e podem ser visualizados na Figura 4.3, a seguir.

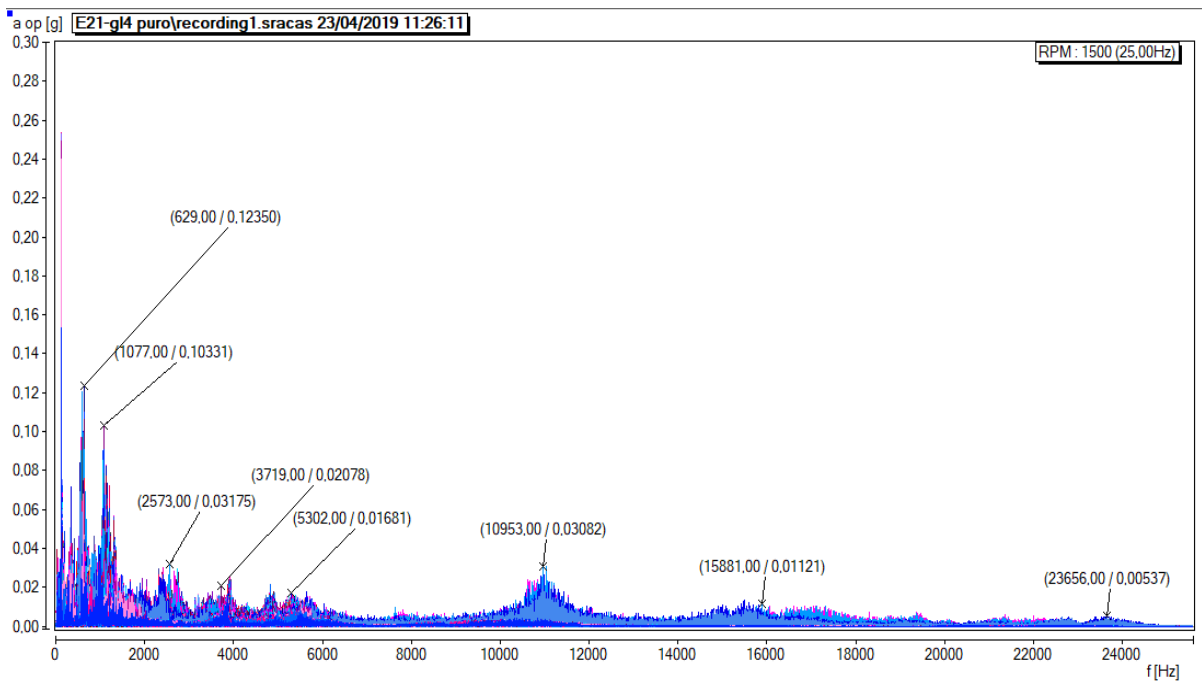


Figura 4.3 - Espectros de aceleração sobrepostos (software Omnitrend).

Os recursos de visualização de espectros de vibração apresentados nas Figuras 4.2 e 4.3 permitem uma análise preliminar das faixas de frequência que se destacam durante o ensaio.

As maiores amplitudes são observadas ao redor das frequências de 630 Hz, 1.000 Hz, 2.550

Hz, 3.700 Hz, 5.300 Hz, 11.000 Hz, 15.500 Hz e 23.500 Hz.

Embora seja possível identificar faixas de frequência em destaque, é importante comparar os sinais vibracionais do dispositivo sem carga e com carga. Na Figura 4.4 apresenta-se os espectros no momento de aplicação da carga. O espectro de cor vermelha, ao fundo, é o último espectro coletado, ou seja, a ordem de apresentação dos espectros seguem a ordem das medições.

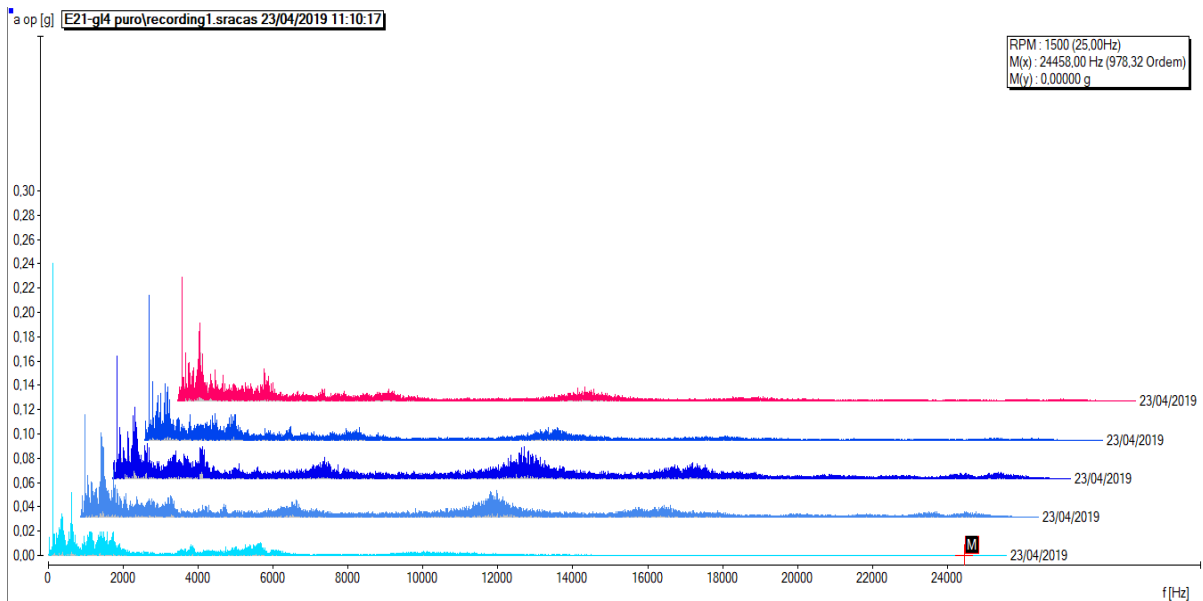


Figura 4.4 - Espectros de vibração do momento da aplicação da carga.

Os mesmos espectros apresentados na Figura 4.4 são sobrepostos e apresentados na Figura 4.5.

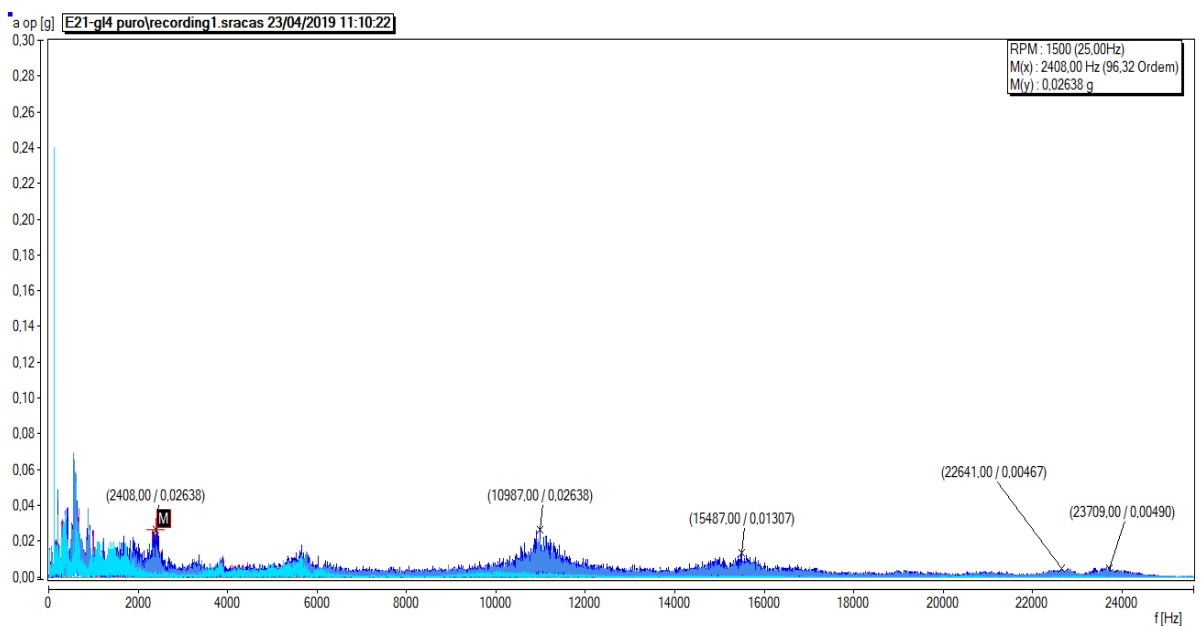


Figura 4.5 - Espectro de aceleração do momento de aplicação da carga.

Os espectros de vibração coletados no momento da aplicação da carga indicam considerável alteração da energia vibracional, ao redor das frequências de 2.400 Hz, 11.000 Hz, 15.500 Hz e 23.000 Hz.

Embora os espectros sejam de grande importância para avaliar faixas de frequência em destaque, outro recurso deve ser aplicado para avaliar as amplitudes vibracionais, nas faixas de frequências apresentadas, e em outras de interesse, que são as curvas de valores de níveis globais de vibração, em valor quadrático médio ou valor eficaz (RMS) e zero a pico (0-P).

Para tanto, foram apresentadas curvas dos valores de níveis globais de diferentes faixas de frequência ao longo de 2 Hz a 25 kHz, conforme Figura 4.6. Comparativos das curvas de valores de níveis globais entre (RMS) e zero a pico (0-P), foram considerados.

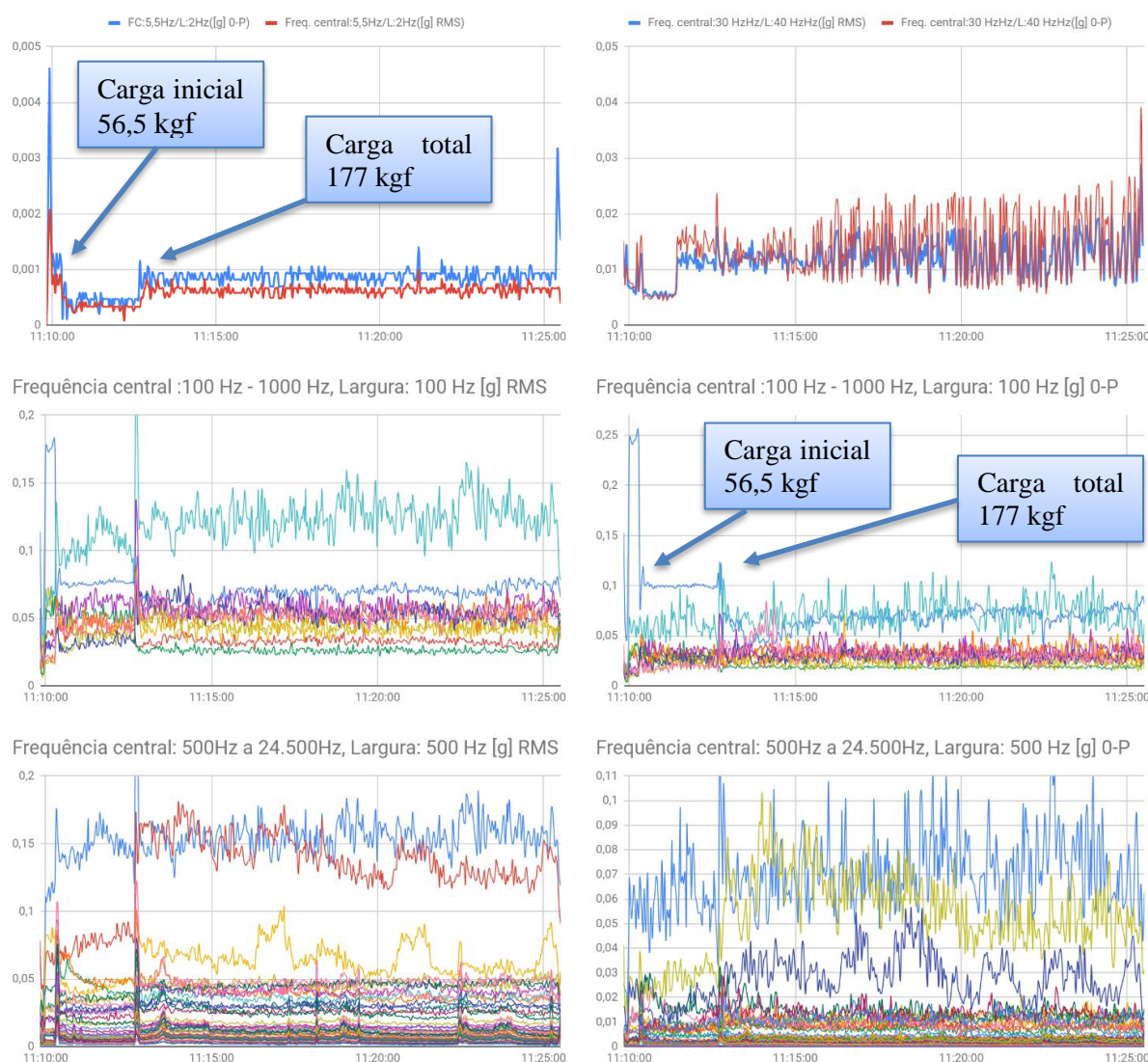


Figura 4.6 - Espectros dos ensaios E21 a E40, para diferentes faixas de frequência em RMS e 0-P.

Considerando que os sinais vibracionais em decorrência do atrito são aleatórios, em uma

larga faixa de frequência, como apresentado por Taylor (2003), não se esperam bons resultados do monitoramento via análise de vibrações utilizando valores de níveis globais de zero a pico (0-P), em decorrência de uma oscilação muito maior que a observada nas curvas de valores de níveis globais em RMS.

Com isso, as análises preliminares são desenvolvidas a partir de valores de níveis globais de vibração em RMS, das faixas de frequência apresentadas na Tabela 4.2, a seguir.

Tabela 4.2: Faixas de frequência dos níveis globais de aceleração RMS.

Faixa de Frequência	Frequência Central	Largura	Grupo
4,5 Hz a 6,5 Hz	5,5 Hz	2 Hz	0-P
10 Hz a 500 Hz	255 Hz	490 Hz	RMS
500 Hz a 1.000 Hz	750 Hz	500 Hz	RMS
1 kHz a 2 kHz	1,5 kHz	1 kHz	RMS
2 kHz a 3 kHz	2,5 kHz	1 kHz	RMS
3 kHz a 5 kHz	4 kHz	2 kHz	RMS
5 kHz a 8 kHz	6,5 kHz	3 kHz	RMS
9 kHz a 13 kHz	11 kHz	4 kHz	RMS
13 kHz a 18 kHz	15,5 kHz	5 kHz	RMS
18 kHz a 25 kHz	21,5 kHz	7 kHz	RMS
10 Hz a 12 kHz	6.005 Hz	11.990 Hz	RMS
10 Hz a 25 kHz	12.505 kHz	24.990 Hz	RMS
1 kHz a 12 kHz	6,5 kHz	11 kHz	RMS
1 kHz a 25 kHz	13 kHz	24 kHz	RMS
8 kHz a 25 kHz	16,5 kHz	17 kHz	RMS

As curvas dos valores de níveis globais da Tabela 4.2 são representadas na Figura 4.7.

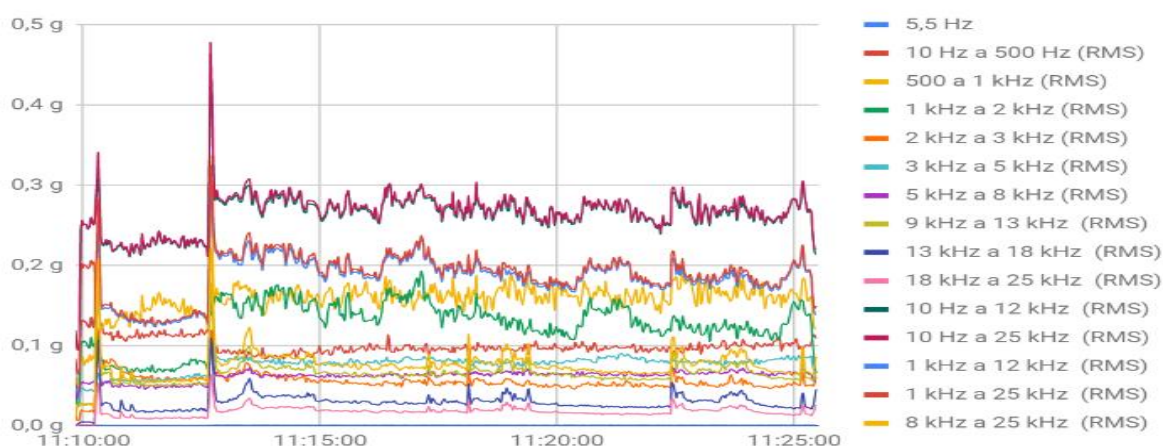


Figura 4.7- Curvas de valores de níveis globais de todas as faixas de frequência.

Embora não se espere correlação entre vibração na frequência de rotação do elemento

rotativo da bancada, os valores de níveis globais, de uma faixa estreita foram registrados, apresentados na Figura 4.8.

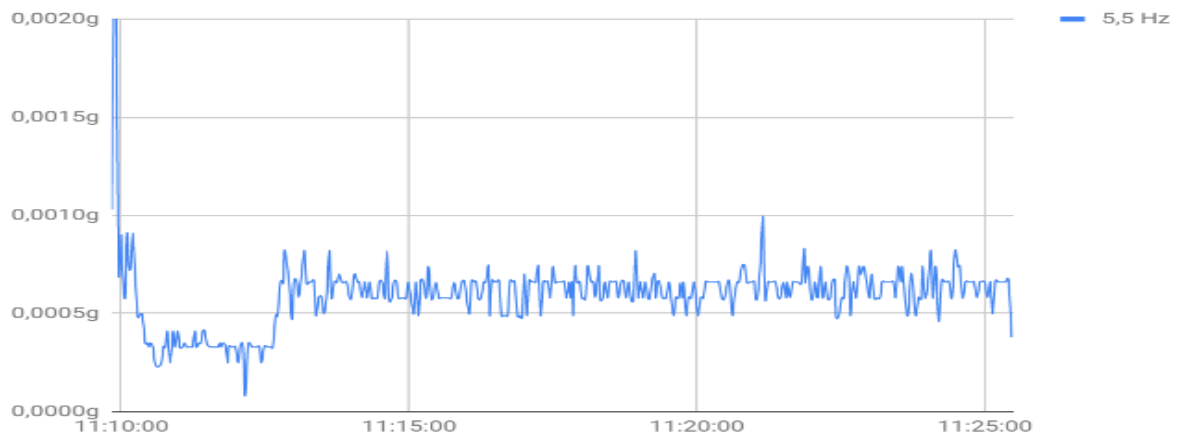


Figura 4.8 - Amplitude de vibração para 5,5 Hz.

Algumas curvas de nível global de bandas estreitas de frequência entre 10 Hz e 25 kHz são observadas na Figura 4.9.

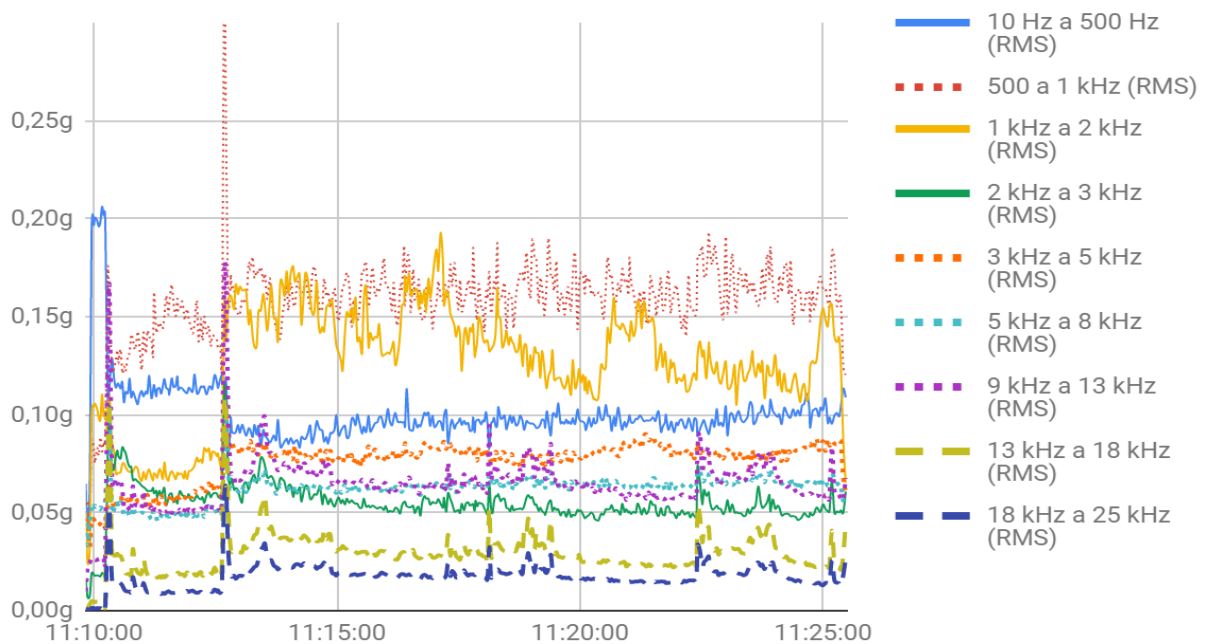


Figura 4.9 - Curvas dos níveis globais de 10 Hz a 25 kHz, com diferentes bandas estreitas de frequência.

A curva de valores de níveis globais ao redor da frequência de 5,5 Hz, apresenta a vibração na frequência de rotação da máquina utilizada nos experimentos. Sendo irrelevante no desenrolar das análises, comparações e correlações.

Com relação às curvas de valores de níveis globais de bandas estreitas de frequência, em RMS, são feitas algumas observações a seguir:

- A curva de valores de níveis globais de 10 Hz a 500 Hz apresenta amplitudes de vibração inversas à elevação da carga, com tendência contrária ao restante das curvas de valores de níveis globais;
- A curva de valores de níveis globais entre 1 kHz e 2kHz apresenta comportamento distinto, com grandes variações de amplitude no decorrer do ensaio, para mesma carga;
- A curva de valores de níveis globais referente à faixa entre 2 kHz e 3 kHz apresentou variação da amplitude no instante em que as cargas foram aplicadas. Contudo, pequena variação foi observada nas amplitudes ao comparar as geradas com 32% da carga e as geradas com 100% da carga;
- As curvas de valores de níveis globais entre 3 kHz e 13 kHz, apresentaram amplitudes próximas, com elevação proporcional à elevação da carga. Contudo, a curva referente à faixa de 9 kHz a 13 kHz segue o padrão das curvas referentes às faixas de 13 kHz a 18 kHz e de 18 kHz a 25 kHz.

Uma avaliação das bandas largas de frequência é realizada a partir das curvas dos níveis globais, apresentadas na Figura 4.10, a seguir.

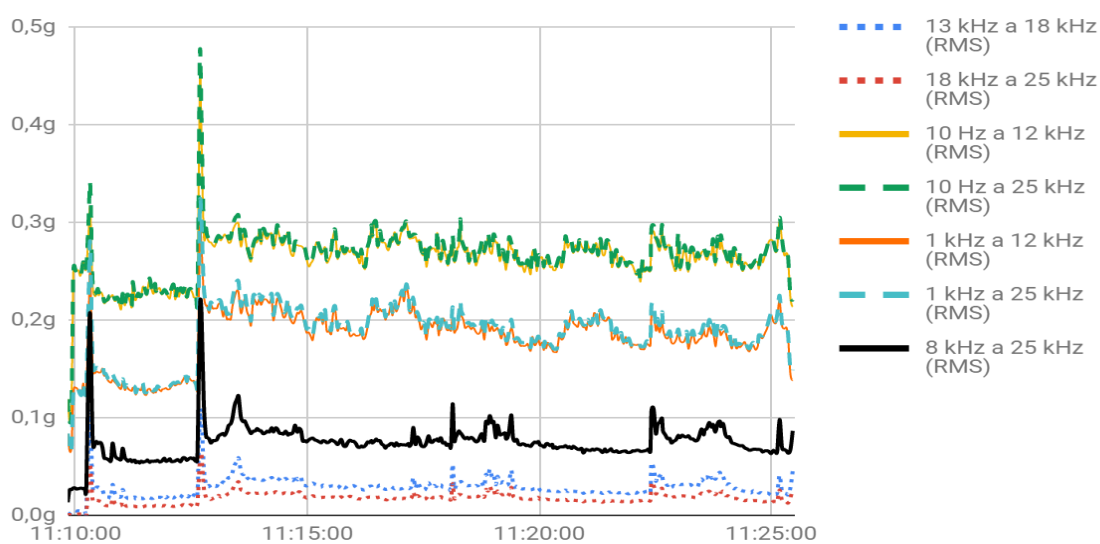


Figura 4.10 - Curvas dos níveis globais de 10 Hz a 25 kHz, com diferentes bandas largas de frequência.

Com relação às curvas de valores de níveis globais de bandas largas de frequência, em RMS, são feitas algumas observações a seguir:

- As curvas de valores de níveis globais entre 10 Hz a 12 kHz e entre 10 Hz a 25 kHz, assim como entre 1 kHz a 12 kHz e entre 1 kHz e 25 kHz, apresentam amplitudes com valores próximos no decorrer de todo ensaio;
- A curva de valores de níveis globais de 8 kHz a 25 Hz apresenta amplitudes e contorno distintos das faixas de 10 Hz a 25 kHz, assim como de 1 kHz a 25 kHz;
- As curvas de valores de níveis globais entre 13 kHz a 18 kHz e entre 18 kHz e 25 kHz, foram plotadas visando um comparativo entre as outras curvas, e apresentam contorno muito semelhantes à curva de valores de níveis globais entre 8 kHz e 25 kHz.

Com isso, as curvas de valores de níveis globais de bandas largas utilizadas nas análises, comparações e correlações, serão as curvas de valores de níveis globais entre 10 Hz e 25 kHz (RMS), entre 1 kHz e 25 kHz (RMS) e entre 8 kHz e 25 kHz (RMS).

Embora os valores de níveis globais, de zero a pico, não sejam considerados os prioritários para análise, não são desprezados. São consideradas as faixas de 10 Hz a 1 kHz (0-P), 1 kHz a 2 kHz (0-P), 2 kHz a 8 kHz (0-P) e de 8 kHz a 25 kHz (0-P).

### **4.3 Área de desgaste das Amostras**

Para quantificação do desgaste, utilizou-se a área do desgaste a partir de uma imagem de topo, das amostras E21 a E40, Figura 4.11. A área da região desgastada foi medida a partir das imagens obtidas pelo Estereoscópio Olympus SZ61. A imagem da amostra E32 foi obtida a partir de um aumento de 40X, para o restante das imagens, o aumento foi de 45X.

(Intencionalmente deixado em branco)

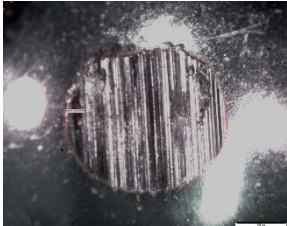
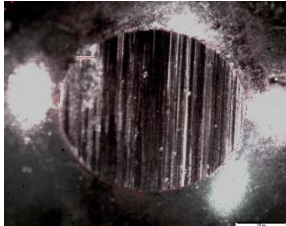
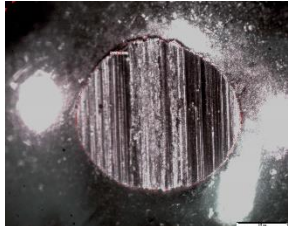
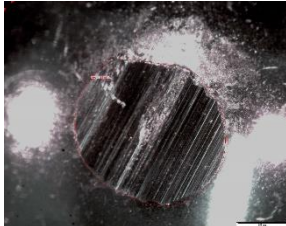
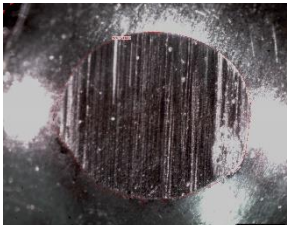
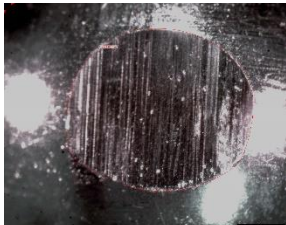
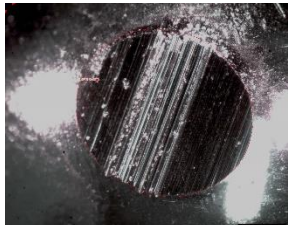
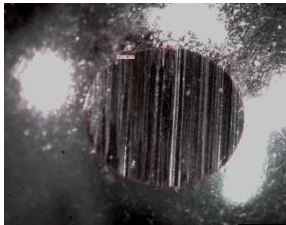
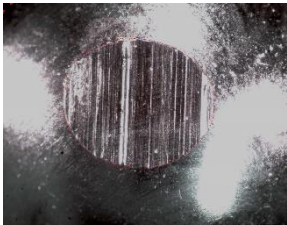

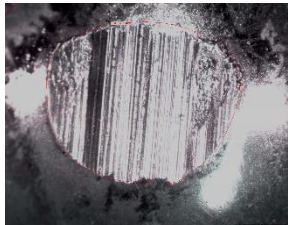
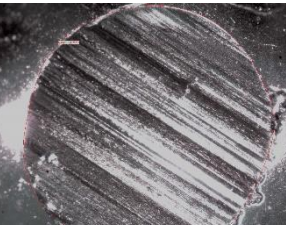
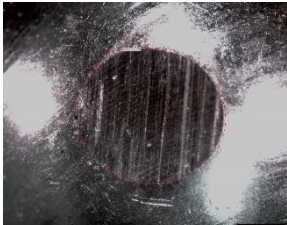
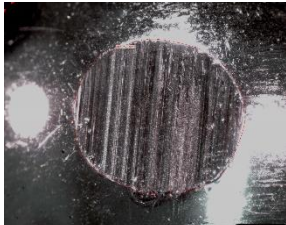
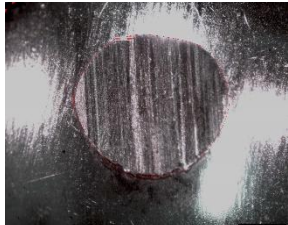
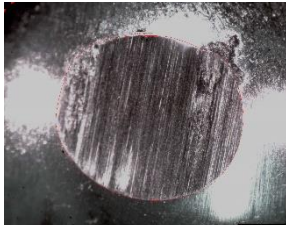
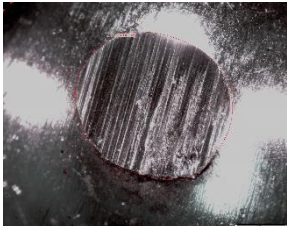
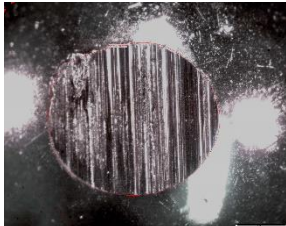
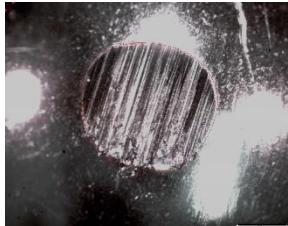
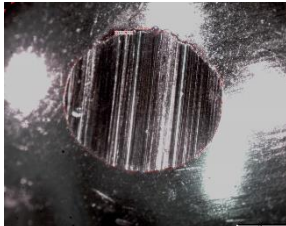
			
E21 - 2,02 mm <sup>2</sup> SAE80 GL-4 (S/Ad.)	E22 - 2,59 mm <sup>2</sup> SAE80 GL-4 (Ad. A)	E23 - 2,05 mm <sup>2</sup> SAE80 GL-4 (Ad. B)	E24 - 1,84 mm <sup>2</sup> SAE80 GL-4 (Ad. C)
			
E25 - 2,74 mm <sup>2</sup> SAE80 GL-4 (S/Ad.)	E26 - 2,60 mm <sup>2</sup> SAE80 GL-4 (S/Ad.)	E27 - 2,45 mm <sup>2</sup> SAE80 GL-4 (Ad. A)	E28 - 1,88 mm <sup>2</sup> SAE80 GL-4 (Ad. B)
			
E29 - 1,63 mm <sup>2</sup> SAE80 GL-4 (Ad. C)	E30 - 1,55 mm <sup>2</sup> SAE90 GL-5 (S/Ad.)	E31 - 2,69 mm <sup>2</sup> SAE90 GL-5 (S/Ad.)	E32 - 5,10 mm <sup>2</sup> SAE 10W30 (S/Ad.)
			
E33 - 1,71 mm <sup>2</sup> SAE 10W30 (Ad. A)	E34 - 2,23 mm <sup>2</sup> SAE 10W30 (Ad. B)	E35 - 1,82 mm <sup>2</sup> SAE 10W30 (Ad. C)	E36 - 2,62 mm <sup>2</sup> SAE 10W30 (S/Ad.)
			
E37 - 1,91 mm <sup>2</sup> SAE 10W30 (Ad. A)	E38 - 2,20 mm <sup>2</sup> SAE 10W30 (Ad. B)	E39 - 1,47 mm <sup>2</sup> SAE 10W30 (Ad. C)	E40 - 1,89 mm <sup>2</sup> SAE 10W30 (Ad. C)

Figura 4.11 - Área de desgaste para amostras E21 a E40, seguidas do lubrificante utilizado nos respectivos ensaios. 15 minutos de ensaio, carga inicial de 56,50 kgf (2 min.) e final de 177 kgf (13 min.).

A partir das imagens, com aumento de 45X, o tipo de desgaste predominante é o de abrasão. Os valores das áreas de desgaste são utilizados para correlacionar com dados vibracionais e temperatura dos respectivos ensaios, no decorrer deste Capítulo.

Na tabela 4.3, são apresentados os valores de carga utilizados nos ensaios, tipo de lubrificante aplicado, duração, área de desgaste, volume de desgaste e tensão ao final dos ensaios, desconsiderando as deformações.

Tabela 4.3 - Dados dos ensaios de E21 a E40.

Ensaio	Carga 1 (kgf)	Carga 2 (kgf)	Óleo base	Aditivo	Duração (min.)	Área do desgaste (mm <sup>2</sup> )	Volume do desgaste (mm <sup>3</sup> )	Tensão final de contato (Mpa)
E21	56,6	177	SAE80 GL-4	nenhum	15	2,02	0,250	860
E22	56,6	177	SAE80 GL-4	A	15	2,59	0,411	670
E23	56,6	177	SAE80 GL-4	B	15	2,05	0,257	847
E24	56,6	177	SAE80 GL-4	C	15	1,89	0,219	919
E25	56,6	177	SAE80 GL-4	nenhum	15	2,74	0,460	634
E26	56,6	177	SAE80 GL-4	nenhum	15	2,60	0,414	668
E27	56,6	177	SAE80 GL-4	A	15	2,45	0,368	709
E28	56,6	177	SAE80 GL-4	B	15	1,88	0,217	924
E29	56,6	177	SAE80 GL-4	C	15	1,63	0,163	1065
E30	56,6	177	SAE90 GL-5	nenhum	15	1,55	0,147	1120
E31	56,6	177	SAE90 GL-5	nenhum	15	2,69	0,443	645
E32	56,6	177	SAE 10W30	nenhum	15	5,10	1,594	340
E33	56,6	177	SAE 10W30	A	15	1,71	0,179	1015
E34	56,6	177	SAE 10W30	B	15	2,23	0,305	779
E35	56,6	177	SAE 10W30	C	15	1,82	0,203	954
E36	56,6	177	SAE 10W30	nenhum	15	2,62	0,421	663
E37	56,6	177	SAE 10W30	A	15	1,91	0,224	909
E38	56,6	177	SAE 10W30	B	15	2,20	0,297	789
E39	56,6	177	SAE 10W30	C	15	1,47	0,132	1181
E40	56,6	177	SAE 10W30	C	15	1,89	0,219	919

A carga inicial aplicada foi de 56,6 kgf, durante 2 minutos. A partir do 3º minuto, a carga aplicada passou a ser de 177 kgf, até o fim do ensaio, que teve duração total de 15 minutos.

O volume desgastado das esferas de 8 mm de diâmetro, foram calculados a partir de uma aproximação, considerando a área de desgaste como sendo de um círculo. Os valores de área de desgaste e volume de desgaste são representados no gráfico da Figura 4.12.

As tensões foram calculadas a partir da carga máxima de 177 kgf e a área final do desgaste, desconsiderando as deformações de acordo com a Teoria de Hertz, que na prática geram tensões menores do que as apresentadas na Tabela 4.3.

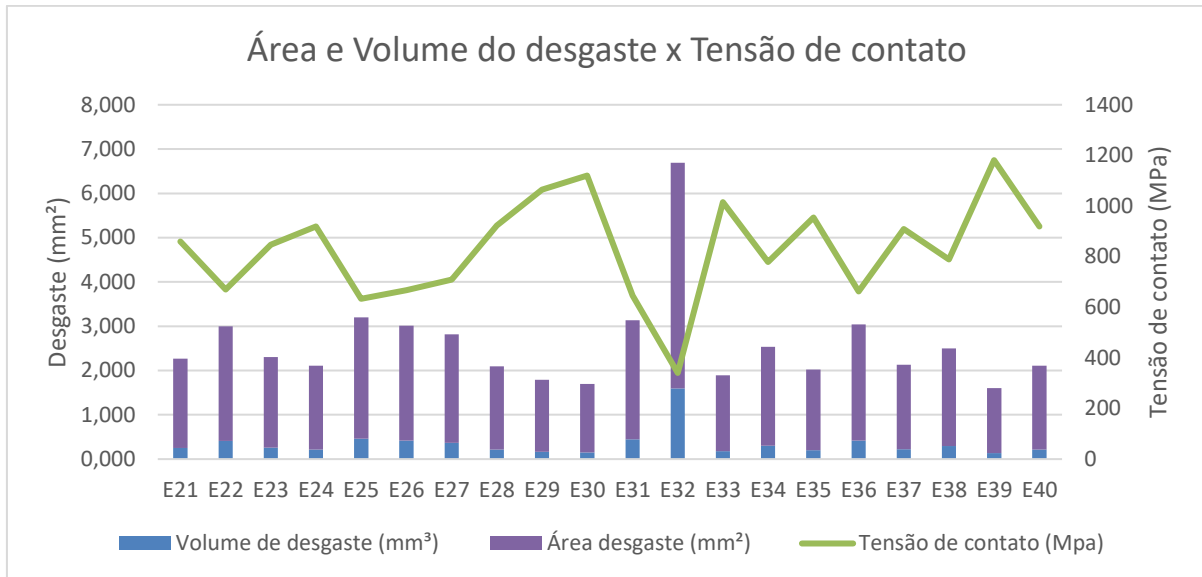


Figura 4.12 - Área e volume do desgaste versus tensão de contato final por amostra.

O gráfico da Figura 4.12 permite comparar as tensões de contato, desconsiderando as deformações reais, ao fim dos ensaios. A diferença entre as tensões é de quase 250% quando se compara à tensão da amostra E32 (maior desgaste) com à tensão da amostra E39 (menor desgaste).

#### 4.4 Área de contato segundo a Teoria de Hertz

A partir da Teoria de Hertz, apresentadas por Johnson (1985) e Chen (2014), as áreas de contato, desconsiderando o desgaste ocorrido durante os ensaios, são vistas na Tabela 4.4.

Tabela 4.4 - Área de contato segundo a Teoria de Hertz.

Descrição	Carga de 57,6 kgf	Carga de 177 kgf
Raio esfera [m]	0,004 m	0,004 m
Raio pista [m]	0,014 m	0,014 m
Carga [N]	555,246 N	1736,37 N
Coefficiente de Poisson	0,3	0,3
Módulo Elasticidade [GPa]	210 GPa	210 GPa
E* [GPa] eq. 2.2	115,385 GPa	115,38 GPa
R [m] eq. 2.3	0,003111111 m	0,003111111 m
a [m] eq. 2.3	0,000670584 m	0,002097055 m
$\delta$ [m] eq. 2.4	0,000144541 m	0,001413527 m
A [m²] eq. 2.6	1,41272E-06 m²	1,38156E-05 m²
Área de contato – A [mm²] eq. 2.6	<b>1,412718734 mm²</b>	<b>13,81558804 mm²</b>

## 4.5 Correlação entre desgaste, vibração e temperatura

A partir das faixas de vibração, em nível global, RMS e 0-P, definidas com a análise preliminar dos dados vibracionais, são realizadas análises, comparativos e correlações entre desgaste, vibração e temperatura.

As correlações com vibração e temperatura são realizadas a partir dos dados obtidos nos ensaios de E21 a E40, que permite uma correlação entre carga, atrito e faixas de vibração com maiores energias, em decorrência da aplicação de carga em dois momentos distintos, sendo de 56,5 kgf no início do ensaio, e o restante, que totaliza 177 kgf, após 2 minutos do início do ensaio.

A análise dos ensaios de E21 a E40 está subdividida em faixas de frequência vibracional que possam ser relevantes com relação ao objetivo principal, que é a identificação de parâmetros vibracionais relacionados ao desgaste.

### 4.5.1 Comparativo do nível global de vibração por faixa de frequência

O número de amostras de vibrações, em consequência do tempo de processamento do coletor de vibrações, é diferente entre os ensaios, para o mesmo intervalo de tempo de ensaio.

Os dados foram tratados, sem alteração das curvas, de maneira que os eventos principais, que são as adições de carga, sejam visualizados na mesma linha do tempo.

Na Figura 4.13 são apresentados os valores de níveis globais na frequência de 5,5 Hz.

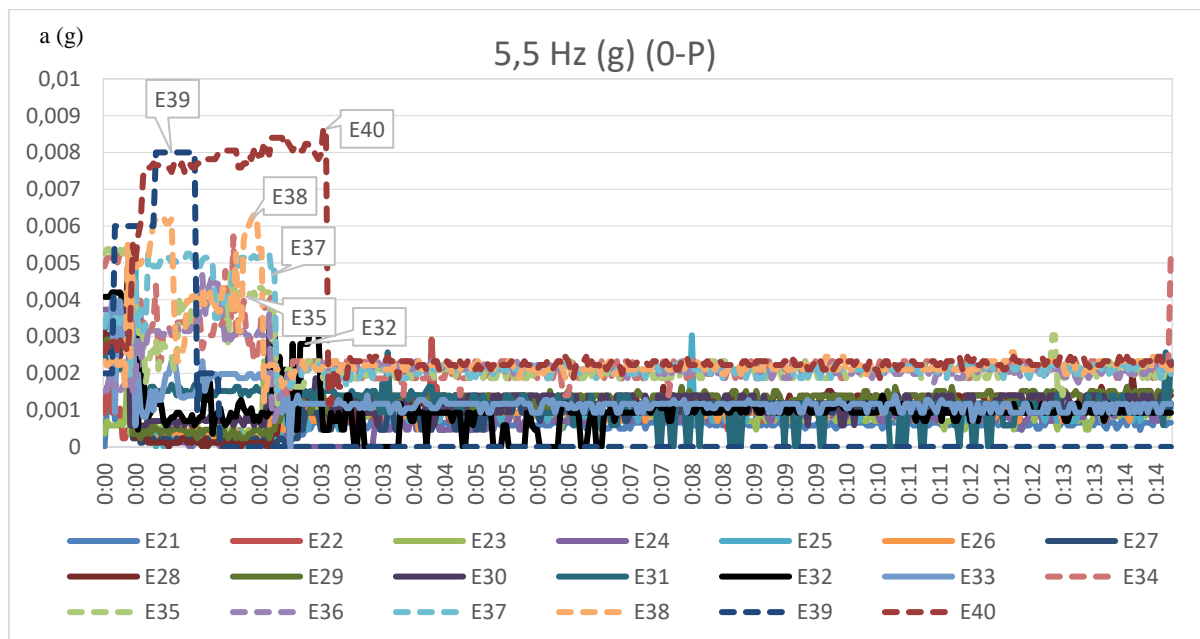


Figura 4.13 - Valores de níveis globais na frequência de rotação do equipamento 5,5 Hz (g) (0-P).

Os valores de 5,5 Hz, estão relacionadas à vibração do dispositivo durante os ensaios, que é a rotação do eixo de saída do redutor. Ensaios de E21 a E32 apresentaram vibração baixa nos dois primeiros minutos, com carga de apenas 56,6 kgf, contudo, a partir do ensaio E33, a vibração na frequência de rotação do dispositivo de ensaio aumentou.

Valores de níveis globais de 10 Hz a 25 kHz, RMS, são apresentados na Figura 4.14.

Valores de níveis globais de 1 kHz a 25 kHz, RMS, são apresentados na Figura 4.15.

Valores de níveis globais de 8 kHz a 25 kHz, RMS, são apresentados na Figura 4.16.

(Intencionalmente deixado em branco)

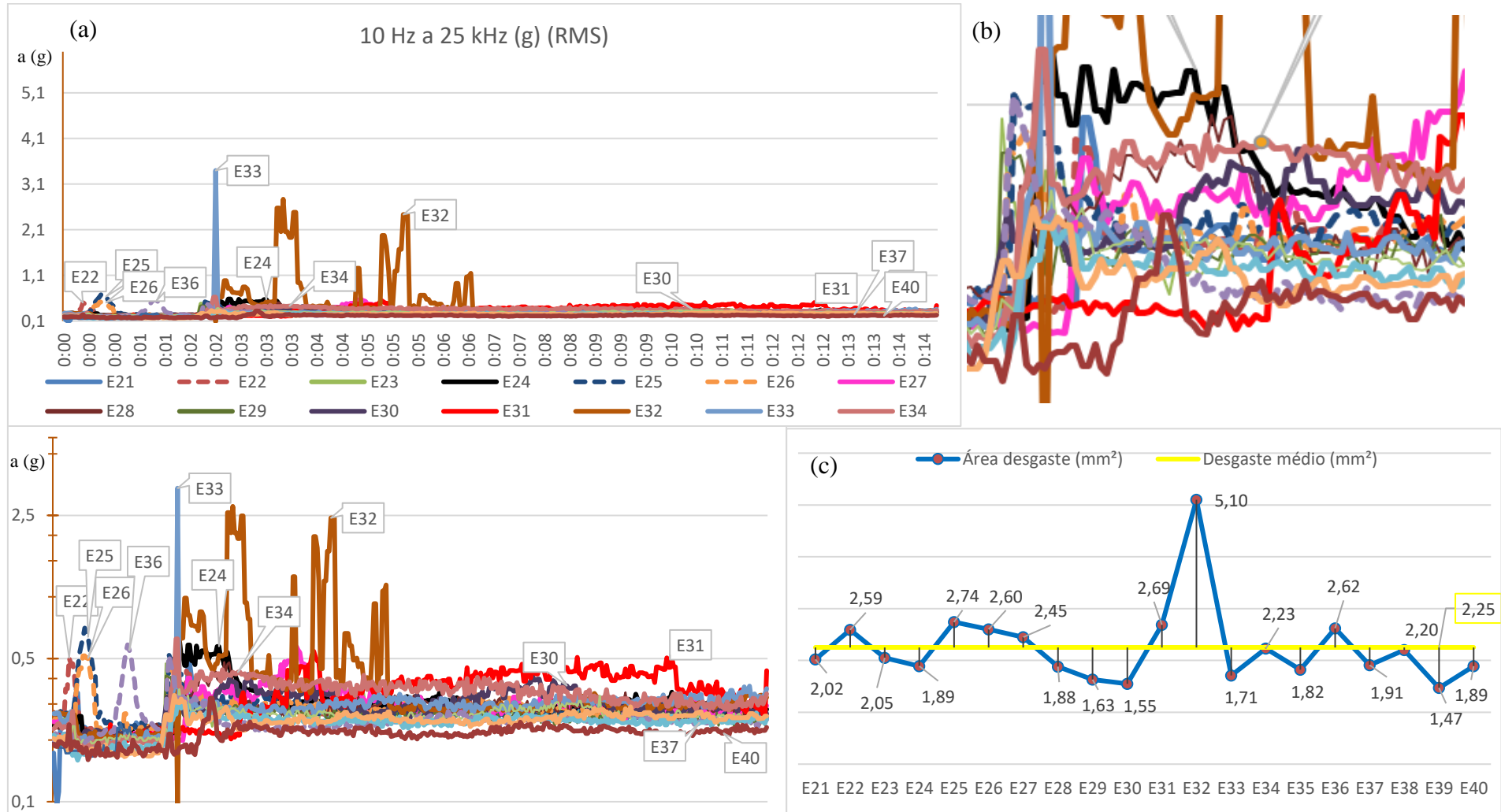


Figura 4.14: (a) Valores de níveis globais de 10 Hz a 25 kHz (RMS); (b) Zoom do momento de aumento de carga; (c) Área de desgaste.

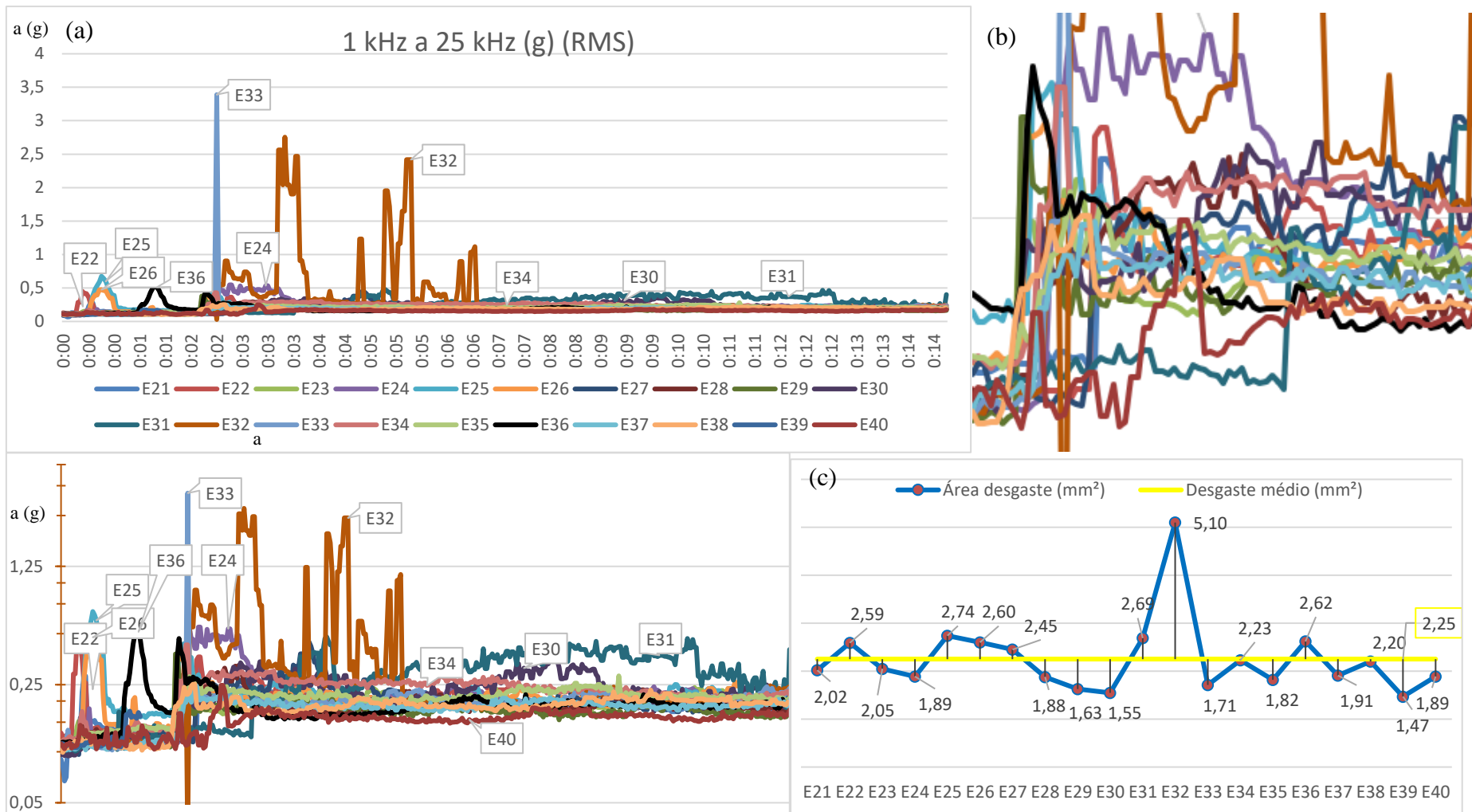


Figura 4.15: (a) Valores de níveis globais de 1 kHz a 25 kHz (RMS) ; (b) Zoom do momento de aumento de carga; (c) Área de desgaste.

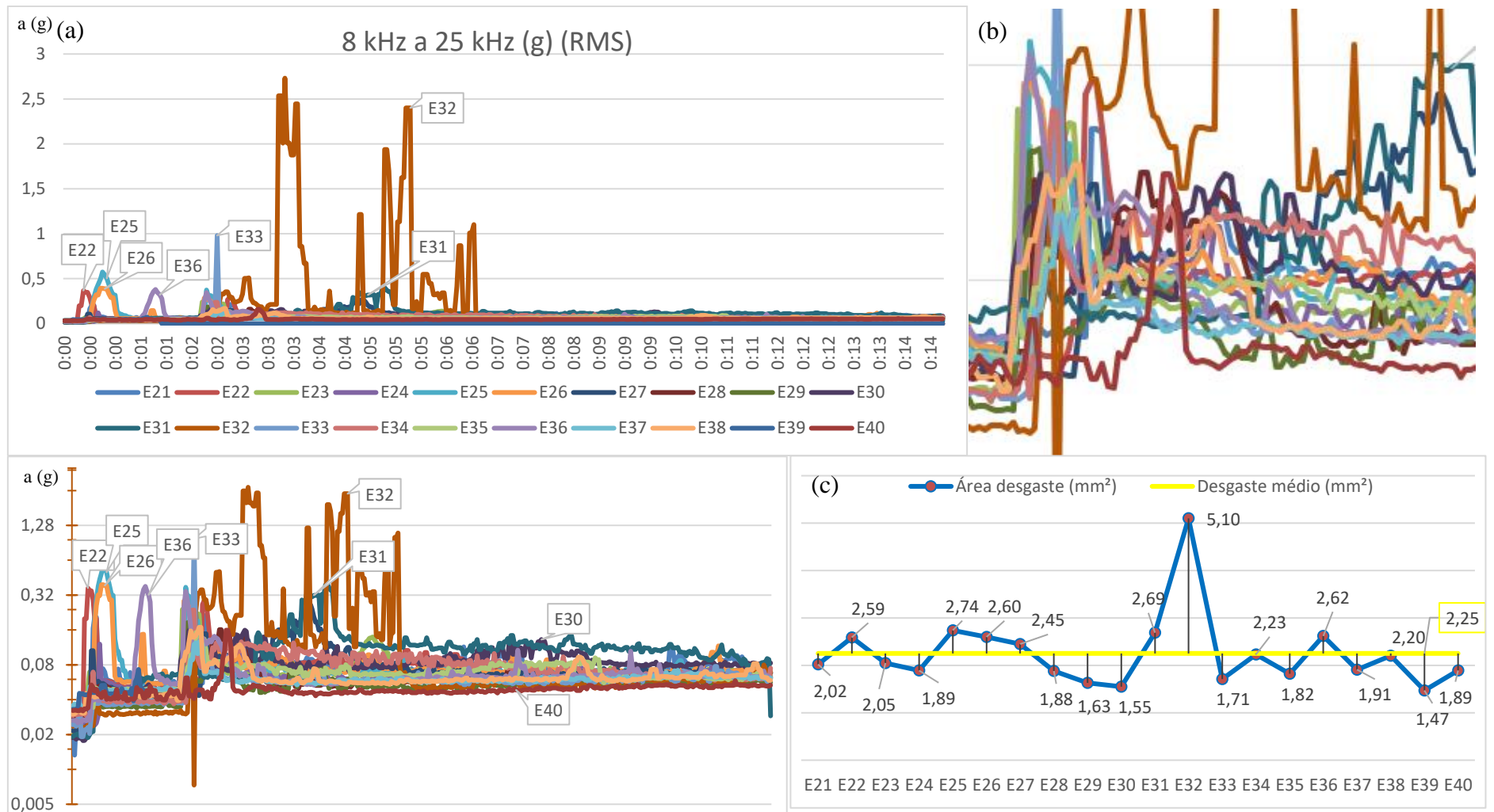


Figura 4.16: (a) Valores de níveis globais de 8 kHz a 25 kHz (RMS) ; (b) Zoom do momento de aumento de carga; (c) Área de desgaste.

As curvas com os valores de níveis globais entre 10 Hz e 25 kHz, RMS, Figura 4.14, com maior destaque nos instantes iniciais dos ensaios, ou seja, até dois minutos, com carga parcial, são referentes aos ensaios E22, E25, E26 e E36.

Já os destaques de vibração entre 10 Hz e 25 kHz, RMS, após dois minutos de ensaio, com carga total, são referentes aos ensaios E32 que registrou os mais altos valores de vibração, com vários picos ao longo do ensaio. Ensaios E27, E31 e E34, registraram vibração superior aos outros ensaios, com pouca variação durante a exposição a carga total.

Ensaio E24 registrou vibração acima da média por 90 segundos, a partir da colocação da carga total. Ensaio E30 registrou vibração acima da média entre 8 e 10 minutos de ensaio. Ensaio E33, registrou um pico de vibração, referente a apenas um espectro, com valor de vibração muito superior aos valores registrados nos outros ensaios.

Ao relacionar os valores de níveis globais, na faixa de 10 Hz a 25 kHz, observa-se uma correlação entre vibração e desgaste. Primeiro, quando a vibração ocorre nos dois primeiros minutos de ensaios, com carga parcial, registrados nos ensaios E22, E25, E26 e E36. Segundo, quando a vibração permanece acima da média, que são os casos E31 e E34. Terceiro, e com maior desgaste, ensaio E32, registra vários picos que permanecem com vibração elevada por alguns instantes.

A área de desgaste ficou abaixo da média, para os destaques de vibração que ocorreram por pequenos intervalos de tempo, após os 2 minutos iniciais de ensaio, que são E24, E30 e E33.

As mesmas impressões que se observa nos valores de níveis globais de 10 a 25 kHz, observam-se nos valores de níveis globais de 1 kHz a 25 kHz, na Figura 4.15 e para valores de níveis globais de 8 kHz a 25 kHz, RMS, Figura 4.16.

Uma diferença observada nas curvas de níveis globais de 8 kHz a 25 kHz, RMS, Figura 4.16, é de a vibração para os ensaios E24, E30 e E33, que apresentam desgasta abaixo da média, não se destacaram quando avaliados na escala linear, diferente do observado também na escala linear para as curvas de níveis globais, RMS, de 10 Hz a 25 kHz e de 1 kHz a 25 kHz.

Ao comparar as três diferentes curvas de níveis globais, todas em RMS, percebe-se que na medida que as vibrações de baixa frequência são desconsideradas, existe um destaque dos picos de vibração que são relacionados com os possíveis momentos em que o atrito e o desgaste se intensificam.

Valores de níveis globais de 10 Hz a 1 kHz (0-P), e de 1 kHz a 2 kHz (0-P), são apresentados na Figura 4.17 e Figura 4.18, respectivamente.

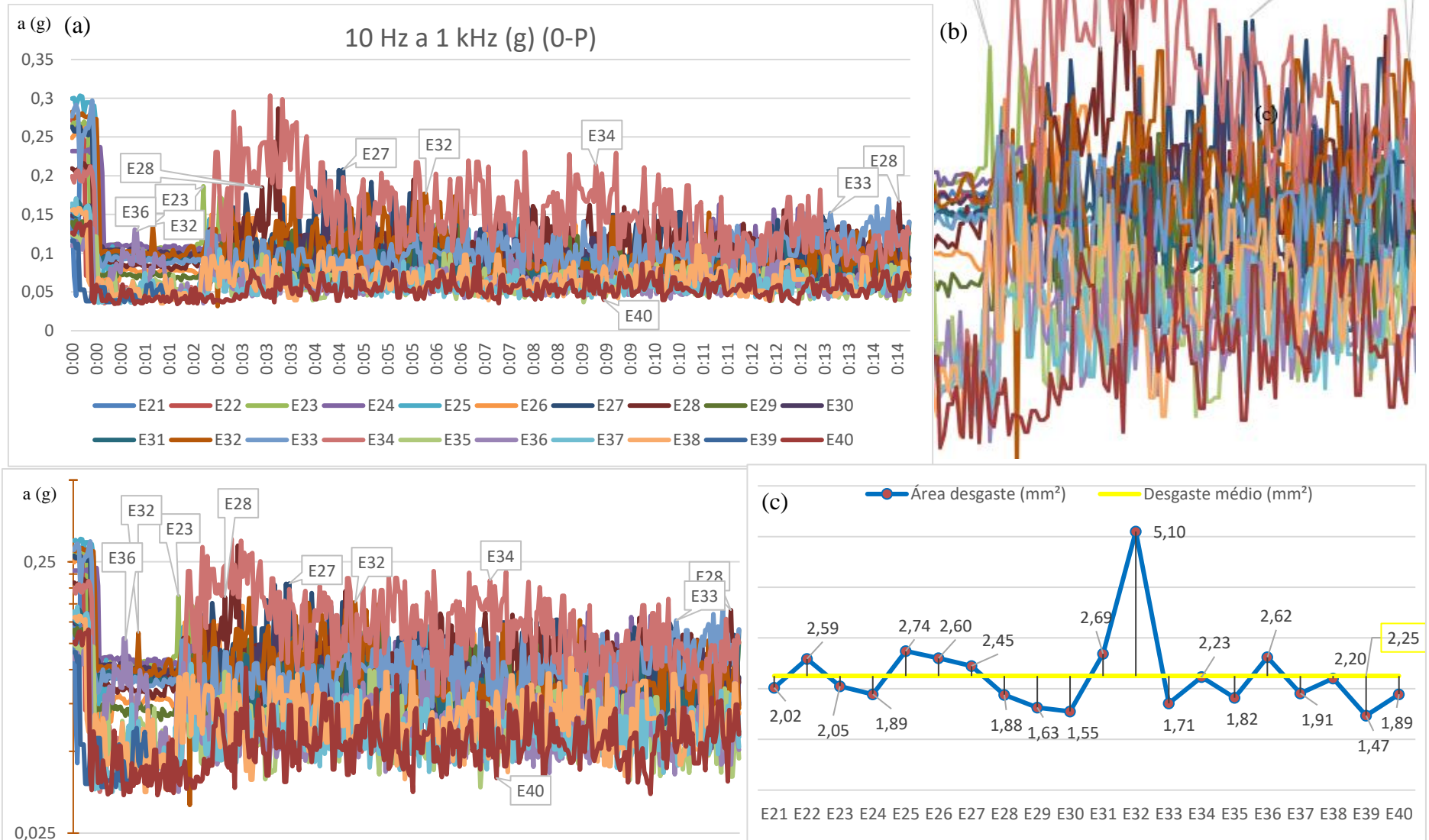


Figura 4.17: (a) Valores de níveis globais de 10 Hz a 1 kHz (0-P) ; (b) Zoom do momento de aumento de carga; (c) Área de desgaste

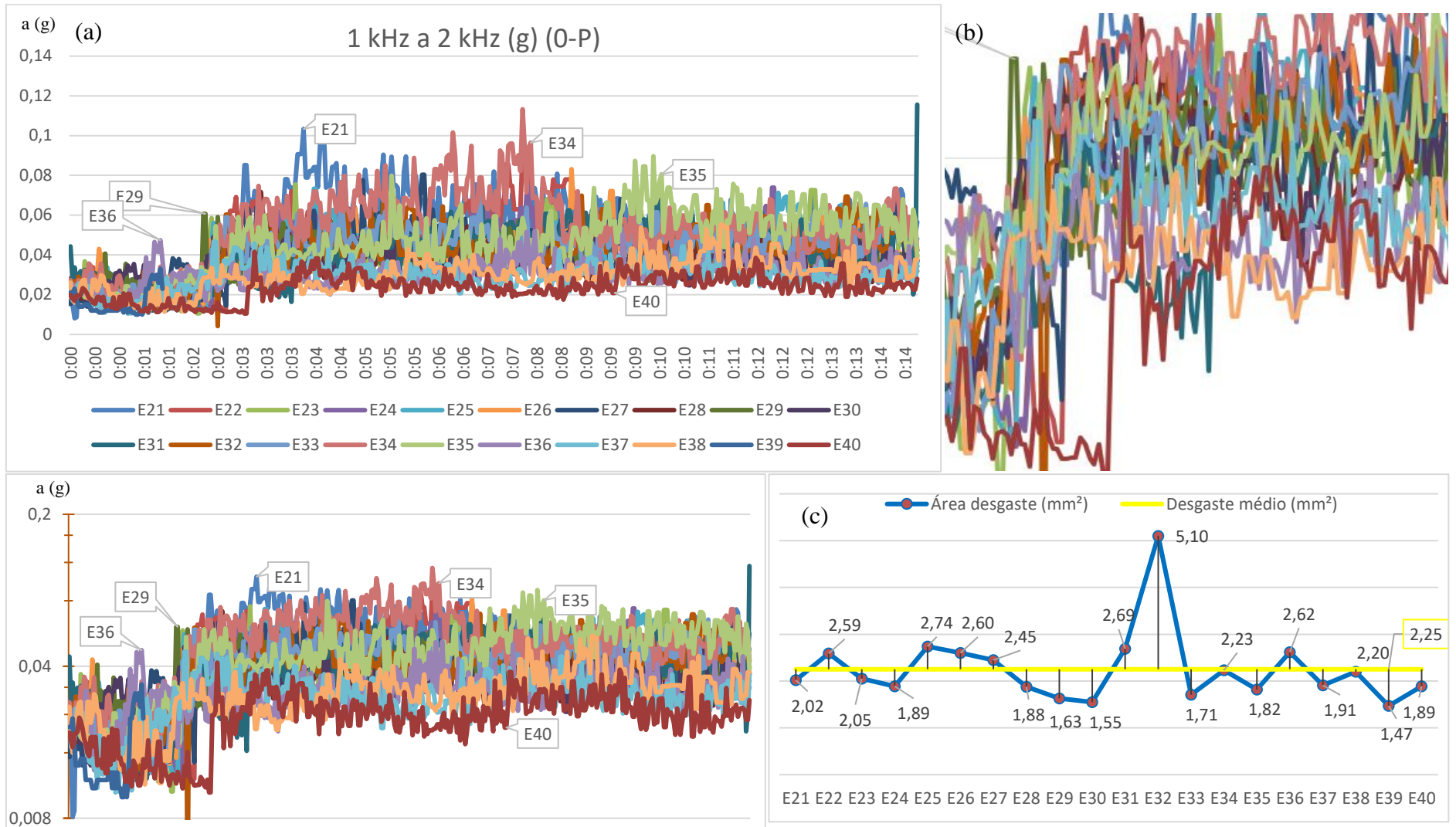


Figura 4.18 - (a) Valores de níveis globais de 1 kHz a 2 kHz (0-P) ; (b) Zoom do momento de aumento de carga; (c) Área de desgaste.

Para os valores de níveis globais, de zero a pico (0-P), na faixa de 10 Hz a 1kHz, não foram observadas correlações entre nível de vibração e desgaste. Ensaios que obtiveram área de desgaste abaixo da média tiveram destaque na vibração, para esta faixa de frequência, enquanto que ensaios que tiveram desgaste acima da média não apresentaram vibração em destaque.

Valores de níveis globais de 1 kHz a 2 kHz, (0-P), são apresentados na Figura 4.18.

Para os valores de níveis globais, de zero a pico (0-P), na faixa de 1 kHz a 2 kHz, também não foram observadas correlações entre nível de vibração e desgaste.

Baixa correlação entre desgaste e destaque de vibração na faixa de 10 Hz a 2 kHz (0-P) se deve pelo fato de que muitas das vibrações nesta faixa de frequência tem origem do próprio equipamento utilizado para os ensaios.

Valores de níveis globais de 2 kHz a 8 kHz, (0-P), são apresentados na Figura 4.19.

Valores de níveis globais de 8 kHz a 25 kHz, (0-P), são apresentados na Figura 4.20.

(Intencionalmente deixado em branco)

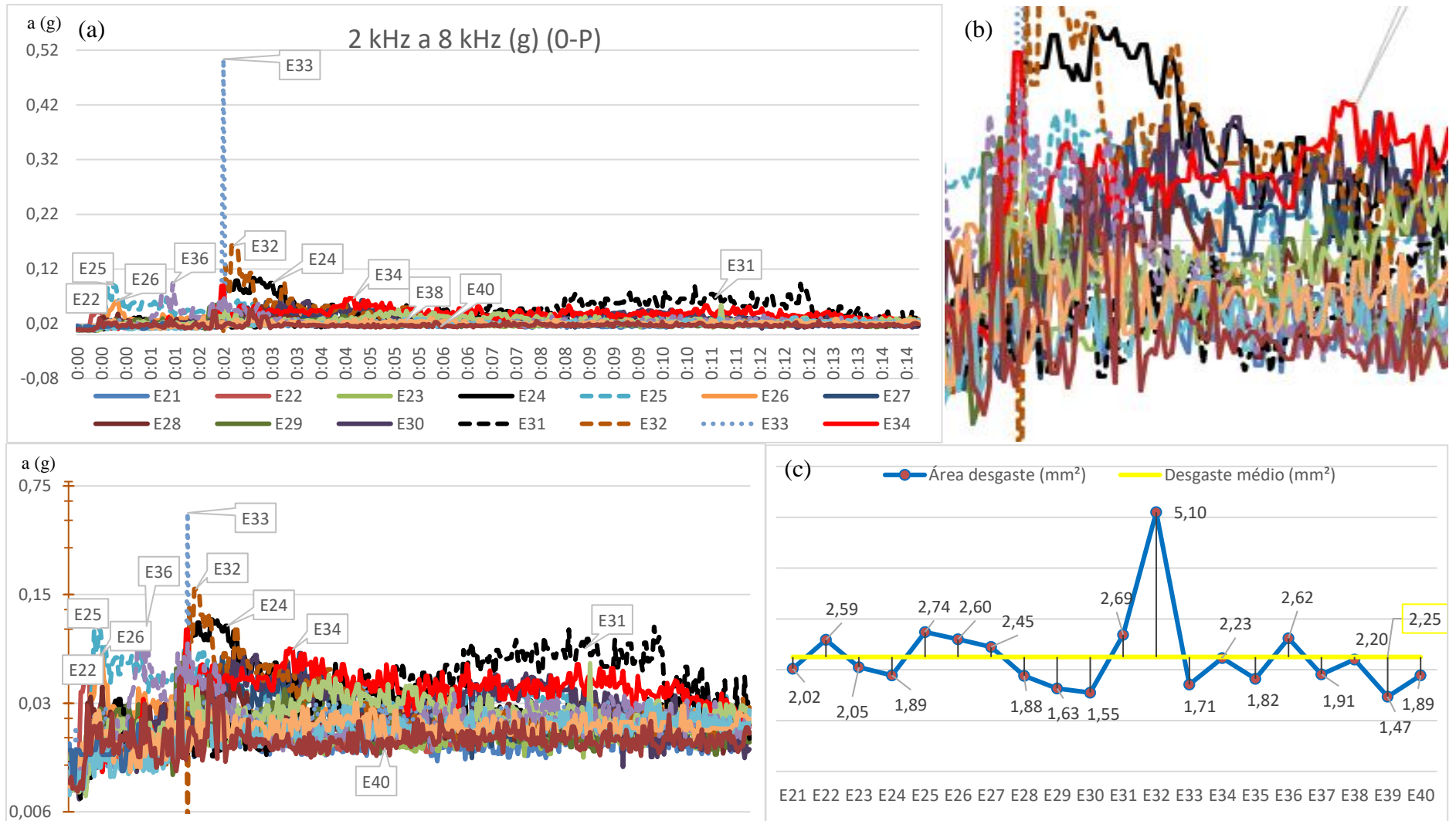


Figura 4.19 - (a) Valores de níveis globais de 2 kHz a 8 kHz (0-P) ; (b) Zoom do momento de aumento de carga; (c) Área de desgaste

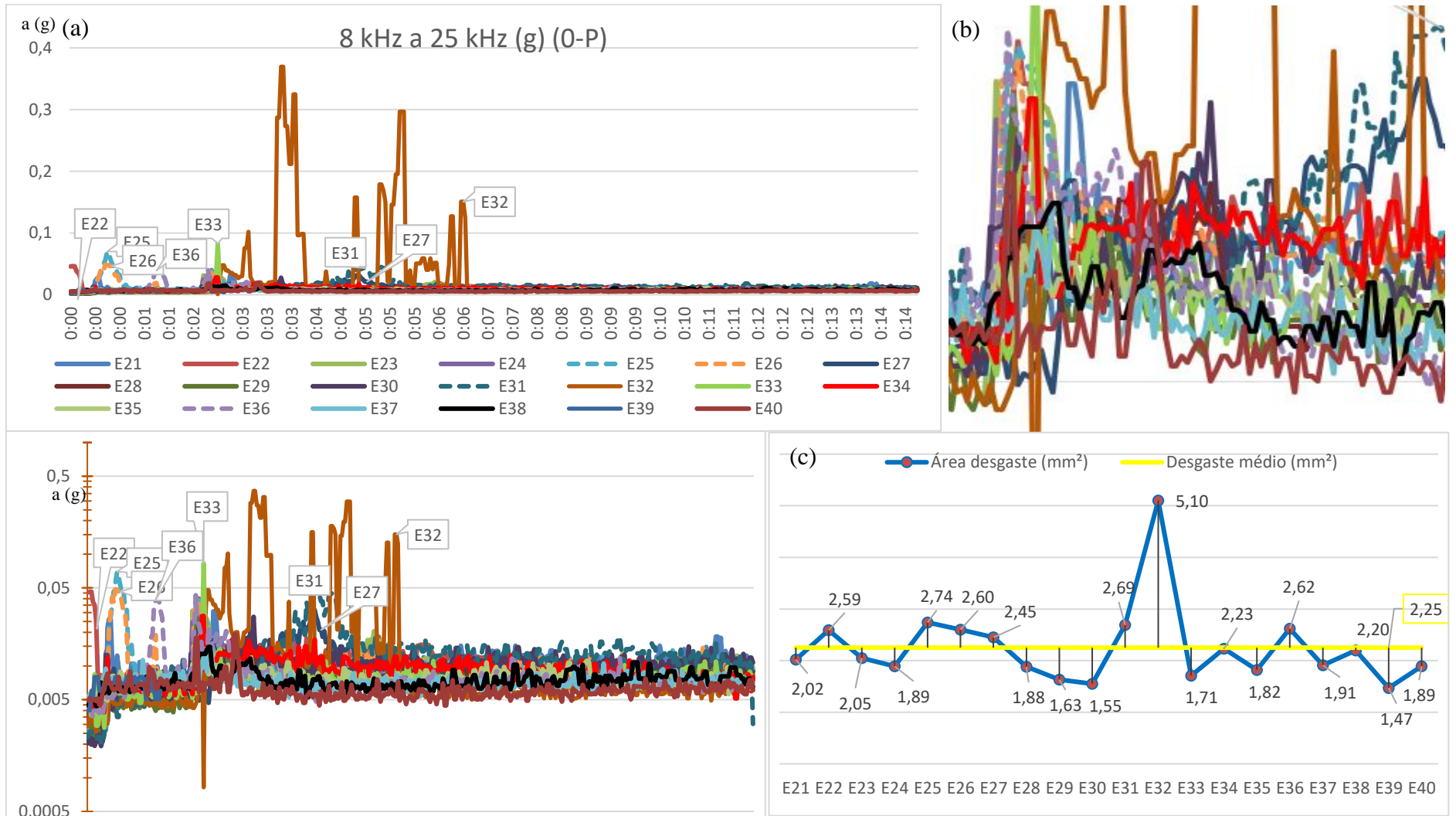


Figura 4.20 - (a) Valores de níveis globais de 8 kHz a 25 kHz (0-P); (b) Zoom do momento de aumento de carga; (c) Área do desgaste.

Diferente do observado nas faixas de 10 Hz a 2 kHz, de 0-P, valores de níveis globais, de zero a pico (0-P), na faixa de 2 kHz a 8 kHz, de 0-P, Figura 4.19, apresentam correlações entre vibração e desgaste, com destaque para curvas que apresentaram valores vibracionais acima da média nos valores de níveis globais em RMS.

Para faixa de valores de níveis globais entre 8 kHz a 25 kHz, de 0-P, Figura 4.20, foi possível visualizar picos de vibração, em algum momento dos ensaios, das amostras que sofreram maior desgaste.

Com exceção das amostras dos ensaios E34 e E38, todos os outros que sofreram desgaste acima da média, apresentaram destaque de vibração em algum momento dos ensaios.

Vibração acima da média, referente a curva do ensaio E34, foi observado nos valores de níveis globais de 2 kHz a 8 kHz, contudo não apresentou picos para o ensaio E27, que nesta faixa de frequência pode-se observar.

A partir das análises realizadas em cada uma das faixas de frequência, uma avaliação qualitativa da correlação entre vibração e desgaste é apresentada na Tabela 4.5.

Tabela 4.5 - Faixas de frequência com vibração em destaque em algum momento do ensaio.

Ensaio	Área desgaste (mm <sup>2</sup> )	10 Hz a 25 kHz (RMS)	1 kHz a 25 kHz (RMS)	8 kHz a 25 kHz (RMS)	2 kHz a 8 kHz (0-P)	8 kHz a 25 kHz (0-P)
E21	2,02					
E22	2,59	✓	✓	✓	✓	✓
E23	2,05					
E24	1,89	✗	✗		✗	
E25	2,74	✓	✓	✓	✓	✓
E26	2,6	✓	✓	✓	✓	✓
E27	2,45					✓
E28	1,88					
E29	1,63					
E30	1,55		✗	✗		
E31	2,69	✓	✓	✓	✓	✓
E32	5,1	✓	✓	✓	✓	✓
E33	1,71	P	P	P	P	P
E34	2,23	✓	✓		✓	
E35	1,82					
E36	2,62	✓	✓	✓	✓	✓
E37	1,91					
E38	2,2					
E39	1,47					
E40	1,89					

✓ - Boa correlação entre desgaste e vibração

✗ - Baixa correlação entre desgaste e vibração

P - Pico esbelto de vibração, referente a um espectro apenas  
Desgaste médio - 2,25 mm<sup>2</sup>

A partir de uma análise em que vibração e desgaste são relacionados, a única amostra que sofreu desgaste próximo da média e não apresentou vibração acima da média, em nenhuma das faixas de frequência analisadas, tanto em RMS, quanto em 0-P, foram os valores registrados durante o ensaio E38.

A única faixa de frequência que apresentou boa correlação entre vibração e desgaste, e permitiu a identificação de comportamento vibracional atípico no ensaio E27, que sofreu desgaste acima da média, foi a faixa de frequência entre 8 kHz e 25 kHz de 0-P.

Faixas de frequência de 0-P, de 10 Hz a 1 kHz e de 1 kHz a 2kHz, não apresentaram boa correlação entre desgaste e vibração.

As análises dos dados vibracionais indicam que a área de desgaste pode estar relacionada muitas vezes a episódios de curta duração, ao longo dos ensaios, que ensejam em um desgaste maior ou menor.

Observam-se picos de vibração ou na primeira etapa do ensaio, ou na segunda etapa do ensaio, uma hipótese atribuída ao fato, é de que a partir do momento que a esfera sofre o primeiro desgaste, as tensões são reduzidas com aumento da área de contato. Valores da área de contato segundo a Teoria de Hertz para os dois valores de carga aplicados nos ensaios de E21 a E40 são apresentadas na Tabela 4.4.

No Anexo I são apresentados os dados de diferentes faixas de frequência por ensaio.

Os resultados apresentados mostram que realizar testes de desgaste por deslizamento sem o monitoramento de vibrações, é desprezar um parâmetro determinante destes testes.

#### **4.5.2 Relação entre temperatura e desgaste**

Busca-se uma relação entre temperatura do óleo lubrificante e a área de desgaste. Os valores registrados ao longo dos ensaios são apresentados na Figura 4.21, a seguir.

(Intencionalmente deixado em branco)

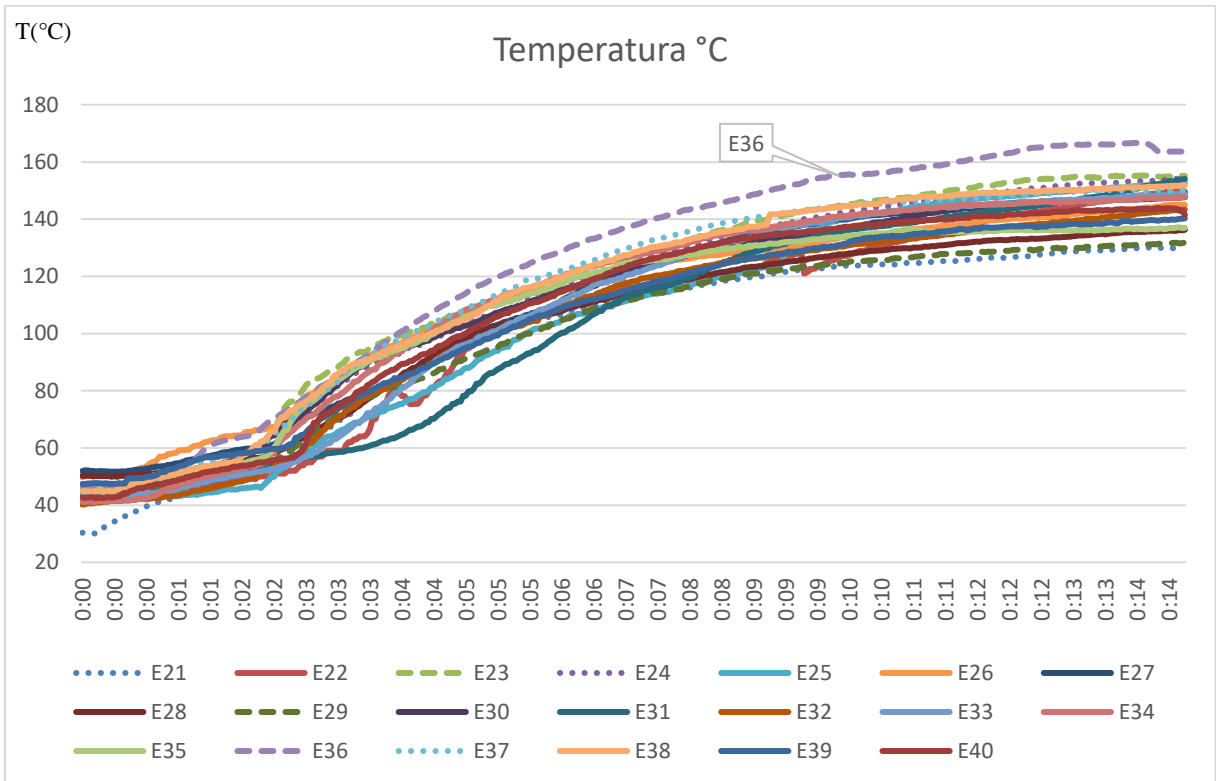


Figura 4.21 - Valores de temperatura do óleo durante os ensaios.

Além da evolução da temperatura por ensaio, na Figura 4.22, apresenta-se a relação entre temperatura máxima do óleo durante os ensaios e a área do desgaste para cada um dos ensaios.

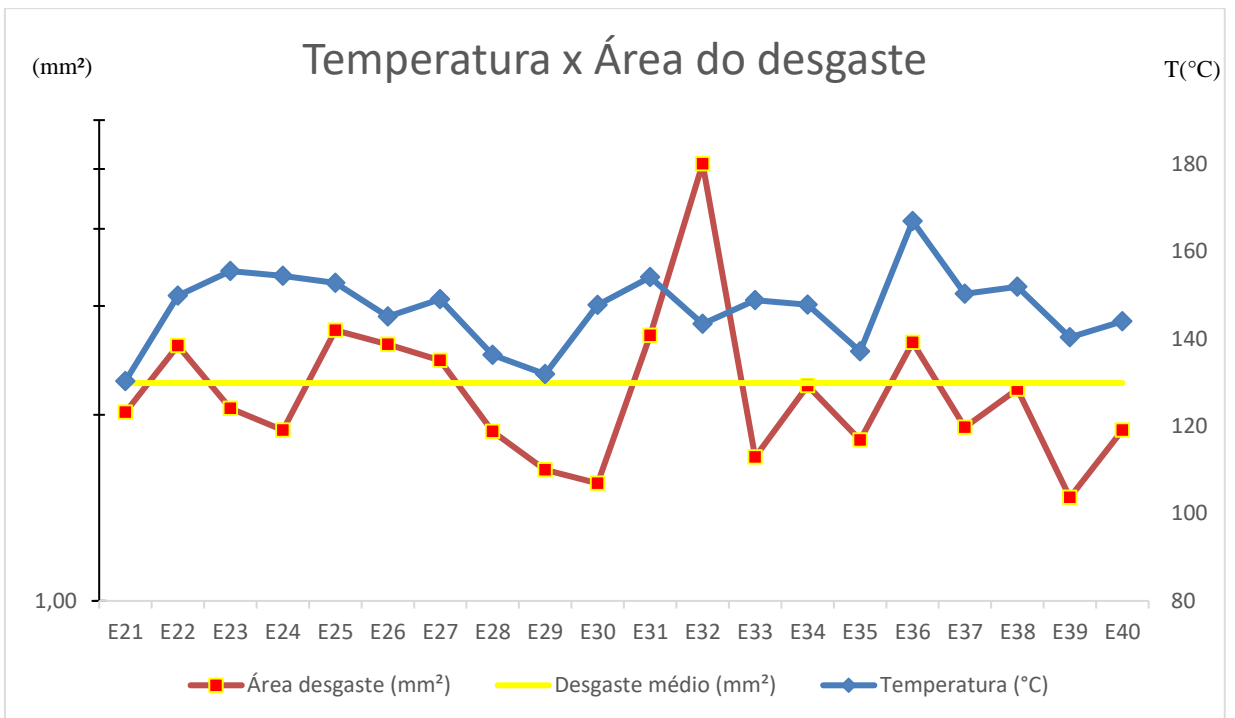


Figura 4.22 - Relação entre temperatura máxima registrada e desgaste.

Embora não seja o objetivo deste trabalho pormenorizar a relação entre desgaste e temperatura, ela não pode ser desprezada. A temperatura, é dentre os parâmetros utilizados na escolha de um lubrificante, das mais importantes. A viscosidade, de acordo com o índice de viscosidade, é definida para uma dada temperatura do lubrificante.

Pode-se perceber a mesma tendência entre as curvas de desgaste e temperatura apresentadas na Figura 4.22, com aumento da temperatura máxima para maioria dos ensaios que resultaram em desgaste acima da média. As exceções são observadas para as amostras E23 (SAE80 GL-4 com Aditivos B), E24 (SAE80 GL-4 com Aditivos C), E30 (SAE90 GL-5), e E33 (SAE 10W30 com Aditivo A) todas com temperatura acima da média e desgaste abaixo da média. Exceção também para a amostra E32 (SAE 10W30) que ficou com temperatura abaixo da média e desgaste acima da média.

Neste contexto, atribui-se a elevação da temperatura, duas causas. A primeira, e mais observada, em decorrência do calor gerado pelo atrito, conduzido para o óleo lubrificante. A segunda, atribuída como sendo a causa da elevação da temperatura nos ensaios E23, E24, E30 e E33, em consequência do cisalhamento do filme lubrificante formado pelos aditivos de extrema pressão presentes no óleo lubrificante e/ou nos aditivos adicionados.

No caso da amostra E32, embora não tem existido relação entre temperatura e desgaste, os valores de vibração em altas frequências durante os ensaios, justificam o desgaste muito superior à média.

### **4.5.3 Resultados obtidos via Microscópio Eletrônico de Varredura**

A superfície do desgaste de 6 amostras foram caracterizadas no MEV, com aumentos de 100X e 1000X, para as amostras E26, E31, E34, E35 e E37. Aumento de 75X e 1000X para a amostra E32. Optou-se por caracterizar a superfície desgastada de amostras com os 3 óleos lubrificantes sem aditivos e 3 amostras com os 3 tipos de aditivos aplicados ao óleo SAE 10W30. O aumento de 75X e não de 100X na amostra E32 se deu pelo fato de não abranger toda a superfície do desgaste no aumento de 100X, conforme Figura 4.23.

(Intencionalmente deixado em branco)

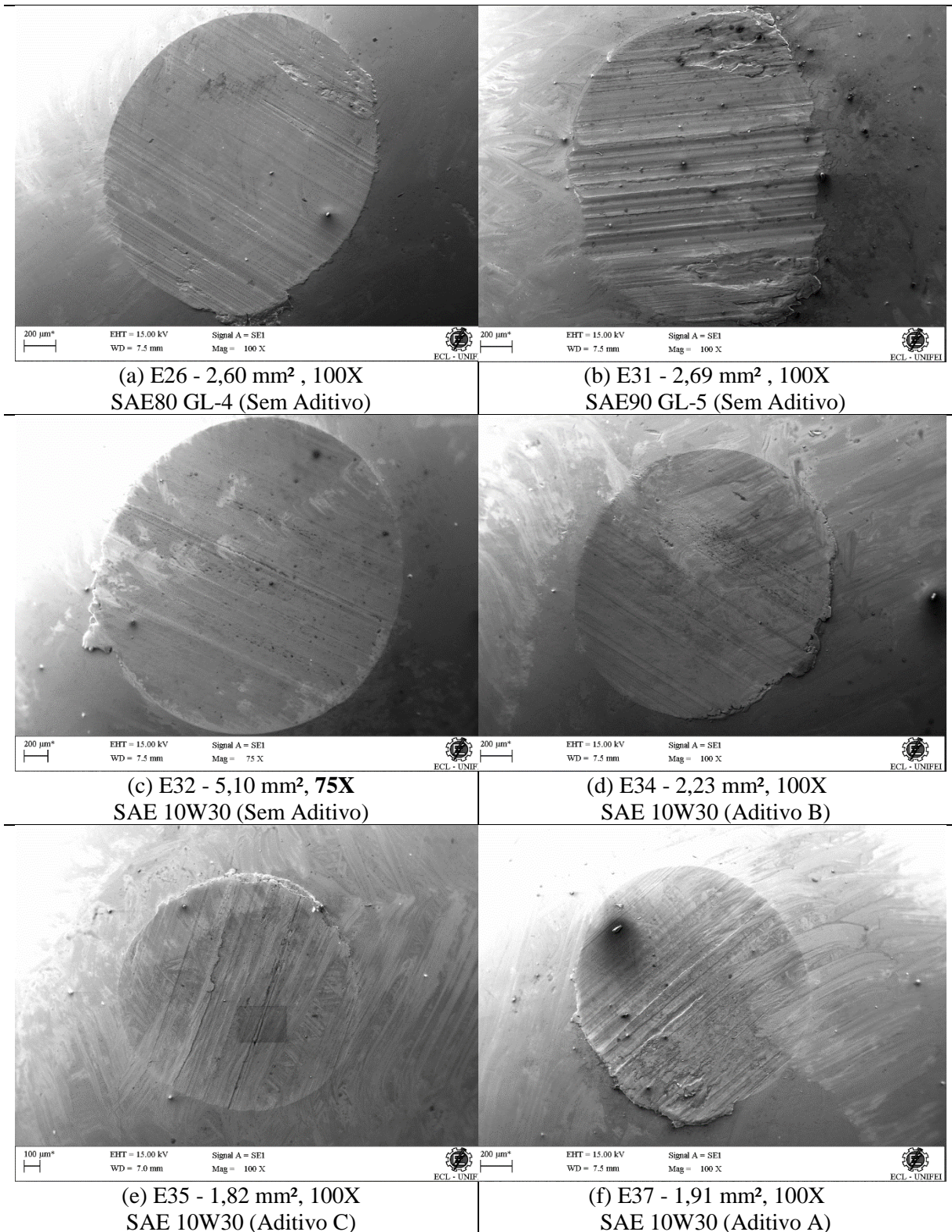


Figura 4.23 - Imagens do desgaste obtidas no MEV.

O maior desgaste ocorreu com a amostra E32, Figura 4.23 (c), com óleo SAE 10W30, sem aditivo, com sinais de desgaste predominante por abrasão. Amostras E26, E31, E34 e E37, Figuras 4.23 (a), 4.23 (b), 4.23 (d) e 4.23 (e), com sinais de deslocamento de material para borda do desgaste, o que indica desgaste também por adesão durante os ensaios. Imagens com

aumento de 1000X são apresentadas na Figura 4.24.

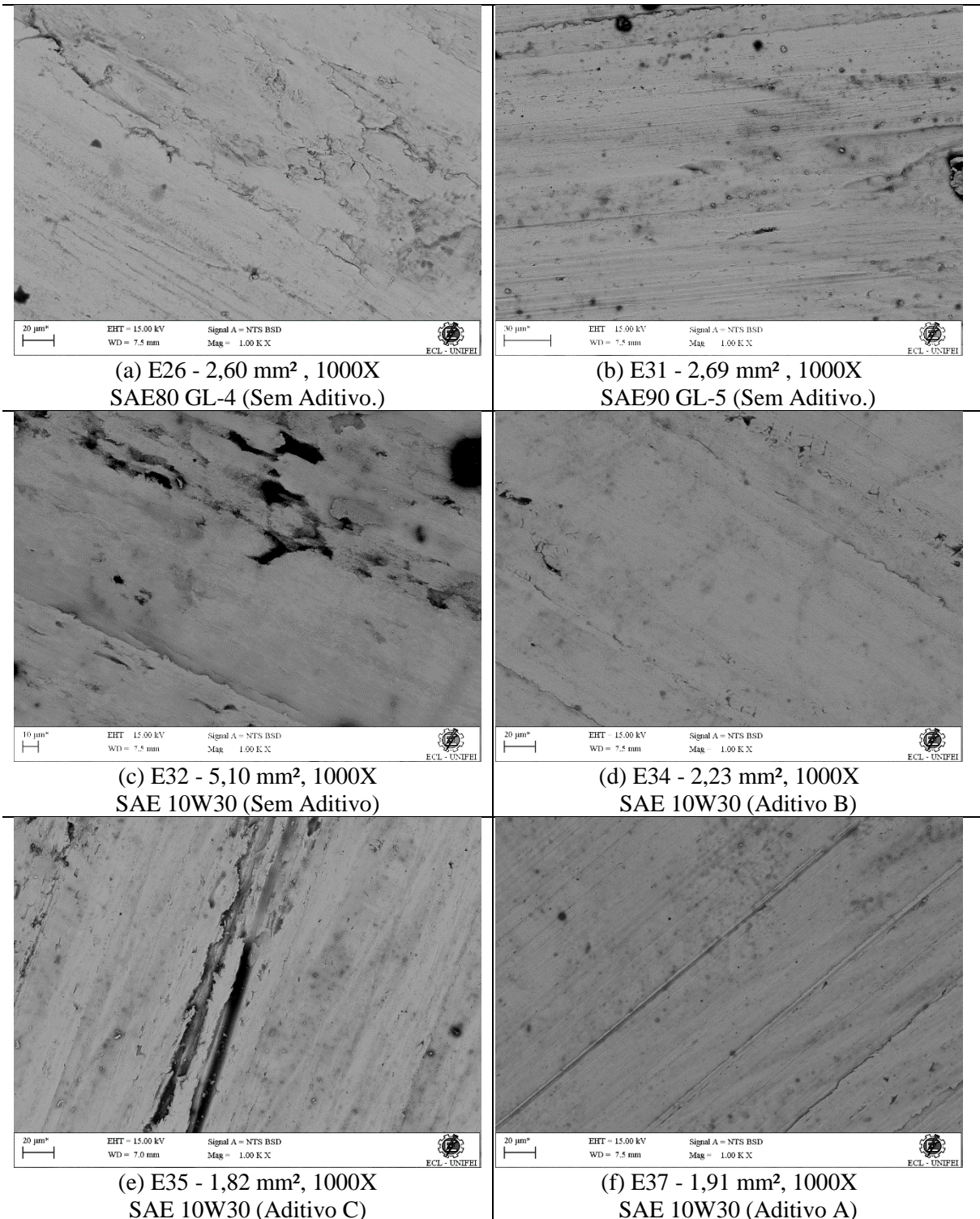


Figura 4.24 - Imagens da superfície do desgaste onde foi realizada EDS

As imagens da Figura 4.24 indicam desgaste predominante por abrasão, com sinais de desgaste por adesão, onde há o deslocamento de material. A formação de pequenas cavidades, que são mais observadas nas amostras E32 e E34, em consequência do número de ciclos, que foi de aproximadamente 4.950, remete como sendo também por abrasão, e não por fadiga

superficial.

#### 4.5.4 Resultados obtidos via Espectroscopia por Energia Dispersiva

A espectroscopia por energia dispersiva (EDS) foi realizada nas áreas apresentadas nas Figura 4.24. Na Figura 4.25 apresenta-se a distribuição de enxofre, elemento utilizado como aditivo de extrema pressão e identificado na superfície desgastada de todas as amostras.

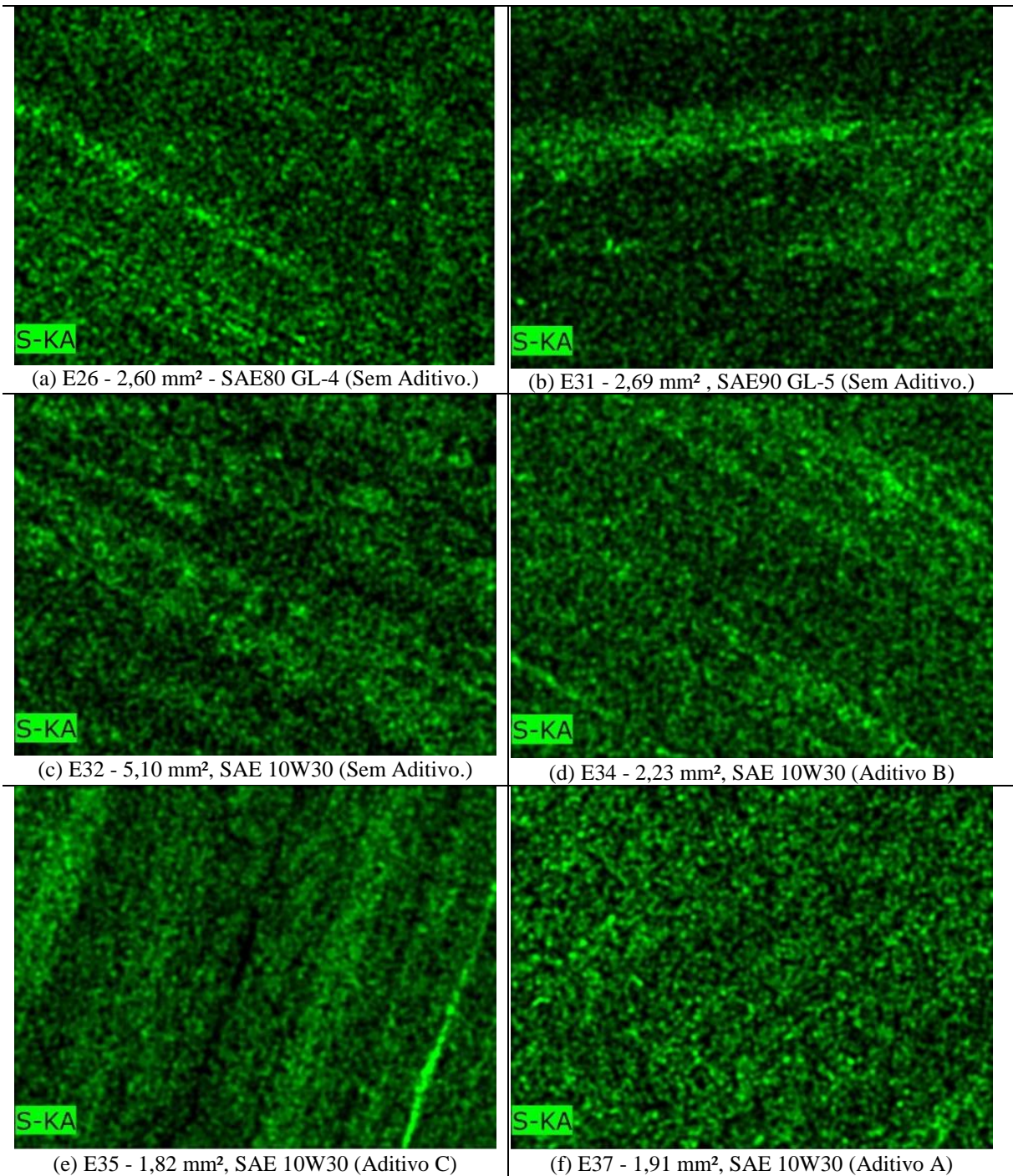


Figura 4.25 - Distribuição de enxofre em parte da superfície desgastada, MAG: 1000x HV: 15kV WD: 7 mm

Na Figura 4.25, o enxofre é representado pela cor verde, onde regiões com maior quantidade de enxofre mostram-se mais pigmentadas de verde.

Um espectro dos elementos químicos presentes nas áreas desgastadas da Figura 4.24 são apresentados na Figura 4.26, a seguir.

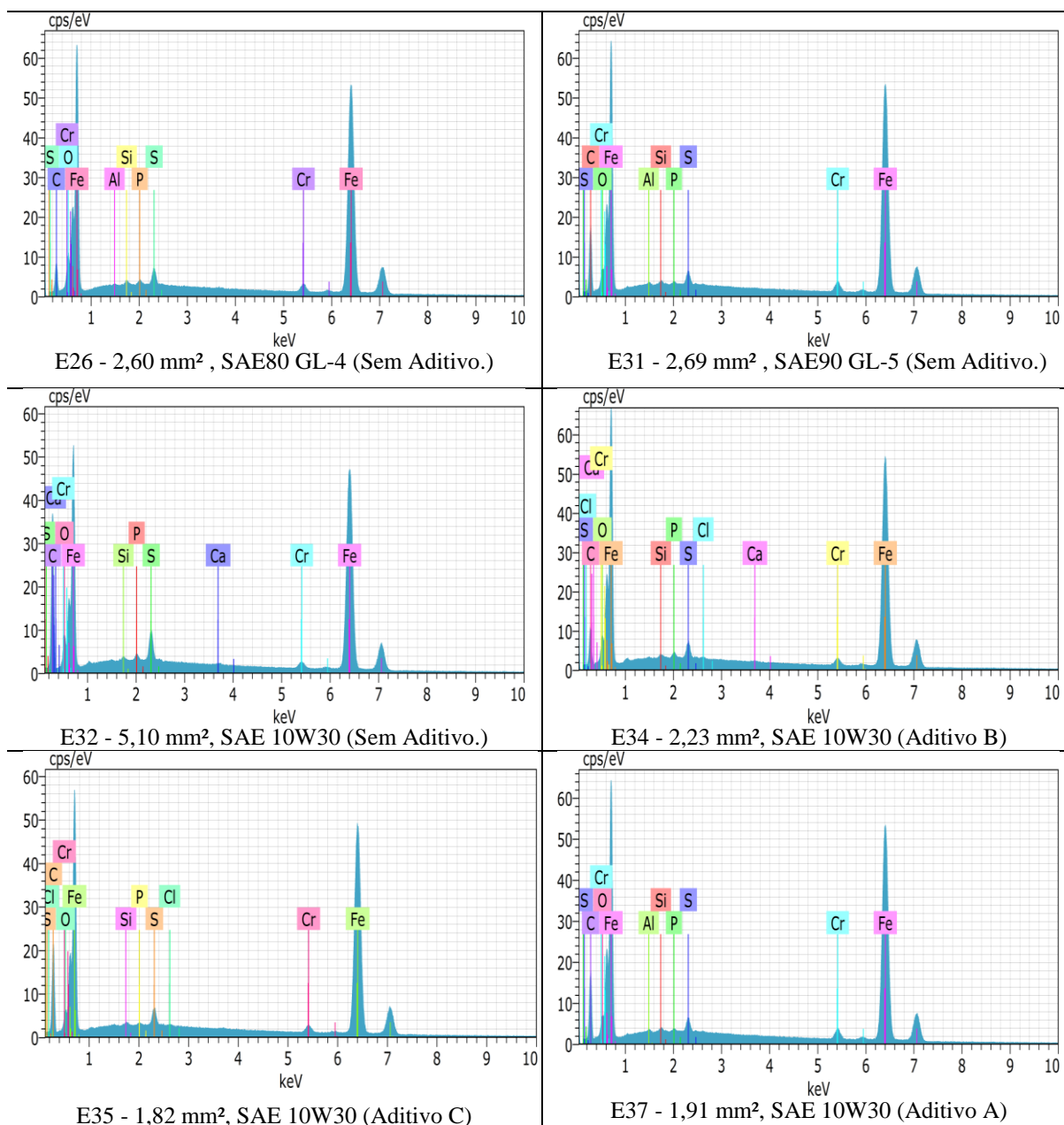


Figura 4.26 - Distribuição de elementos em parte da superfície desgastada, pesq. livre, MAG:1000x HV:15kV

Enxofre, fósforo e cloro são os aditivos comumente utilizados em lubrificantes de extrema pressão, em especial enxofre e fósforo, como apontado por Stachowiak e Batcheor (2000). Como observado nos resultados apresentados na Figura 4.26, observa-se enxofre e fósforo em todas as amostras, cloro em quantidade significativa foi observado na superfície de algumas das amostras. Outros elementos como cálcio e alumínio também foram observados em algumas das

superfícies.

Para facilitar a comparação, apresenta-se os valores obtidos na forma de gráfico, com a Figura 4.27.

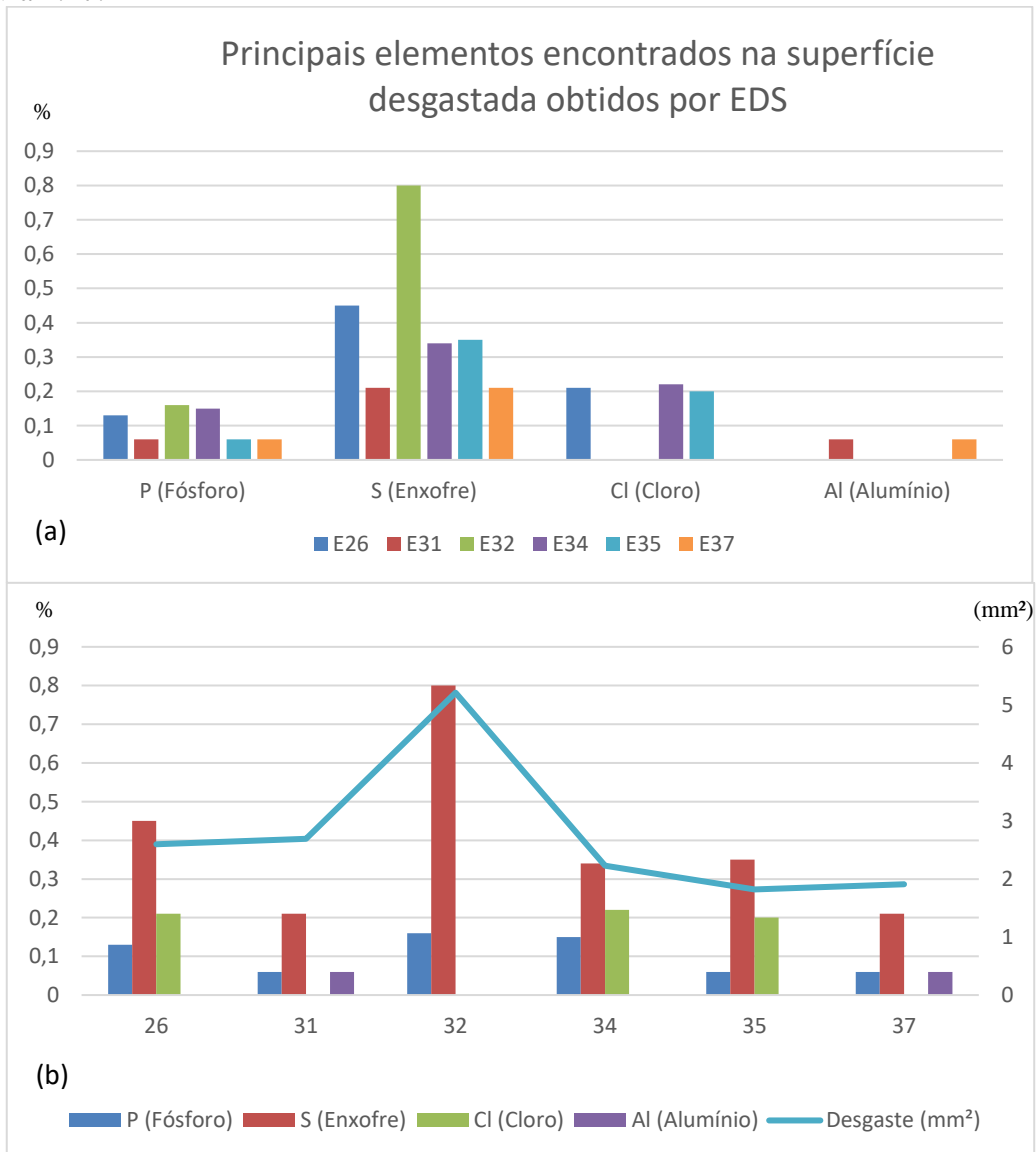


Figura 4.27 - Distribuição de P, S, Cl e Al nas amostras de acordo com a concentração em porcentagem de peso não normalizada do elemento (Unn. C [% Wt.]). (a) Por elementos químicos; (b) Por amostras.

Como já mencionado no Capítulo 2, segundo Stachowiak e Batcheor (2000), se um aditivo de lubrificante contendo enxofre, cloro ou fósforo estiver presente, então um filme de sulfeto, cloreto, fosforeto ou fosfato se forma na superfície exposta do material, ou seja, na superfície desgastada.

Considerando que as superfícies submetidas a análise de EDS foram anteriormente limpas com éter etílico, os elementos químicos identificados são dos filmes formados na superfície desgastada enquanto submetidas a desgaste por deslizamento.

Os resultados mostram que todas as superfícies apresentavam fósforo e enxofre. Nas amostras E26, E34 e E35 foi identificado cloro em parte das superfícies desgastadas. Alumínio

foi identificado em parte das superfícies desgastadas de E31 e E37. Cálcio foi identificado em parte da superfície desgasta das amostras E32 e E34.

Optou-se por realizar análise de EDS nas amostras com óleo lubrificante SAE 10W30, SAE 80 GL-4 e SAE 90 GL-5 sem adição de aditivos, e também para amostras nas quais os Aditivos A, B e C tenham sido adicionados ao óleo SAE 10W30, que não é indicado para uso em condições de extrema pressão. Vale ressaltar ainda, que a viscosidade do óleo SAE 10W30 é considerada baixa para aplicação em condições de extrema pressão e mesmo assim, com aditivos, apresentou área de desgaste abaixo da média.

A superfície com maior desgaste foi da amostra E32, SAE 10W30 sem aditivo, que também registrou as maiores quantidades de enxofre e fósforo, sem outros elementos relevantes na superfície analisada. Ao passo que nas amostras E34, E35 e E7 que utilizaram o mesmo óleo lubrificante SAE 10W30, contudo com aditivos, registram quantidades muito menores destes elementos em suas superfícies. Atribui-se à formação de filmes, formados a partir de elementos ou combinações distintas da de enxofre e fósforo, a partir dos elementos presentes nos aditivos, que levaram à redução do desgaste nestas amostras.

#### **4.5.5 Relação entre desgaste e lubrificante utilizado**

Foram utilizados três diferentes lubrificantes, com diferentes viscosidades e três aditivos antidesgaste, antiatrito ou condicionadores de metais.

Os experimentos realizados tiveram como objetivo principal a identificação de características vibracionais que pudessem ser relacionadas ao atrito, e conseqüentemente ao desgaste de peças submetidas a deslizamento.

Embora uma relação entre os desgastes e o tipo de lubrificante utilizados seja desenvolvida, não tem como objetivo avaliar a eficácia de nenhum dos produtos utilizados durante os experimentos. Caso assim fosse, a metodologia aplicada seguiria estratégia distinta da desenvolvida neste trabalho.

Na Tabela 4.6 apresenta-se uma relação entre os lubrificantes e o desgaste.

(Intencionalmente deixado em branco)

Tabela 4.6 - Relação entre desgaste e lubrificante aplicado no ensaio

Ensaio	Área desgaste (mm <sup>2</sup> )	SAE 80 GL4	SAE 90 GL5	SAE 10W30	Sem aditivo	Aditivo A	Aditivo B	Aditivo C
E21	2,02	X			X			
E22	2,59	X				X		
E23	2,05	X					X	
E24	1,89	X						X
E25	2,74	X			X			
E26	2,6	X			X			
E27	2,45	X				X		
E28	1,88	X					X	
E29	1,63	X						X
E30	1,55		X		X			
E31	2,69		X		X			
E32	5,1			X	X			
E33	1,71			X		X		
E34	2,23			X			X	
E35	1,82			X				X
E36	2,62			X	X			
E37	1,91			X		X		
E38	2,2			X			X	
E39	1,47			X				X
E40	1,89			X				X
MÉDIA	2,25							

X - Relação entre ensaio e lubrificante utilizado

A análise dos dados apresentados na Tabela 4.6, em especial, os desgastes gerados nos ensaios E30 e E31, que foram de 1,55 mm<sup>2</sup> e 2,69 mm<sup>2</sup>, respectivamente, utilizaram o mesmo tipo de lubrificante, SAE 90 GL-5, mesmas cargas, mesmo processo de preparação de peças, características de desgaste semelhantes. Contudo, áreas de desgaste muito diferentes, e curvas vibracionais também muito distintas foram observadas durante as análises para esses ensaios. As causas atribuídas, embora desconhecidas, foram seguidas de valores de níveis globais acima dos valores observados no ensaio E30. O que corrobora com a premissa de que é pertinente o uso do monitoramento de vibração durante o processo de deslizamento, seja em casos reais, seja na realização de ensaios de desgaste por deslizamento.

Os dados da Tabela 4.6 são apresentados no gráfico da Figura 4.28.

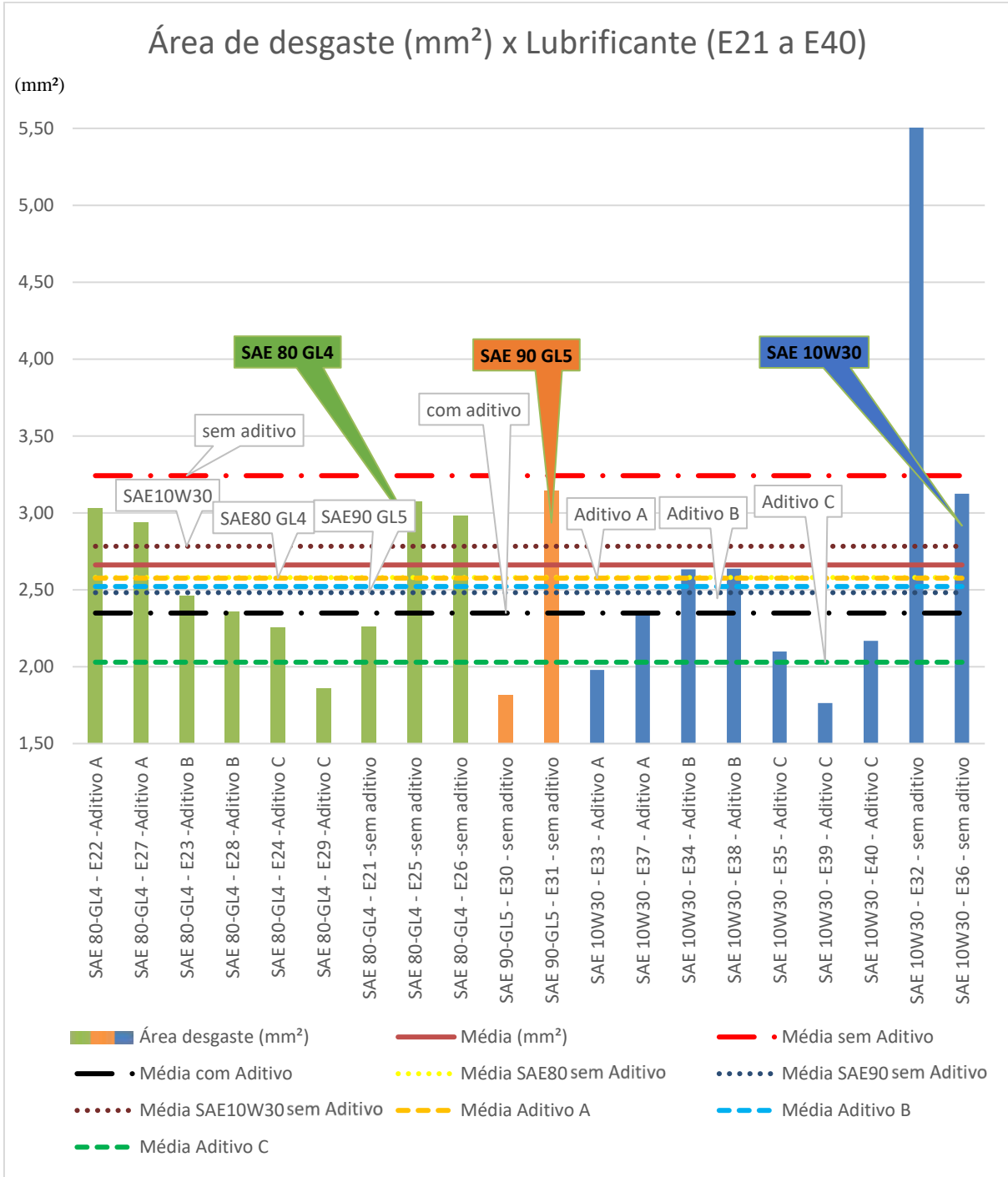


Figura 4.28 - Relação entre lubrificantes e desgaste.

O gráfico acima, permite algumas inferências, principalmente com relação ao resultado apresentado entre diferentes lubrificantes.

Embora o objetivo principal não seja o de avaliar óleos lubrificantes, nem mesmo os aditivos utilizados nos experimentos, pode-se observar, para este conjunto de dados, um desgaste médio com aditivos muito inferior ao desgaste médio sem aditivo, mesmo para o óleo formulado para condições de extrema pressão, no caso, o óleo SAE 80 GL4.

Observa-se desempenho diferente dos aditivos de acordo com o óleo utilizado. O aditivo

A, obteve bom desempenho ao ser adicionado ao óleo SAE 10W30, contudo, não se observou diferença relevante ao ser adicionado ao óleo SAE 80 GL-4.

Para as amostras com adição de aditivo B ou aditivo C, bom desempenho é visto tanto no óleo SAE 10W30, quanto no óleo SAE 80 GL-4.

Em um ensaio utilizando apenas óleo SAE 90 GL-5, sem adição de aditivos, obteve-se a segunda menor área de desgaste registrada de todos os 20 ensaios.

Como mencionado por Stachowiak e Batcheor (2000), a previsão do desempenho de um lubrificante a partir da especificação química ainda não é possível, o que se restringe a testes de aplicações específicas.

## Capítulo 5

### CONCLUSÕES E PERSPECTIVAS FUTURAS

No presente trabalho, propôs-se a identificação de desgaste em componentes mecânicos submetidos a deslizamento, para diferentes combinações de lubrificantes e aditivos, via análise de vibrações, a partir de ensaios experimentais.

Os sinais vibracionais obtidos nos ensaios foram analisados, e indicaram faixas de frequência com maior alteração de energia vibratória, para os instantes seguintes ao aumento de carga. Ficando estabelecidas, para avaliação da correlação entre desgaste e vibração dos ensaios realizados, as seguintes faixas de frequência: 10 Hz a 25 kHz (RMS), 1 kHz a 25 kHz (RMS), 8 kHz a 25 kHz (RMS), 10 Hz a 1 kHz (0-P), 1 kHz a 2 kHz (0-P), 2 kHz a 8 kHz (0-P) e de 8 kHz a 25 kHz (0-P).

Faixas de frequência de 0-P, de 10 Hz a 1 kHz e de 1 kHz a 2kHz, não apresentaram boa correlação entre desgaste e vibração.

Uma boa correlação entre valores de níveis globais e desgaste para as faixas de 10 Hz a 25 kHz (RMS), 1 kHz a 25 kHz (RMS), 8 kHz a 25 kHz (RMS), 2 kHz a 8 kHz (0-P) e de 8 kHz a 25 kHz (0-P) foi observada. Contudo, nenhuma das faixas apresentou dados que pudessem identificar episódios que indicassem desgaste, para todos os ensaios. O que indica a necessidade de monitoramento em diferentes faixas de frequência.

A única faixa de frequência que apresentou boa correlação entre vibração e desgaste, e permitiu a identificação de comportamento vibracional atípico no ensaio E27, que sofreu desgaste acima da média, foi a faixa de frequência entre 8 kHz e 25 kHz de 0-P. Já com relação ao ensaio E38, cuja amostra apresentou desgaste acima da média, não apresentou comportamento vibracional atípico em nenhuma das faixas analisadas, em nenhum momento do ensaio.

A análise dos dados vibracionais, em diferentes faixas de frequência, indica que o desgaste pode estar relacionado a episódios de curta duração. Já que boa correlação foi observada baseada na identificação de picos de valores de níveis globais nas diferentes faixas de frequência analisadas.

Boa correlação entre temperatura e desgaste é observada, com aumento da temperatura máxima para maioria dos ensaios que resultaram em desgaste acima da média, em consequência do calor gerado pelo atrito, que é conduzido para o lubrificante. As exceções, vistas nos ensaios E23, E24, E30 e E33, com temperaturas máximas acima da média para desgastes abaixo da média, tem como causa provável, o cisalhamento do filme lubrificante formado pelos aditivos de extrema pressão presentes no óleo lubrificante e/ou nos aditivos adicionados. No caso da amostra E32, embora não tem existido relação entre temperatura e desgaste, os valores de vibração em altas frequências durante os ensaios, justificam o desgaste muito superior à média.

Os resultados da espectroscopia por energia dispersiva (EDS), realizada em parte da superfície desgastada de 6 amostras, mostram que todas as superfícies apresentavam fósforo e enxofre. Em três amostras (SAE 80 GL-4, SAE 10W30 com aditivo B, SAE 10W30 com aditivo C) foi identificado cloro em parte da superfície desgastada. Alumínio foi identificado em parte das superfícies desgastadas de duas amostras (SAE 90 GL-5, SAE 10W30 com aditivo A). Cálcio foi identificado em parte da superfície desgastada de outras duas amostras (SAE 10W30, SAE 10W30 com aditivo B). As imagens geradas pelo microscópio eletrônico de varredura (MEV) indicam desgaste predominante por abrasão. A amostra E32 submetida a desgaste com óleo SAE 10W30, com maior desgaste entre os ensaios, registrou a maior quantidade de enxofre entre as superfícies analisadas.

Ao realizar comparações entre os lubrificantes, a partir da área de desgaste, observou-se, para o conjunto de dados gerados nestes ensaios, um desgaste médio com aditivos muito inferior ao desgaste médio sem aditivo. Como apresentado na Figura 4.28 é percebido, no geral, desgastes menores nos ensaios em que foram adicionados aditivos antidesgaste. Contudo, observa-se desempenho diferente entre os aditivos de acordo com o óleo utilizado. Para o aditivo A, obteve-se bom desempenho ao ser adicionado ao óleo SAE 10W30, contudo, não se observou diferença relevante ao ser adicionado ao óleo SAE 80 GL-4. Já as amostras com adição de aditivo B ou aditivo C, apresentaram bom desempenho, com desgaste abaixo da média, tanto no óleo SAE 10W30, quanto no óleo SAE 80 GL-4.

Embora o objetivo principal deste trabalho não tenha sido o de avaliar desempenho de aditivos antidesgaste, os resultados apresentados, que indicam diminuição do desgaste para os parâmetros avaliados neste trabalho, não deixando dúvida de que mais estudos devem ser

realizados. Estudos esses, que avaliem o resultado do uso destes aditivos, tanto do ponto de vista tribológico, como químico, para distintas aplicações. Já que o desempenho de um lubrificante ainda se restringe aos testes de aplicação no qual foi submetido.

Por fim, frente à boa correlação observada entre o desgaste das amostras e a energia vibratória nas faixas de frequência analisadas, conclui-se que o monitoramento vibracional, como meio de identificação de eventos que resultam em desgaste em componentes submetidos a deslizamento, é pertinente. Assim, o monitoramento vibracional em equipamentos dedicados a avaliação tribológicas, pode fornecer não só maior robustez a estes ensaios, como também ser um importante passo no caminho ainda pouco percorrido das interações vibração, atrito e desgaste.

Alguns tópicos são relevantes para a sequência deste trabalho, dentre eles, destacam-se:

- Desenvolvimento de uma bancada de testes, a partir de modelos já normatizados, agregando tomadas de medidas vibracionais, como parâmetro de medição durante os ensaios;
- Uma avaliação do desgaste com diferentes velocidades relativas de deslizamento, avaliando a taxa de desgaste, com relação aos parâmetros estudados;
- A avaliação da estabilidade química de óleos lubrificantes após a adição de aditivos antidesgaste;
- A realização de ensaios de longa duração;
- E por fim, o uso de técnicas de identificação de parâmetros (redes neurais artificiais), considerando o grande volume de dados gerados durante os ensaios ao monitorar condições vibracionais.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AGOSTINHO, O. L., RODRIGUES. A. C. S., LIRANI, J.; **Tolerâncias, Ajustes, Desvios e Análise de Dimensões**. Editora Edgard Blucher. São Paulo. 295 p. 2004.
- AKAY, A. Acoustics of friction. **Journal of Acoustical Society of America**. v.111, n.4, p. 1525-1548, 2002.
- ALMEIDA, M. T.; ALMEIDA, F. R. V. **Princípios de Diagnósticos de Defeitos em Máquinas Rotativas**. 27 ed. Itajubá: IVMTA, 209 p., 2013.
- ANSI Standards. **B46-1 Surface Texture - Surface Roughness, Waviness, and Lay**. 1995.
- ANSYS® Mechanical™, versão Academic Student 2019 R2. ANSYS, Inc. 2019.
- ASTM Standards. **G40-15 - Standard Terminology Relating to Wear and Erosion**, 2015.
- BANDEIRA, F. M. **Análise da influência do reuso da areia utilizada como abrasivo em ensaio de desgaste de um aço ASTM A242**. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 22 p., 2017.
- BERGER, J. E. **Resistência à corrosão e ao desgaste de recobrimentos metálicos produzidos com ligas amorfizáveis a base de ferro**. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 110 p. 2014.
- BOTH, G. B. **Caracterização e avaliação tribológica de superfícies resistentes ao desgaste para aplicação em ferramentas de conformação a frio**. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 123 p., 2011.
- BOWDEN, F. P.; TABOR, D. **The Friction and Lubrication of Solids**. 2 ed., Oxford: Clarendon Press, 440 p. 1954.

- CHEN, G., **Handbook of friction-vibration interactions**. Woodhead Publishing Limited. 2014.
- ERMAKOV, S.F.; MYSHKIN, N.K., **Liquid-Crystal Nanomaterials: Tribology and Application**. Springer Series in Materials Science, Springer International Publishing AG, Volume 267, 227 p., 2018.
- FALQUETO, L. E. **Estudo do desgaste por deslizamento de ligas de cobalto**. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, 132 p. 2015.
- GARCIA, M. B. **Estudo das características tribológicas de partículas de ZnO e Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> como aditivo para lubrificantes**. Tese (Doutorado) - Universidade Federal do ABC, Santo André. 131 p. 2014.
- GONÇALVES, R.P. **Estudo numérico do efeito de propriedades mecânicas e do atrito no fenômeno de Shakedown**. 2017. 77 p. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, 2017.
- HURTADO, J. A.; KIM K.-S. (1999), 'Scale effects in friction of single asperity contacts. Part I: From concurrent slip to single-dislocation-assisted slip', Proceedings of the Royal Society of London, A455: 3363.
- JOHNSON, K.L. **Contact Mechanics**. Cambridge: Cambridge University Press. 462 p. 1985.
- MARTINS, I. S. **Estudo das características de extrema-pressão e de desgaste de óleos lubrificantes aditivados, ensaiados na máquina de quatro-esferas**. Dissertação (Mestrado) Faculdade de Engenharia do Porto, Porto, Portugal. 126 p. 1995.
- PENHA, R. M. L. **Análise de sinais em regime transiente aplicando a técnica de wavelet**. 1999. 95p. Dissertação (Mestrado) - Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares, São Paulo, 1999.
- QIU, M.; LI, Y.; CHEN, L.; YAN, J. **Bearing Tribology: Principles and Applications**. 1 ed., Beijing, 871 p., 2017.
- RAO, S.S. **Vibrações Mecânicas**. São Paulo: Pearson, 424 p., 2009.
- SONG, X.; ZHENG, S.; ZHANG, J.; LI, W.; CHEN, Q.; CAO, B. **Synthesis of monodispersed ZnAl<sub>2</sub>O<sub>4</sub> nanoparticles and their tribology properties as lubricant additives**. Materials Research Bulletin 47, 4305-4310, 2012.

STACHOWIAK, G.W.; BATCHEOR, A.W. **Engineering Tribology**. University of Western Australia, Australia: Butterworth Heinemann, 769p, 2000.

SUETTI, A. G. L. **Estudo do fenômeno “Stick-slip” aplicado às vibrações de freios automotivos**. 2011. 108 p. Dissertação (Mestrado) - Faculdade de Engenharia Mecânica da Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2011.

SUSKI, C. A. **Estudo do efeito de tratamentos e revestimentos superficiais na vida de ferramentas de conformação mecânica à frio**. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 100 p. 2004.

TAKADOUM, J. **Materials and Surface Engineering in Tribology**. Hoboken: ISTE Ltd and John Wiley & Sons, Inc., 242 p., 2008.

TAYLOR, J. I., **The Vibration Analysis Handbook: A Practical Guide for Solving Rotating Machinery Problems**, p.130, 2003.

TRAJANO, M. F. **Estudo tribológico de biolubrificantes com adição de nanopartículas de óxidos (zinco e cobre)**. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 83 p. 2013.

TRINDADE, E. D. **Efeito do tipo de óleo básico no desempenho tribológico de dialquilditiocarbamato de molibdênio como aditivo para lubrificantes automotivos**. Dissertação (Mestrado) - Escola Politécnica da USP, São Paulo, 132 p. 2014.

WEN, S; HUANG, P. **Principles of Tribology**. 2 ed. Hoboken, NJ: John Wiley & Sons Inc., 2018.

ZUM GAHR, K.H. **Microstructure and wear of material**. Tribology series. 10 ed. Amsterdam: Elsevier Science Publishers, 1987.

# ANEXO I

Gráficos de diferentes faixas de frequência com relação a um mesmo ensaio podem ser visualizados a seguir para os ensaios de E21 a E40, Figuras A.1 a A.20, respectivamente.

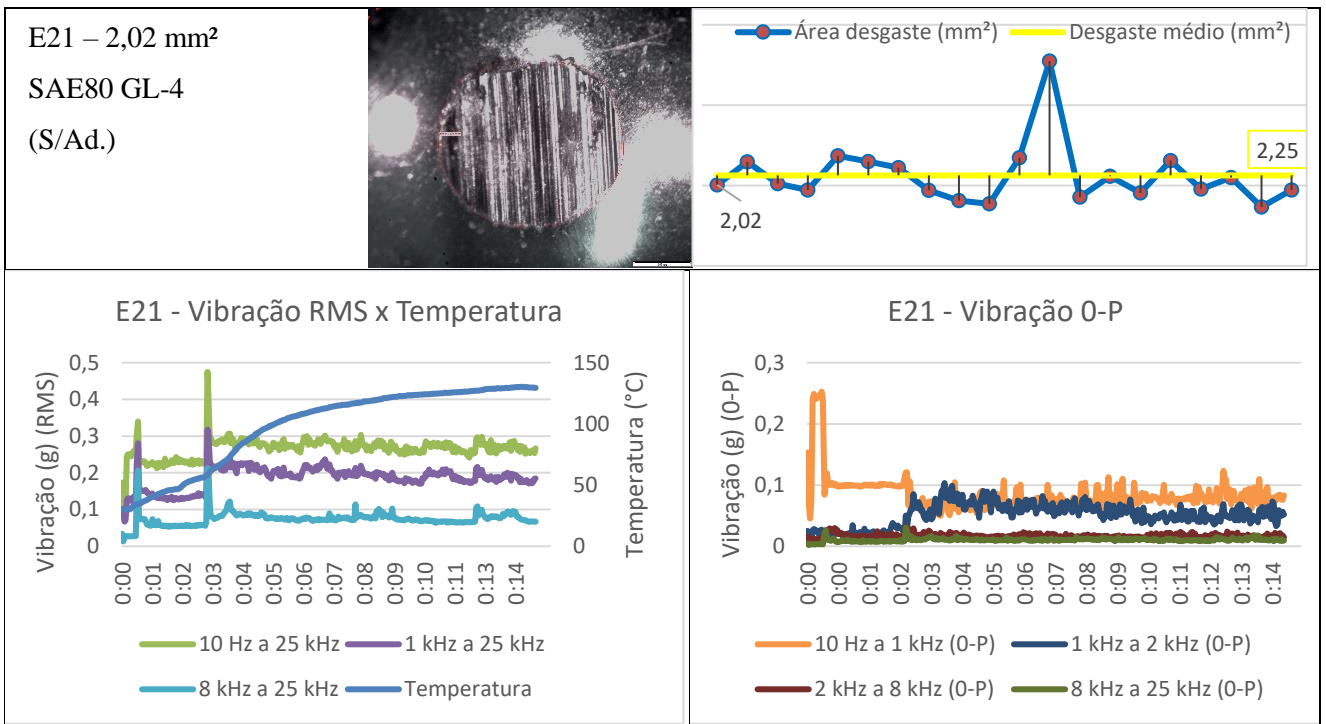


Figura A.1 - Gráficos de nível global ensaio E21.

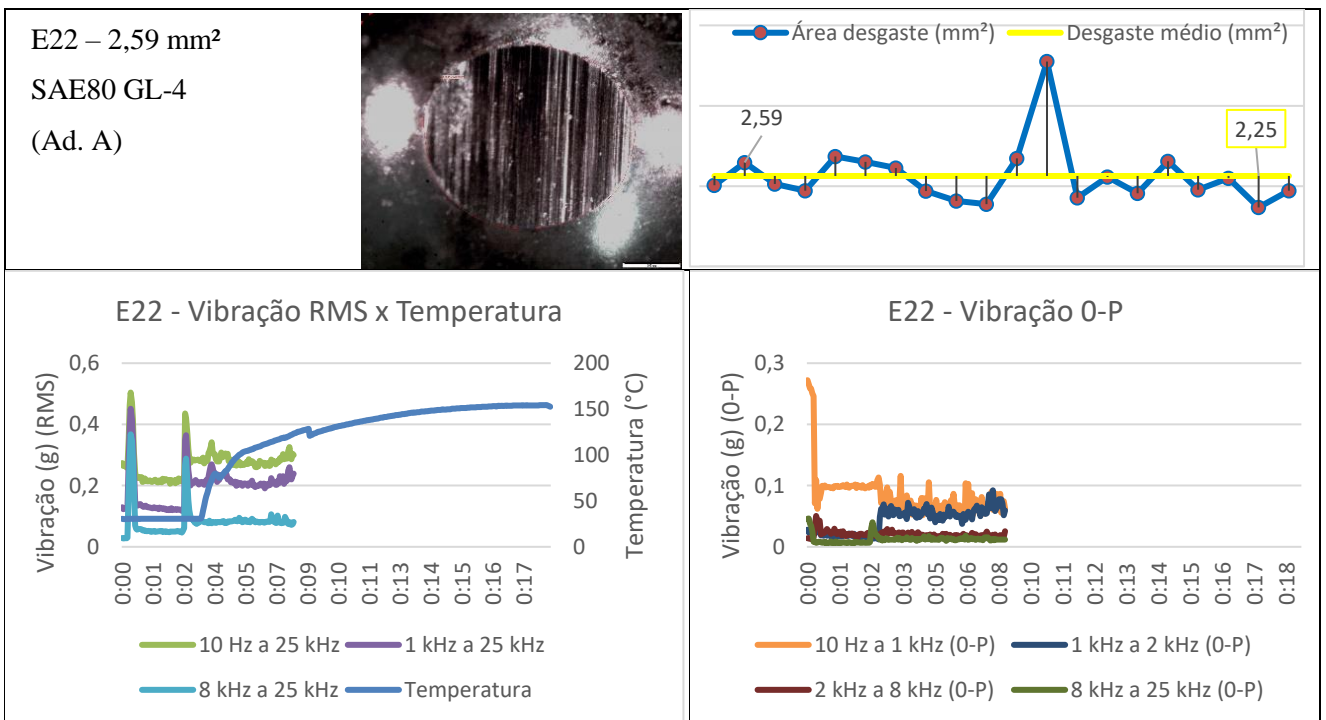


Figura A.2 - Gráficos de nível global ensaio E22.

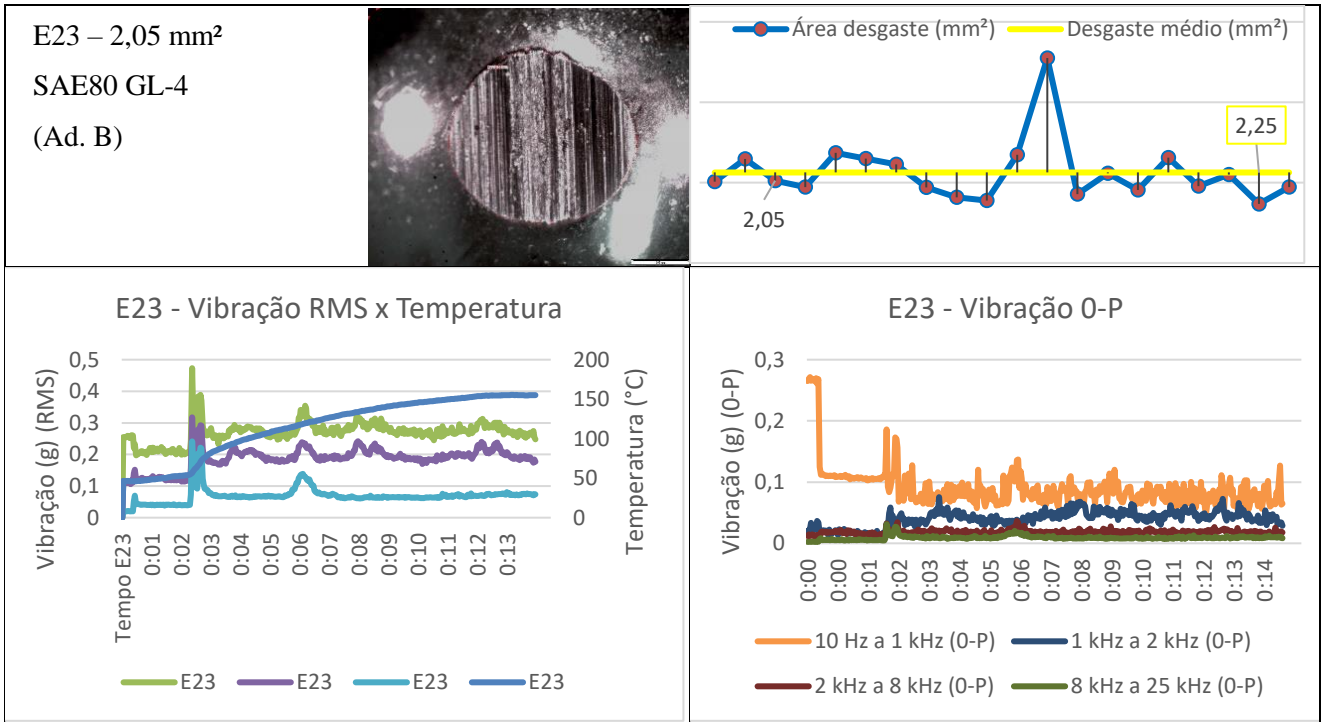


Figura A.3 - Gráficos de nível global ensaio E23.

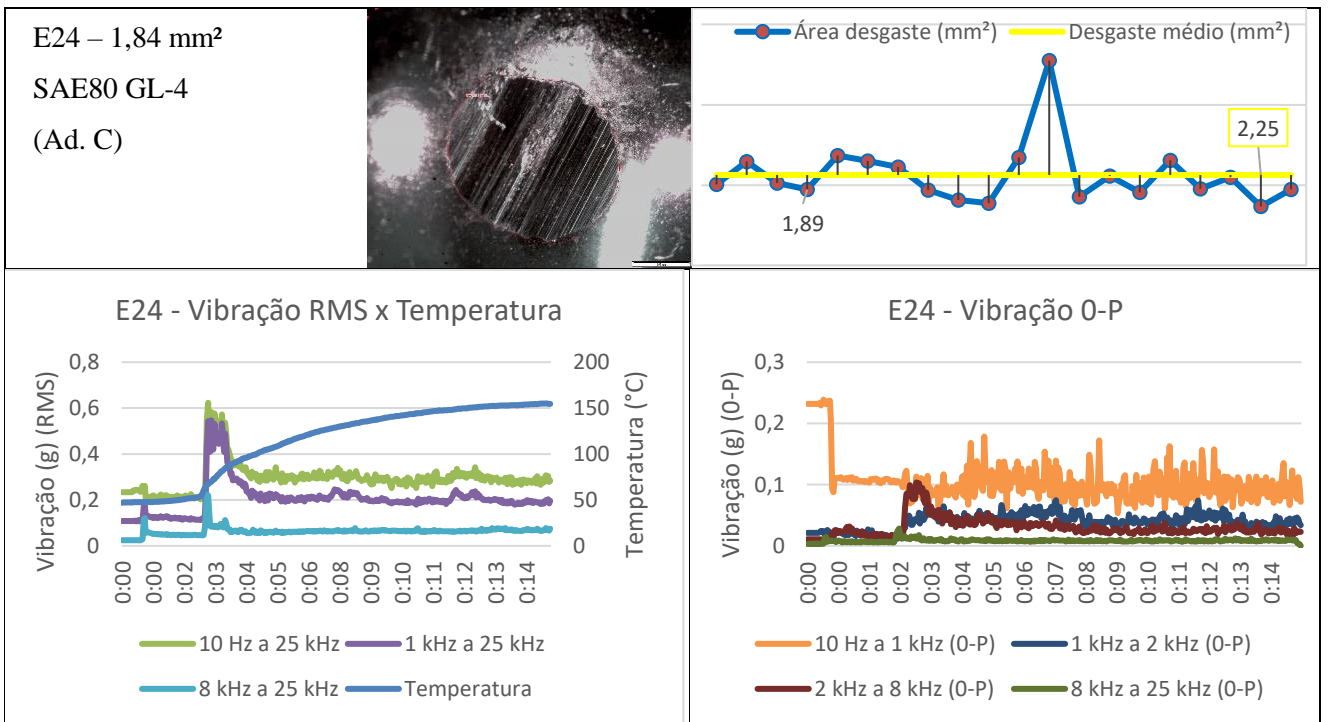


Figura A.4 - Gráficos de nível global ensaio E24.

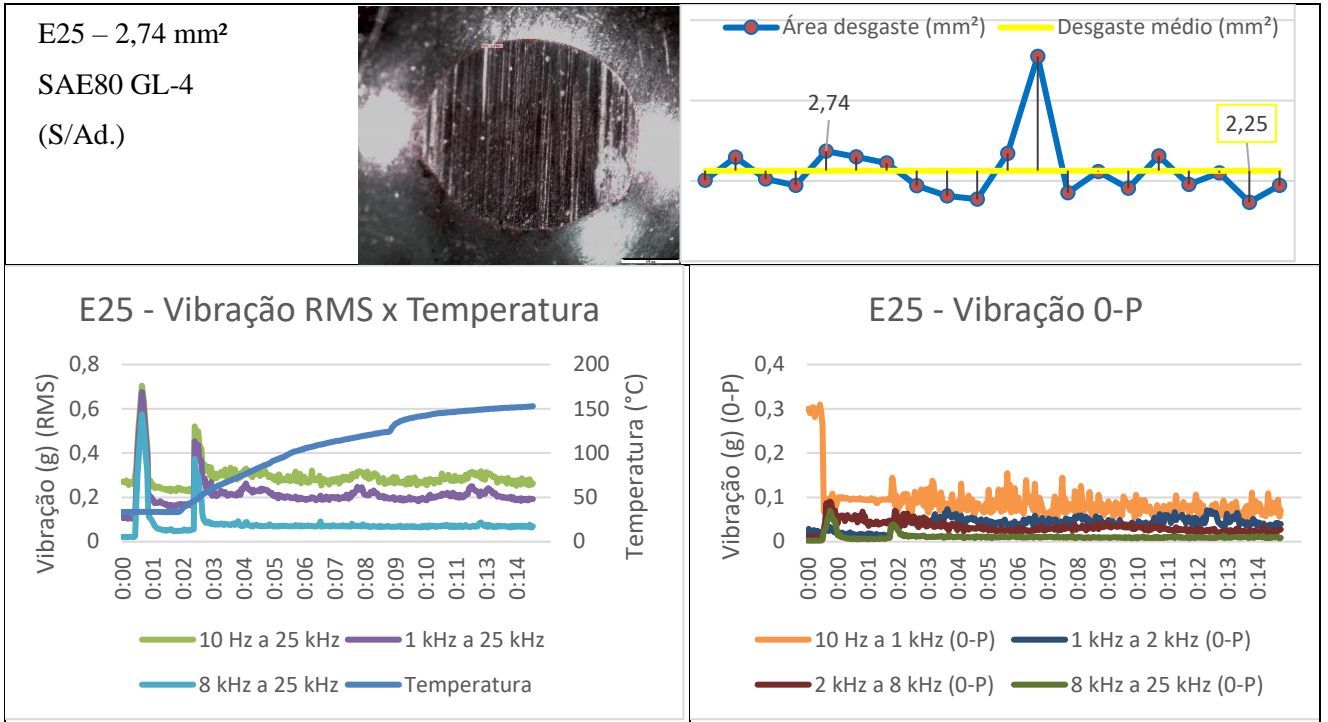


Figura A.5 - Gráficos de nível global ensaio E25.

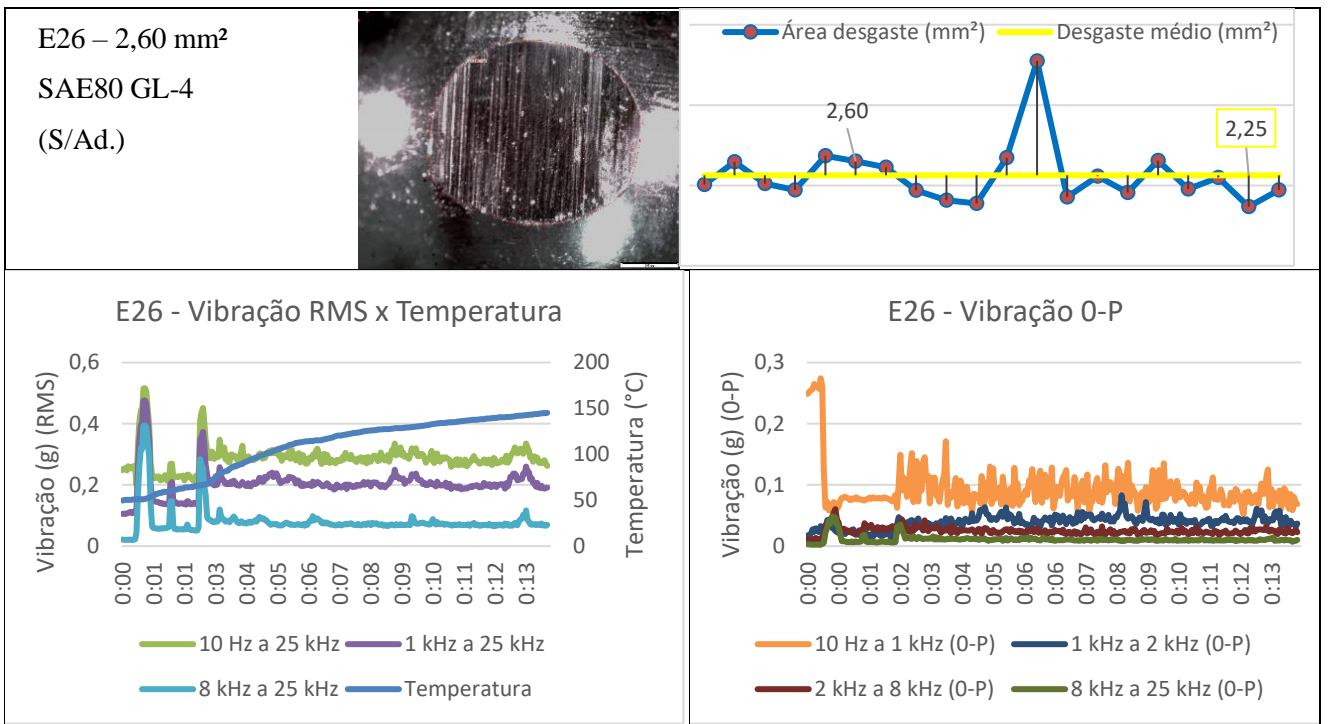


Figura A.6 - Gráficos de nível global ensaio E26.

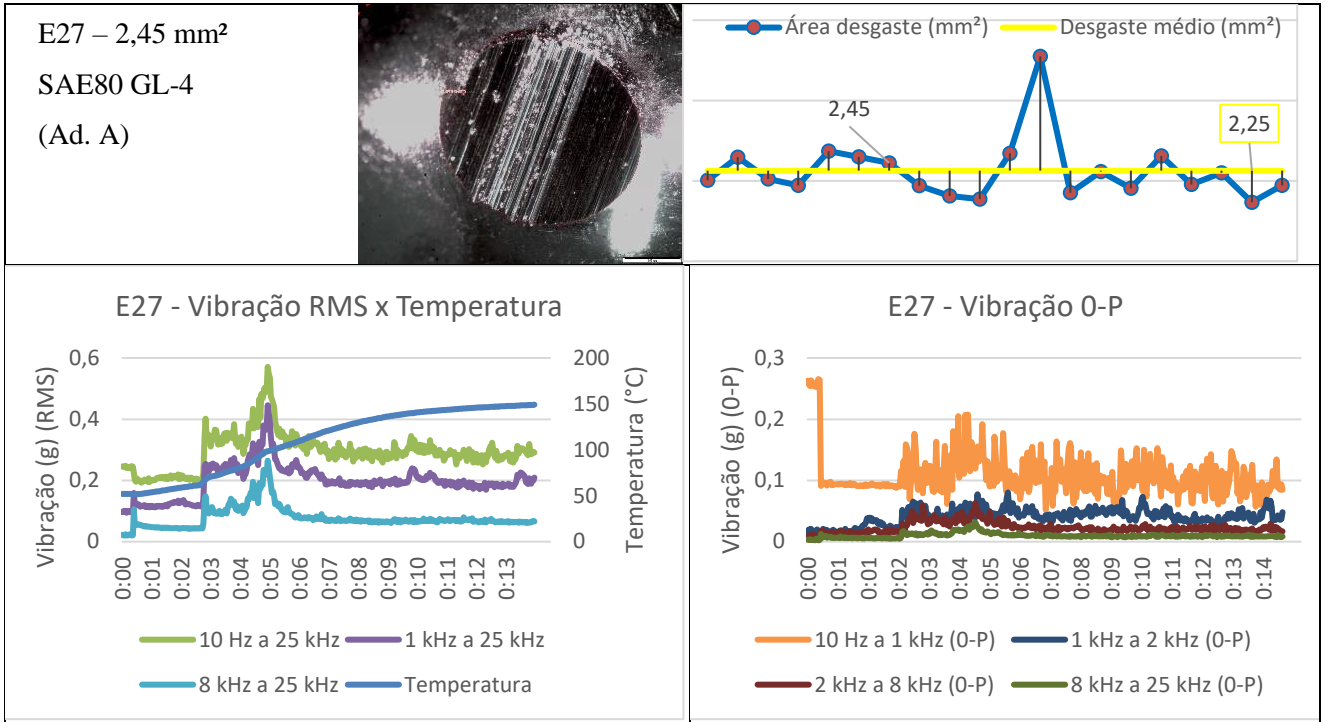


Figura A.7 - Gráficos de nível global ensaio E27.

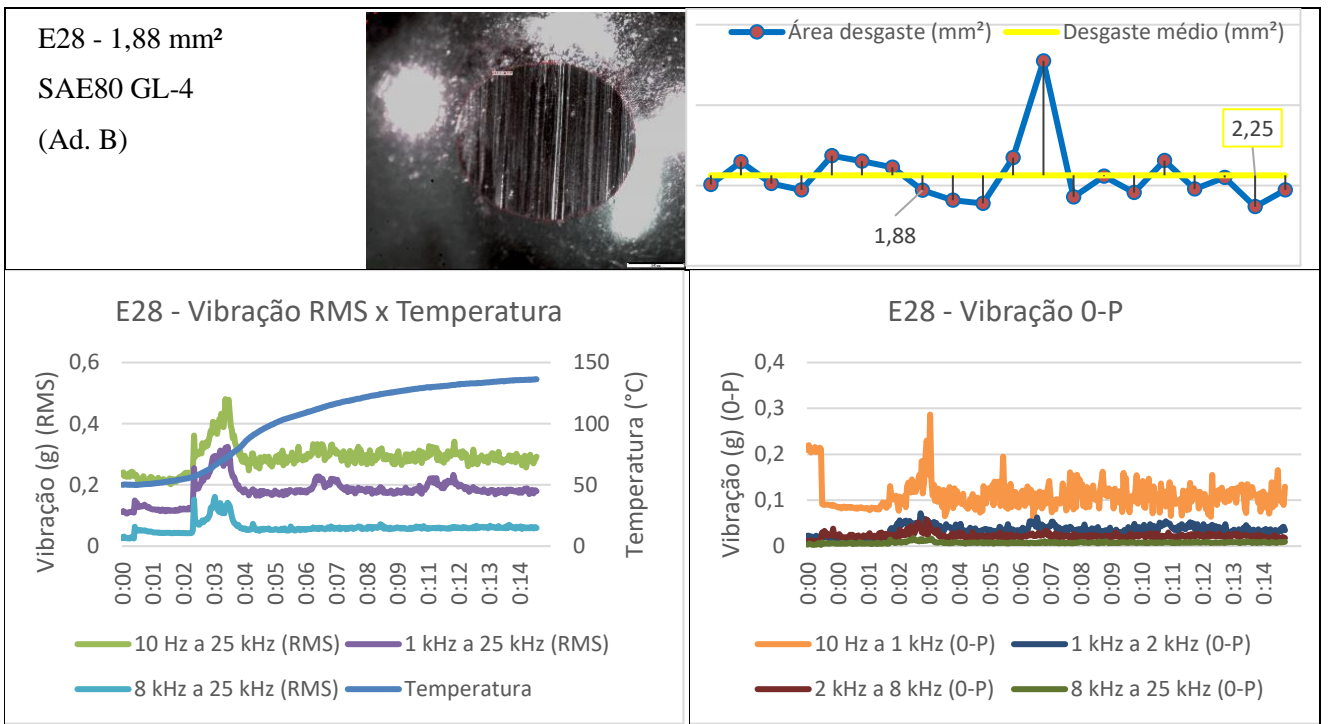


Figura A.8 - Gráficos de nível global ensaio E28.

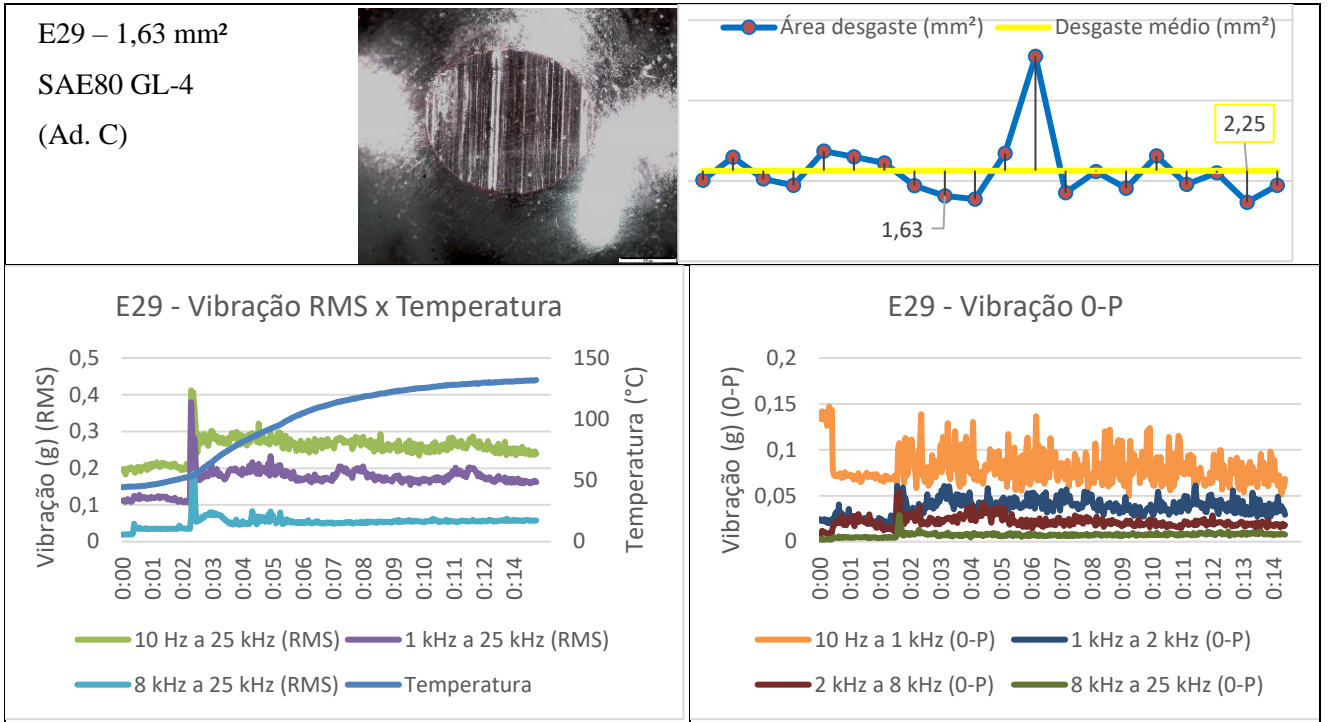


Figura A.9 - Gráficos de nível global ensaio E29.

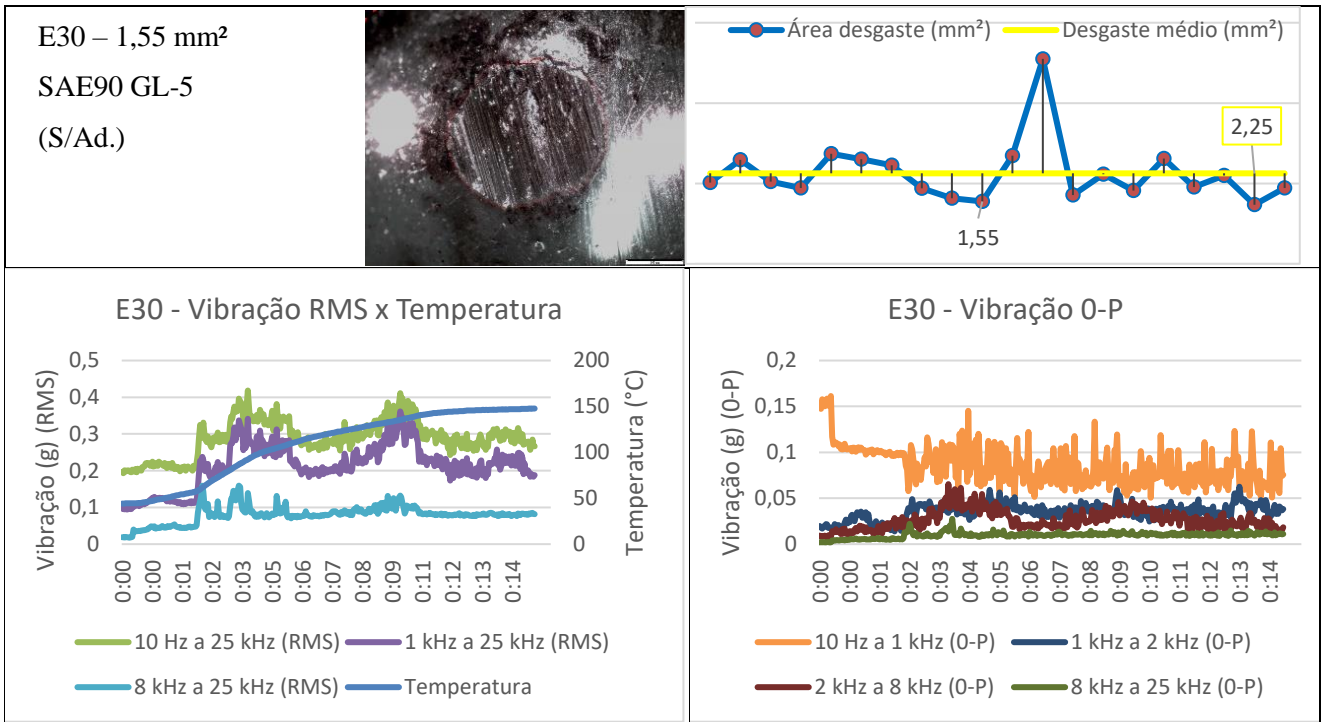


Figura A.10 - Gráficos de nível global ensaio E30.

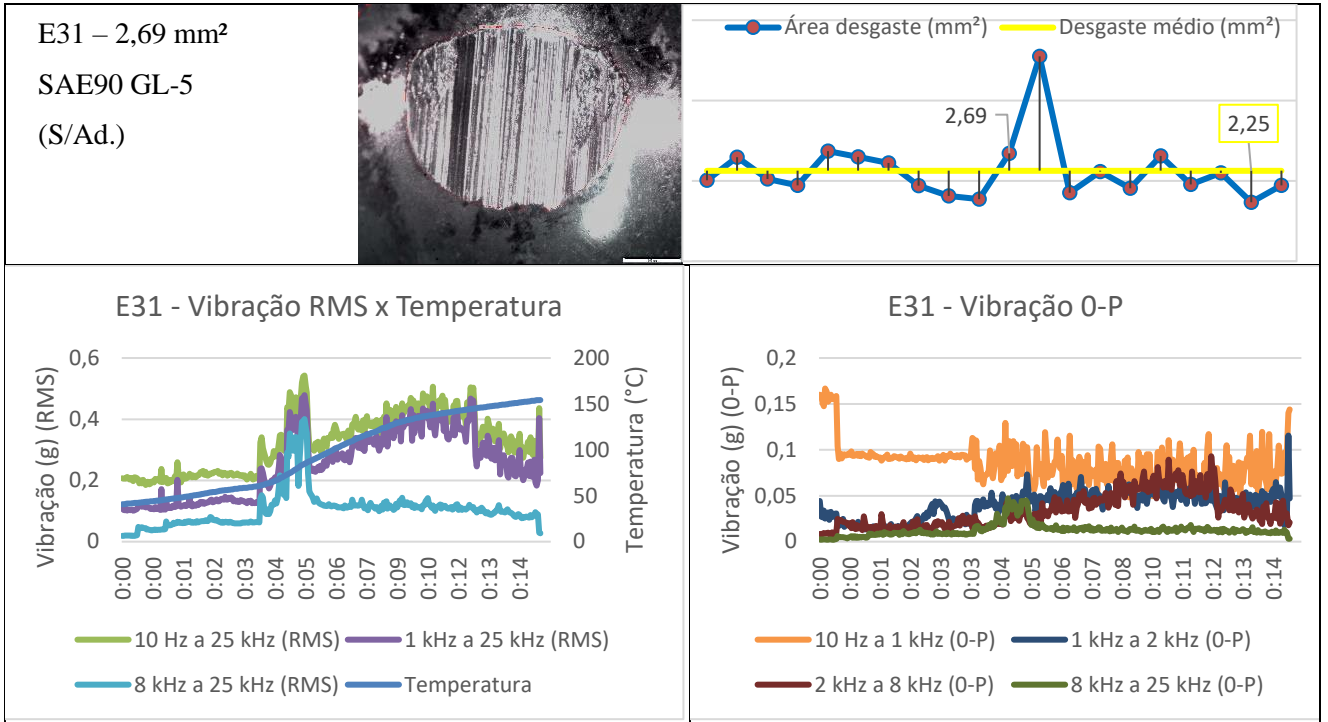


Figura A.11 - Gráficos de nível global ensaio E31.

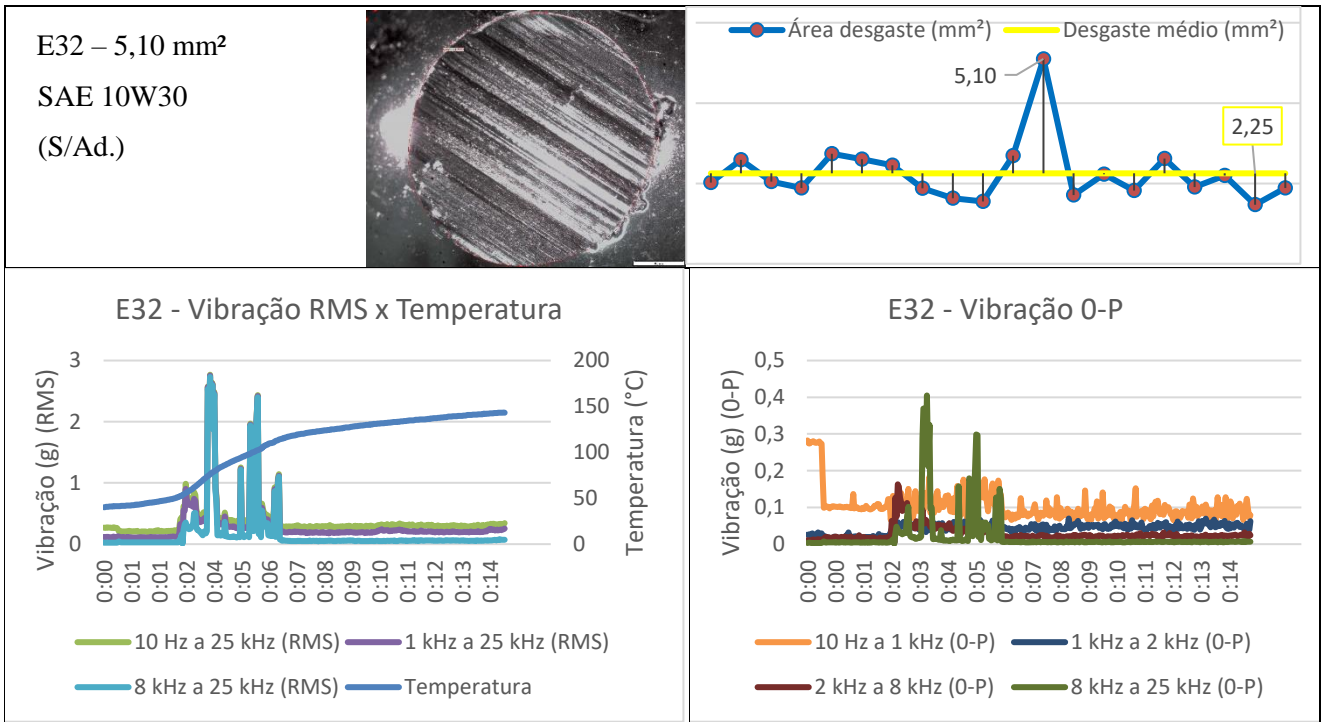


Figura A.12 - Gráficos de nível global ensaio E32.

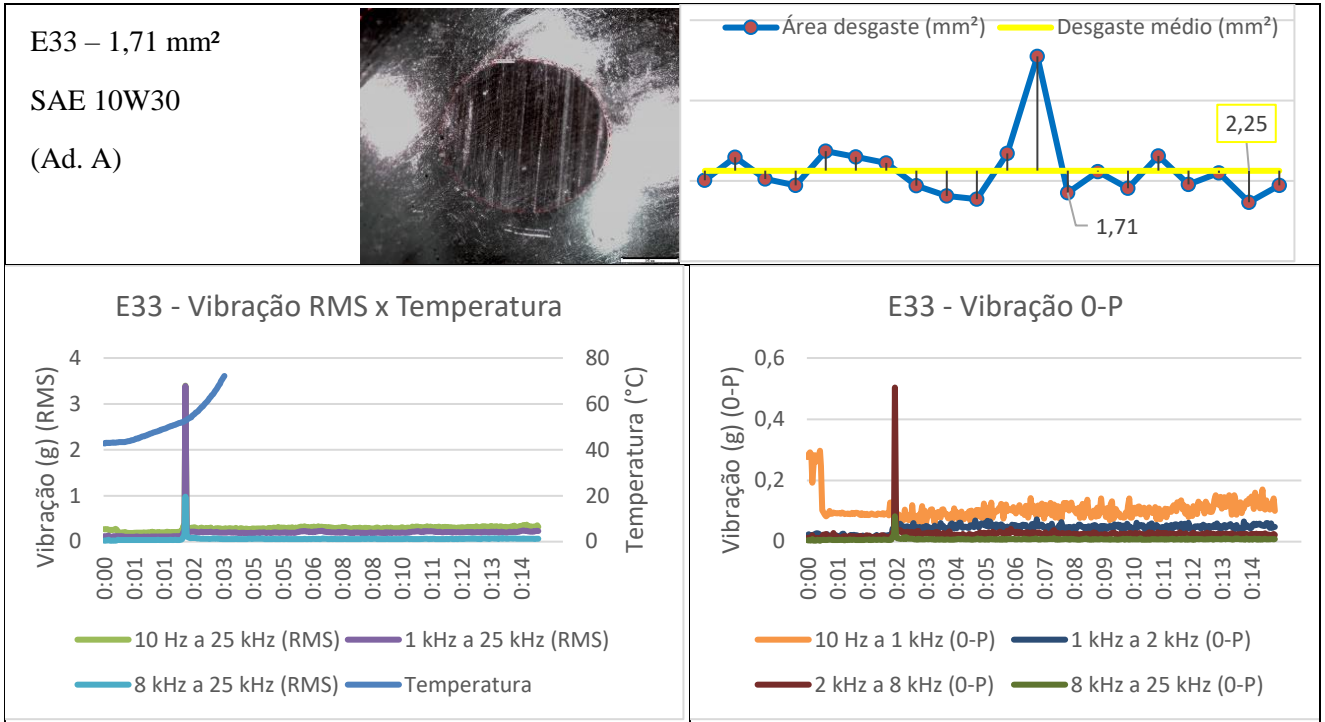


Figura A.13 - Gráficos de nível global ensaio E33.

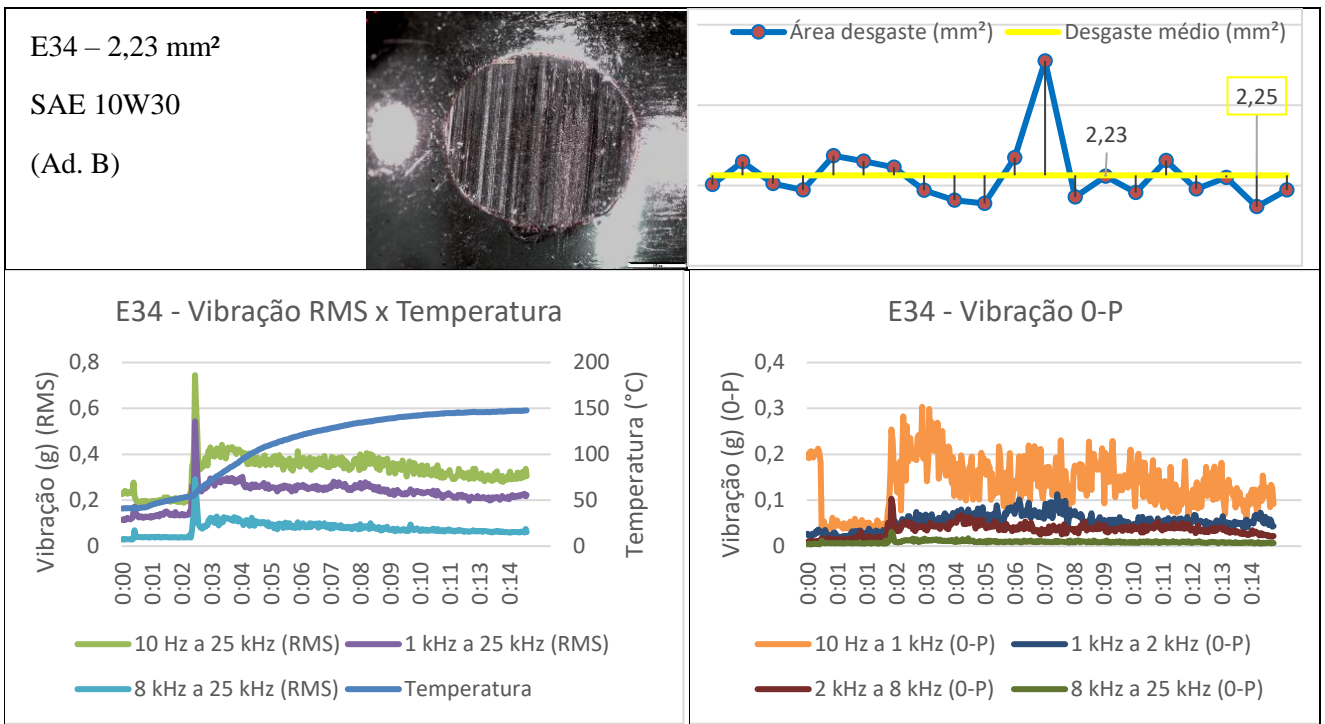


Figura A.14 - Gráficos de nível global ensaio E34.

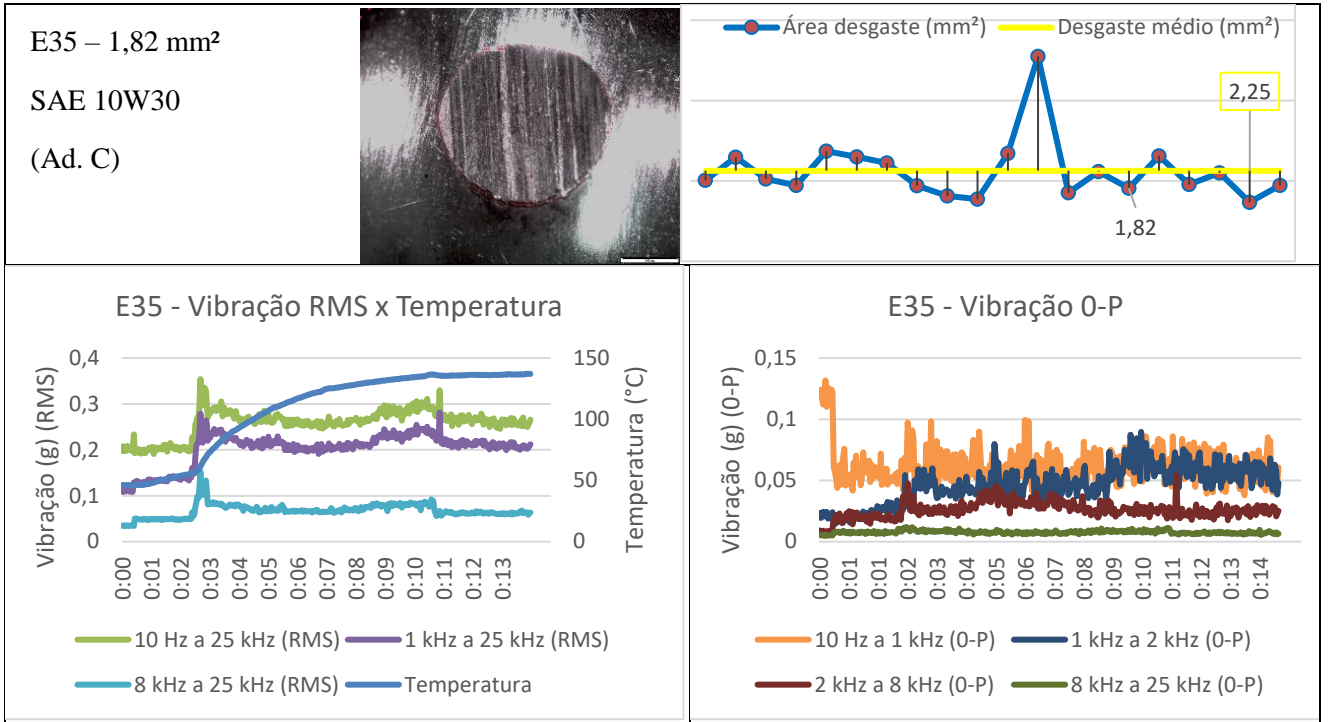


Figura A.15 - Gráficos de nível global ensaio E35.

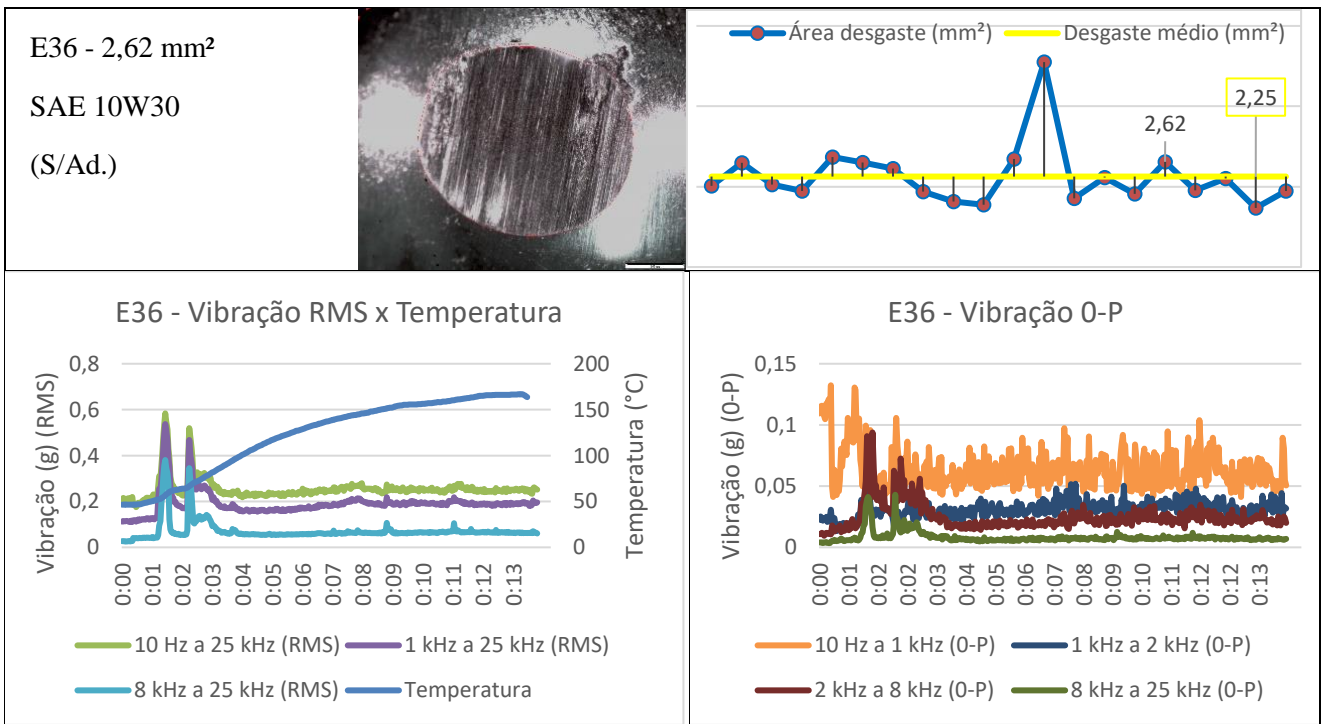


Figura A.16 - Gráficos de nível global ensaio E36.

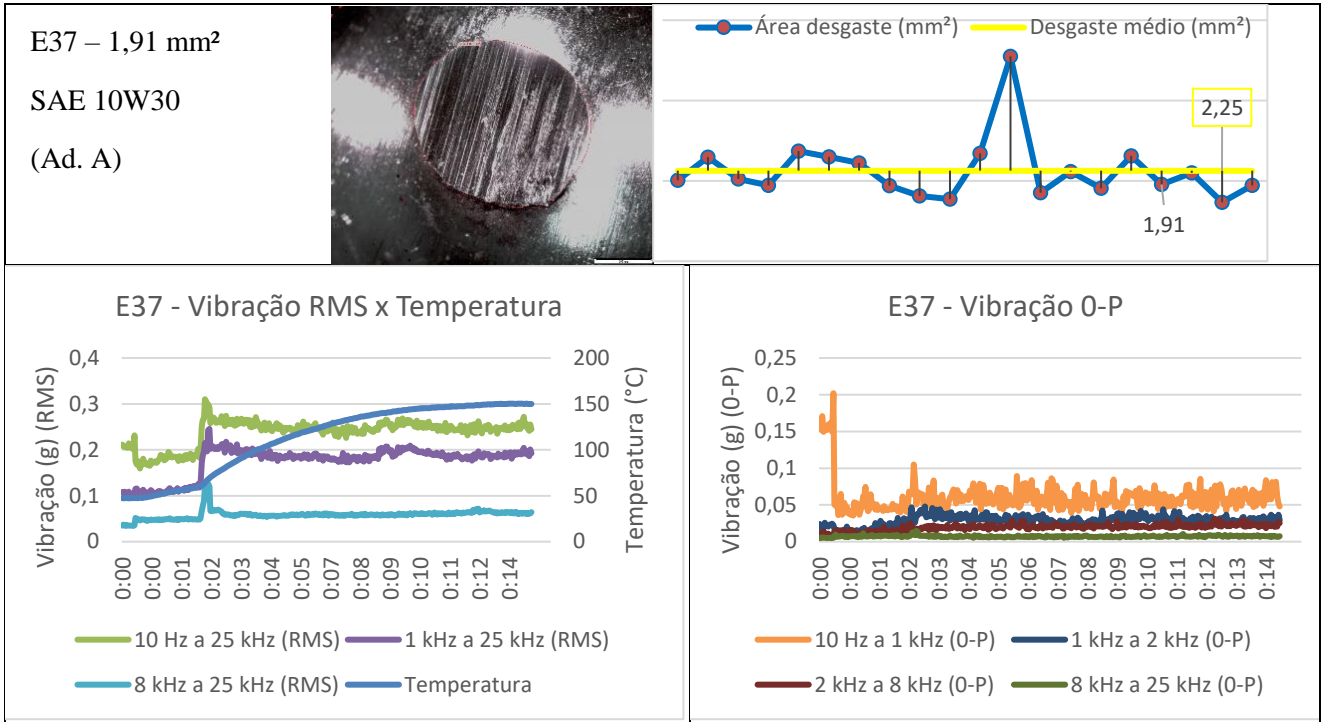


Figura A.17 - Gráficos de nível global ensaio E37.

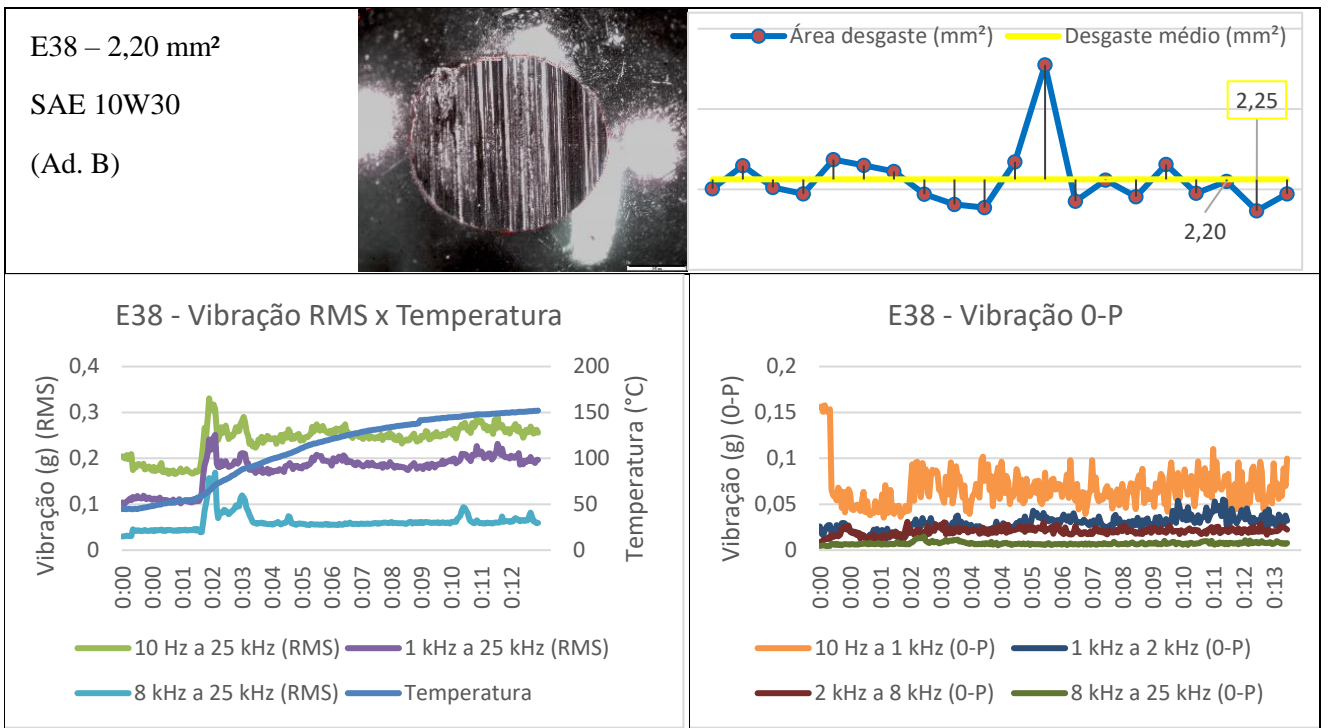


Figura A.18 - Gráficos de nível global ensaio E38.

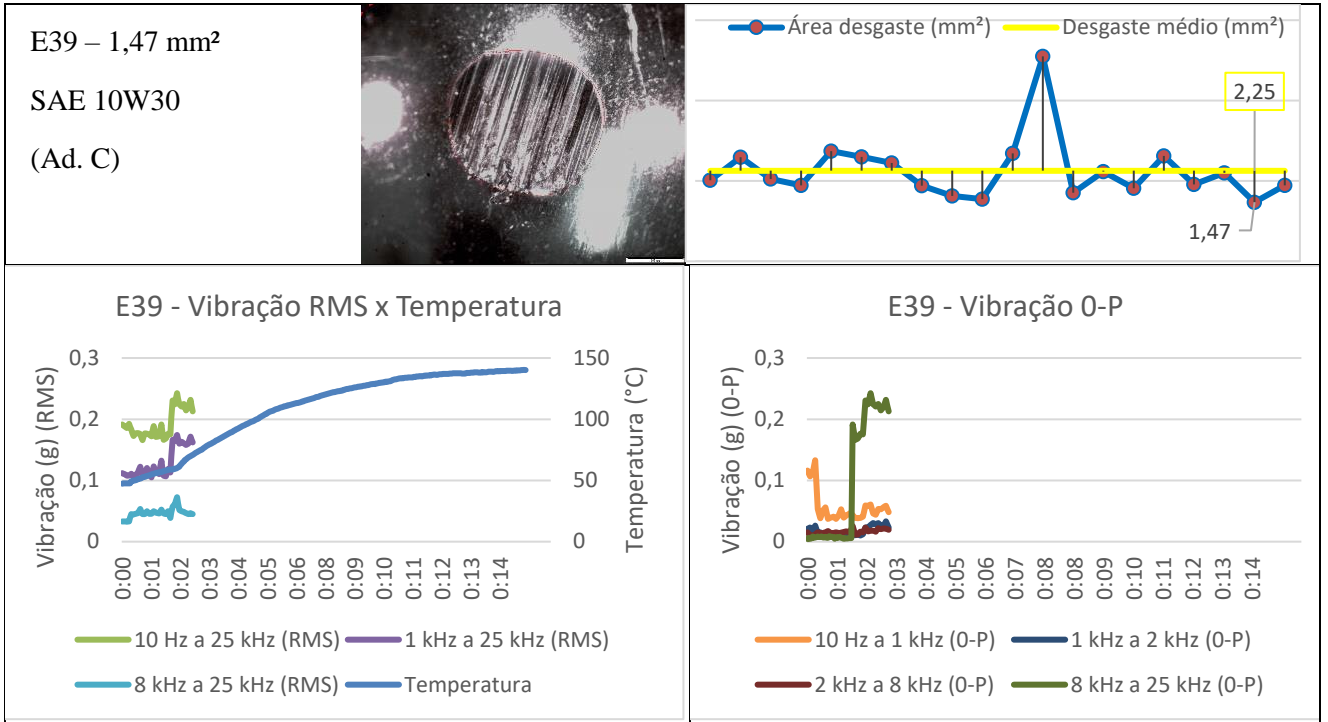


Figura A.19 - Gráficos de nível global ensaio E39.

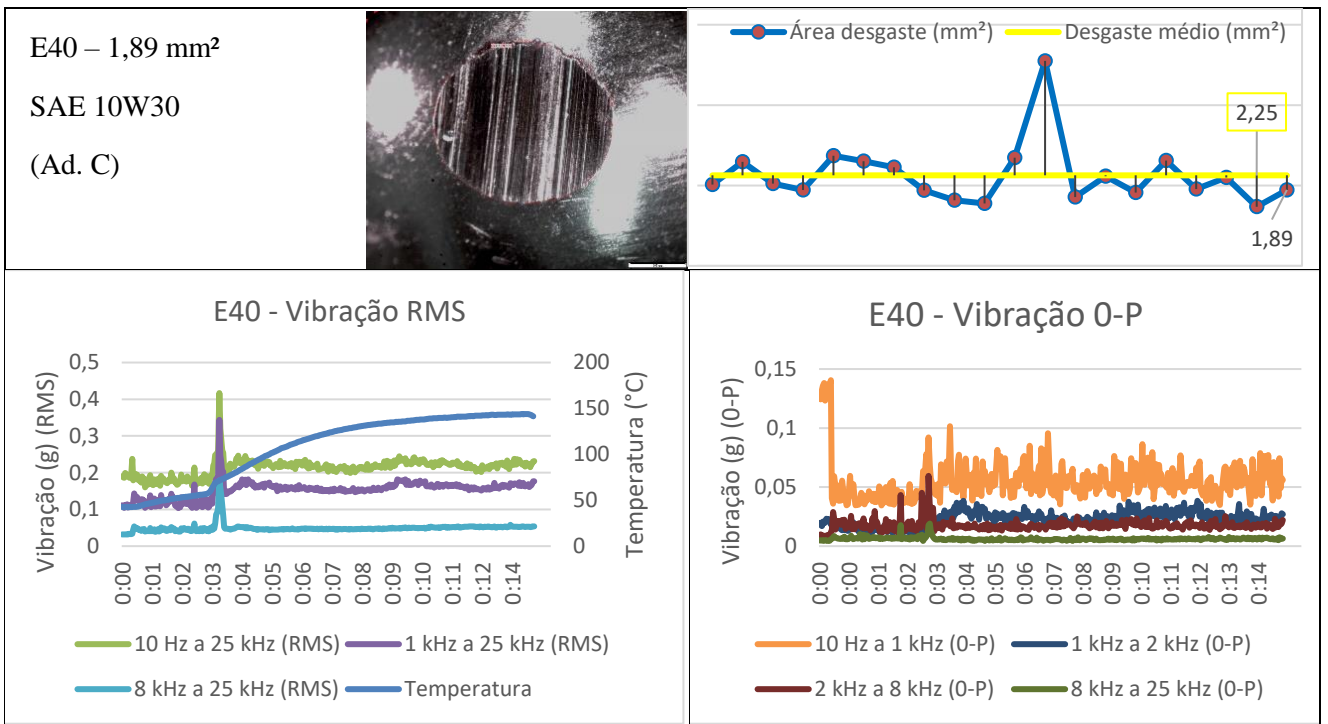


Figura A.20 - Gráficos de nível global ensaio E40.

## ANEXO II

Dados do último certificado de calibração do coletor de vibrações e do acelerômetro são apresentados nas Figuras B.1 e B.2, respectivamente. O penúltimo certificado de calibração é apresentado na Figura B.3.

 <b>MINISTÉRIO DA CIÊNCIA, TECNOLOGIA, INOVAÇÕES E COMUNICAÇÕES</b> <b>INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS</b>		 <b>LABORATÓRIO DE INTEGRAÇÃO E TESTES</b>		 <b>Calibração</b> <b>ABNT NBR</b> <b>ISO/IEC 17025</b> <b>CAL 0022</b>
<b>Metrologia em:</b> Acústica e Vibrações, Alta Frequência e Telecomunicações, Dimensional, Eletricidade e Magnetismo, Força e Torque, Massa, Pressão (Vácuo), Temperatura e Umidade, e Tempo e Frequência.		<b>Metrology in:</b> Acoustic and Vibrations, High Frequency and Telecommunications, Dimensional, Electricity and Magnetism, Force and Torque, Mass, Pressure (Vacuum), Temperature and Humidity, and Time and Frequency.		
<b>CERTIFICADO DE CALIBRAÇÃO</b>				
<b>CALIBRATION CERTIFICATE</b>				
<b>NÚMERO:</b>	<b>LIT09-LIT00-CC-11540</b>	<b>FOLHA:</b>	<b>1 / 4</b>	
<b>NUMBER:</b>		<b>SHEET:</b>		
<b>OBJETO:</b>	<b>MEDIDOR DE VIBRAÇÃO</b>			
<b>SPECIMEN:</b>				
<b>FABRICANTE:</b>	<b>PRÜFTECHNIK</b>			
<b>MANUFACTURER:</b>				
<b>MODELO:</b>	<b>VIB5310</b>			
<b>MODEL:</b>				
<b>Nº DE SÉRIE:</b>	<b>031328</b>			
<b>SERIAL NUMBER:</b>				
<b>PATRIMÔNIO:</b>	<b>NÃO CONSTA</b>			
<b>ASSET:</b>				
<b>IDENTIFICAÇÃO:</b>	<b>NÃO CONSTA</b>			
<b>IDENTIFICATION:</b>				
<b>CLIENTE:</b>	<b>VIBRAMEC VARGINHA LTDA.</b>			
<b>CUSTOMER:</b>				
	<b>RUA ANDRE MARTINS, 105 – JARDIM BOUGANVILLE</b> <b>CEP 37031-018 – VARGINHA – MG</b> <b>TEL.: (35) 99816-8053</b>			
<b>DATA DA CALIBRAÇÃO:</b>	<b>30/07/2019</b>			
<b>CALIBRATION DATE:</b>				
<b>REGISTRO INTERNO:</b>	<b>OS 0246.19.LIT09</b>	<b>2208.19.PRO</b>	<b>A21-067</b>	
<b>INTERNAL REGISTER:</b>				
<b>ASSINATURAS AUTORIZADAS:</b>				<b>DATA DE EMISSÃO:</b>
<b>AUTHORIZED SIGNATURES:</b>				<b>ISSUE DATE:</b>
 Assinado de forma digital por Rodrigo Nascimento Dados: 2019.08.02 08:48:31 -03'00'	 Digitally signed by Ricardo Suterio Date: 2019.08.05 16:17:32 -03'00'	<b>01/08/2019</b>		
<b>Signatário Autorizado</b>	<b>Gerente Técnico da Área de Metrologia</b>			
<p>Este certificado atende aos requisitos de acreditação da CGCRE - Coordenação Geral de Acreditação do Inmetro, de acordo com a ABNT NBR ISO/IEC 17025, a qual avaliou a competência do laboratório e comprovou sua rastreabilidade a padrões nacionais de medida, e membro do acordo de reconhecimento multilateral da ILAC - International Laboratory Accreditation Cooperation. Os resultados apresentados referem-se exclusivamente ao objeto caracterizado acima, nas condições especificadas, não sendo extensivos a quaisquer lotes, mesmo que similares. A reprodução deste certificado só poderá ser feita de forma íntegra.</p>				
<p>This certificate complies with the requirements of CGCRE - Accreditation General Coordination of Inmetro, in accordance with the ABNT NBR ISO/IEC 17025, which is responsible for verifying the competence of the laboratory and the traceability of its standards to the national standards of measurement, and member of the multilateral recognition agreement of ILAC - International Laboratory Accreditation Cooperation. The results apply only to the object described above and cannot be extended to any other object, even though similar. This document can be reproduced only in its full version.</p>				
Av. dos Astronautas, 1758 - Caixa Postal 515 - CEP: 12227-010 - São José dos Campos - SP - Tel.: (12) 3208-6318 - Fax.: (12) 3208-6300				
Homepage: <a href="http://www.lit.inpe.br">www.lit.inpe.br</a>				
LIT29-01-005				

Figura B.1 - Certificado de calibração do coletor de vibrações Vibexpert II e acelerômetro.

NÚMERO: LIT09-LIT00-CC-11540 FOLHA: 2 / 4  
NUMBER: SHEET:

**CARACTERÍSTICAS DO OBJETO:**

SPECIMEN CHARACTERISTICS:

Faixa de medição de frequência: 0,5 até 51200 Hz  
Documento de Referência: LIT09-LIT00-CC-10506

Dados do acelerômetro:

Fabricante: PRÜFTECHNIK  
Modelo: VIB 6.142R  
N/S: 33089  
Massa: 70 gramas (acelerômetro + base magnética)  
Dimensões: Ø 34 mm x 63 mm (acelerômetro + base magnética)  
Documento de Referência: [https://www.mit.se/wp-content/uploads/2016/09/catalog\\_sensors.pdf](https://www.mit.se/wp-content/uploads/2016/09/catalog_sensors.pdf)

Figura B.2 - Dados do acelerômetro calibrado.



MINISTÉRIO DA CIÊNCIA, TECNOLOGIA, INOVAÇÃO E COMUNICAÇÕES  
INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS

LABORATÓRIO DE INTEGRAÇÃO E TESTES  
LABORATÓRIO DE METROLOGIA FÍSICA - MTF

Laboratório de Calibração acreditado pela CGCRE de acordo com a ABNT NBR ISO/IEC 17025, sob nº. 022.

**CERTIFICADO DE CALIBRAÇÃO**  
CALIBRATION CERTIFICATE

NÚMERO: LIT09-LIT00-CC-10506 FOLHA: 1 / 4  
NUMBER: SHEET:

OBJETO: MEDIDOR DE VIBRAÇÕES  
SPECIMEN:

FABRICANTE: PRUFTECHNIK  
MANUFACTURER:

MODELO: VIB 5310 – VIBXPRT II  
MODEL:

Nº DE SÉRIE: 031328  
SERIAL NUMBER:

PATRIMÔNIO: NÃO CONSTA  
ASSET:

IDENTIFICAÇÃO: NÃO CONSTA  
IDENTIFICATION:

SOLICITANTE: VIBRAMEC VARGINHA LTDA.  
CUSTOMER:

ENDEREÇO: RUA ANDRÉ MARTINS JÚNIOR, 105 – JARDIM BOUGANVILLE  
ADDRESS: CEP: 37.031-018 – VARGINHA – MG

DATA DA CALIBRAÇÃO: 18/07/2016  
CALIBRATION DATE:

REGISTRO INTERNO: OS 0238.16.LIT09 1421.16.PRO A16-091  
INTERNAL REGISTER:

ASSINATURAS AUTORIZADAS: Rodrigo dos Santos Nascimento, Alberto de Paula Silva  
AUTHORIZED SIGNATURES: DATA DE EMISSÃO: 25/07/2016  
ISSUE DATE:

Este certificado atende aos requisitos de acreditação pela CGCRE, a qual avaliou a competência do laboratório e comprovou sua rastreabilidade a padrões nacionais de medida. Os resultados apresentados referem-se exclusivamente ao objeto caracterizado acima, nas condições especificadas, não sendo extensivos a quaisquer lotes, mesmo que similares. A reprodução deste certificado só poderá ser feita de forma integral.

This certificate complies with the requirements of CGCRE, which is responsible for verifying the competence of the laboratory and the traceability of its standards to the national standards of measurement. The results apply only to the object described above and cannot be extended to any other object, even though similar. This document can be reproduced only in its full version.

Av. dos Astronautas, 1758 - Caixa Postal 515 - CEP: 12227-010 - São José dos Campos - SP - Tel.: (0xx12) 3208-6262 - Fax.: (0xx12) 3208-6300

Homepage: [www.lil.inpe.br](http://www.lil.inpe.br)

Figura B.3 - Certificado de calibração do coletor de vibrações Vibexpert II e acelerômetro.

O certificado de calibração da câmera termográfica é apresentado na Figura B.3.

## Calibration Certificate

*Model* FLIR E40  
*Serial N°* 49039638  
*Calibration Site* FLIR Systems Brasil  
*Calibration Date* August 17, 2017

This is to certify that the calibration of the camera identified above is carried out using radiation sources that are traceable to *International Standards at the Rede Brasileira de Calibração* (Brazilian National Calibration Standards).

  
 \_\_\_\_\_  
 Quality Control  


FLIR Systems Brasil - Av. Antonia Bardella, 320 - Sorocaba/SP  
 CEP 18085-852 - Phone: (15) 3238.8070  
 www.FLIR.com

## Calibration Certificate

*Model* FLIR E40  
*Serial N°* 49039638  
*Calibration Site* FLIR Systems Brasil  
*Calibration Date* September 2, 2019

This is to certify that the calibration of the camera identified above is carried out using radiation sources that are traceable to *International Standards at the Rede Brasileira de Calibração* (Brazilian National Calibration Standards).

  
 \_\_\_\_\_  
 Quality Control  


FLIR Systems Brasil - Av. Antonia Bardella, 320 - Sorocaba/SP  
 CEP 18085-852 - Phone: (15) 3238.8070  
 www.FLIR.com

Figura B.3 - Certificados de calibração da câmera termográfica.