

ANDRÉ LUIS VINAGRE PEREIRA

**Manutenção preditiva de um par engrenado através da análise de
lubrificantes e da análise de vibrações utilizando a transformada de wavelet**

ANDRÉ LUIS VINAGRE PEREIRA

**Manutenção preditiva de um par engrenado através da análise de
lubrificantes e da análise de vibrações utilizando a transformada de wavelet**

Dissertação apresentada à Faculdade de Engenharia de
Ilha Solteira – UNESP como parte dos requisitos para
obtenção do título de Mestre em Engenharia Mecânica.
Área do Conhecimento: Mecânica dos Sólidos.

PROF. DR. APARECIDO CARLOS GONÇALVES

Orientador

Ilha Solteira

2018

FICHA CATALOGRÁFICA

Desenvolvido pelo Serviço Técnico de Biblioteca e Documentação

Pereira, André Luis Vinagre.

P436m Manutenção preditiva de um par engrenado através da análise de lubrificantes e da análise de vibrações utilizando a transformada de wavelet / André Luis Vinagre Pereira. -- Ilha Solteira: [s.n.], 2018
116 f. : il.

Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual Paulista. Faculdade de Engenharia. Área de conhecimento: Mecânica dos Sólidos, 2018

Orientador: Aparecido Carlos Gonçalves

Inclui bibliografia

1. Análise de vibrações. 2. Tribologia. 3. Transformada contínua de wavelet.
4. Manutenção preditiva. 5. Par engrenado.



UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA

Câmpus de Ilha Solteira

CERTIFICADO DE APROVAÇÃO

TÍTULO DA DISSERTAÇÃO: Manutenção preditiva de um par engrenado através da análise de lubrificantes e da análise de vibrações utilizando a transformada de wavelet

AUTOR: ANDRÉ LUIS VINAGRE PEREIRA

ORIENTADOR: APARECIDO CARLOS GONCALVES

Aprovado como parte das exigências para obtenção do Título de Mestre em ENGENHARIA MECÂNICA, área: MECANICA DOS SÓLIDOS pela Comissão Examinadora:

Prof. Dr. APARECIDO CARLOS GONCALVES

Departamento de Engenharia Mecânica / Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira

Prof. Dr. MARCIO ANTONIO BAZANI

Departamento de Engenharia Mecânica / Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira

Dr. JOÃO PAULO DIAS

Department of Mechanical Engineering / Texas Tech University

Ilha Solteira, 27 de fevereiro de 2018

DEDICO

À minha família e amigos.

Todos vocês tornaram esta dissertação uma realidade.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus, pela saúde, oportunidades, família e amigos que me deu.

Agradeço ao meu orientador, Professor Doutor Aparecido Carlos Gonçalves, por toda a paciência e ajuda em tudo que foi preciso.

Aos meus pais, Angela e Feliciano, por terem me dado educação, valores e apoio incondicional. Obrigado por tudo.

Às minha irmãs, Mariana e Marina, por estarem presentes em todos momentos da minha vida.

Às minhas avós e aos meus avôs por todos ensinamentos, por tudo que já fizeram e continuam fazendo por mim.

Aos meus tios e primos, pela amizade e por tantas lembranças boas que tenho com vocês.

À minha namorada Sabine, pelo incentivo e companheirismo desde o início do mestrado até os últimos experimentos. E um agradecimento especial aos seus pais.

Ao Erickson (Feiura) pela amizade, pela motivação e por toda ajuda desde a faculdade.

Ao Carlos Sgotti (Tamirão) por todo trabalho em equipe e as madrugadas com o experimento.

Ao Carlos José Santana pelos ensinamentos e por toda ajuda.

Aos meus amigos de república, Alexandre (Onça), Diego (Poma), Douglas (Douglinhas), Lucas (Vazio), Newton (Pluff), Tiago (Bixo) e Victor (Mendigo) pela amizade, ensinamentos e brincadeiras que tomaram a minha vida melhor mesmo com todas dificuldades.

Igualmente agradeço aos meus amigos NFB, Diego, Felipe, Henrique, Lucão, Luquinhas, Mauricio, Tacio e Vitor. Pela antiga amizade que me ajudaram a ser quem eu sou hoje.

“Education is the passport to the future, for tomorrow belongs to those who prepare for it today.”
Malcolm X

RESUMO

Na manutenção preditiva, as análises dos sinais de vibração e das partículas do óleo são frequentemente utilizadas para o diagnóstico de falhas em redutores, porque elas contêm informações das condições de seus elementos mecânicos. Os sinais de vibração de um redutor geralmente têm muito ruído e a relação sinal-ruído é tão baixa que a extração de informações dos componentes do sinal é muito difícil, especialmente em situações práticas. Uma das soluções para este problema é a aplicação de técnicas de processamento do sinal para facilitar a obtenção de informações. Neste trabalho, uma técnica de cancelamento de ruído, a média temporal síncrona (TSA), e outra técnica da transformada contínua de wavelet de Morlet foram desenvolvidas para extração de recursos e diagnóstico de diferentes tipos de danos locais da engrenagem. Estas técnicas são aplicadas em sinais medidos em uma bancada experimental, que consiste em um par engrenado acoplado a um motor e a um gerador. Outro método para monitorar o estado do sistema é pela análise de partículas presente no óleo provenientes do desgaste das engrenagens. Avaliando a quantidade, formato, tamanho e material das partículas é possível obter informações das condições do equipamento e do tipo de desgaste ocorrido. Neste trabalho, foram feitas a análise do óleo pelas técnicas da ferrografia e contagem de partículas. A parte experimental deste trabalho foi dividida em dois experimentos. No primeiro experimento as condições de um par engrenado durante toda a sua vida útil foi monitorada, enquanto que no segundo experimento, um entalhe foi feito na raiz do dente simulando uma trinca por fadiga. A análise das partículas de óleo mostrou quais tipos de desgastes estava ocorrendo e a técnica da transformada contínua de wavelet mostrou-se precisa na identificação de falhas em dentes de engrenagens, sendo possível indicar em qual dente a falha estava se desenvolvendo.

Palavras-chave: Análise de vibrações. Tribologia. Transformada contínua de wavelet. Manutenção preditiva. Par engrenado.

ABSTRACT

At the predictive maintenance, the vibration signals analysis and oil particles analysis are frequently used to diagnose failures in a gearbox, because they contain information about the condition of its mechanic's elements. The vibration signals of a gearbox usually have a lot of noise and the ratio 'signal-noise' is very low, making the extraction of information from the signals component very hard, especially in a practical situation. One of the solutions to this problem is the application of technics of signal processing, to improve the collection of information. At this study, a technique of noise cancellation, Temporal Synchronous Average (TSA) and another technique called continuous transform with the Morlet wavelet were executed for the extraction of resources and diagnostics of different type of gears local damages. Those methods are applied to signals measured on an experimental test stand, consisting of a gearbox with an engine and a generator. Another method for monitoring system wear is by analyzing wear particles in the oil generated due to the wear on the gears. By evaluating the quantity, shape, size and material of the particles it is possible to obtain information about the conditions of the equipment and the type of wear that has occurred. During this work, it was done the analysis of the oil by the techniques of ferrography and particle counting. The experimental part of this study was divided into two experiments. On the first experiment was monitored the conditions of a couple meshed throughout its useful life and in the second was made a notch in the root of the tooth simulating a crack by fatigue. The analysis of the oil particles showed what types of wear was occurring and the technique of the continuous wavelet transform was accurate in the identification of defects in gear's teeth, and it was possible to indicate which tooth was failing.

Keywords: Vibration analysis. Tribology. Continuous wavelet transform. Predictive maintenance. Gearbox.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1	- Detalhe do dente da engrenagem para cada tipo de experimento	20
Figura 2	- Custo da Manutenção no Brasil	23
Figura 3	- Aplicação dos Recursos na Manutenção (%)	24
Figura 4	- Visão geral da manutenção	25
Figura 5	- A curva da banheira para o desgaste da máquina	28
Figura 6	- Fases da manutenção preditiva	29
Figura 7	- Desgaste do tipo scuffing	34
Figura 8	- Desgaste do tipo pitting	35
Figura 9	- Micropitting	36
Figura 10	- Comparativo entre (a) STFT e (b) wavelet	41
Figura 11	- Plano tempo–frequência e as representações das caixas para a Transformada wavelet.	42
Figura 12	- Esquema geral da obtenção de uma média temporal síncrona	45
Figura 13	- Diagrama esquemático da bancada	46
Figura 14	- Bancada utilizada nos experimentos	46
Figura 15	- Em destaque o inversor de frequência	47
Figura 16	- Acoplamento de grade elástica	49
Figura 17	- Redutor/multiplicador	50
Figura 18	- Par engrenado	51
Figura 19	- Excitador do gerador	53
Figura 20	- Painel de lâmpadas	54
Figura 21	- Amperímetro e frequencímetro	54
Figura 22	- Trigger em operação	55
Figura 23	- Sinal do trigger	56
Figura 24	- Acelerômetro	56
Figura 25	- Robotron 00 042	57
Figura 26	- Programação DASYlab	59
Figura 27	- Gráficos gerados pelo software	60
Figura 28	- Bancada com seus componentes	61
Figura 29	- Monitoramento das temperaturas	63
Figura 30	- Visão térmica da bancada	64
Figura 31	- Tubete com o óleo coletado	65
Figura 32	- Depositador rotativo de partículas (RPD)	66
Figura 33	- Materiais utilizados na preparação das amostras	67
Figura 34	- Forno mufla	68
Figura 35	- Óleo lubrificante colocado sobre a lâmina de vidro girando à 70 rpm	69
Figura 36	- Tetracloroetileno sendo aplicado e o óleo bruto sendo removido	70
Figura 37	- Limpeza concluída	70
Figura 38	- Ferrograma proveniente do RPD	71
Figura 39	- Ferrosκόpio OLYMPUS BX 41	71
Figura 40	- Monitor automático de partículas	73

Figura 41	- Amostras prontas do PQA	73
Figura 42	- Espectro do sinal	74
Figura 43	- Dente entalhado	77
Figura 44	- 1 hora de experimento	79
Figura 45	- 8 horas de experimento	79
Figura 46	- 50 horas de experimento	80
Figura 47	- 100 horas de experimento	81
Figura 48	- 200 horas de experimento	81
Figura 49	- 300 horas de experimento	82
Figura 50	- 400 horas de experimento	83
Figura 51	- 500 horas de experimento	83
Figura 52	- 600 horas de experimento	84
Figura 53	- 700 horas de experimento	85
Figura 54	- 800 horas de experimento	85
Figura 55	- Dente 36 após 800 horas de experimento	86
Figura 56	- Sinal no tempo com 800 horas de experimento	87
Figura 57	- Comparativo 800 horas FDP beta x wavelet	87
Figura 58	- Curva da magnitude pelo tempo	88
Figura 59	- Raio interno, 24 h de experimento, aumento de 100x	89
Figura 60	- Anel interno, 24 h de experimento, aumento de 100x	89
Figura 61	- Anel interno, 24 h de experimento, aumento de 500x	90
Figura 62	- Anel interno, 24 h de experimento, aumento de 1000x	91
Figura 63	- Anel interno, 210 h de experimento, aumento de 100x	91
Figura 64	- Anel interno, 210 h de experimento, aumento de 100x	92
Figura 65	- Anel interno, 210 h de experimento, aumento de 500x	92
Figura 66	- Anel interno, 470 h de experimento, aumento de 100x	93
Figura 67	- Anel externo, 470 h de experimento, aumento de 100x	94
Figura 68	- Anel externo, 470 h de experimento, aumento de 500x	94
Figura 69	- Anel externo, 470 h de experimento, aumento de 1000x	95
Figura 70	- Anel mediano, 470 h de experimento, aumento de 100x	95
Figura 71	- Anel mediano, 720 h de experimento, aumento de 500x	96
Figura 72	- Anel interno, 720 h de experimento, aumento de 100x	96
Figura 73	- Índice PQ do experimento 1	97
Figura 74	- TSA sinal de 18 horas	98
Figura 75	- Espectro em frequência do sinal	98
Figura 76	- 8 h de experimento	99
Figura 77	- Plotagem da análise em 3D	100
Figura 78	- Plotagem da análise em 2D	100
Figura 79	- 150 horas de experimento	101
Figura 80	- 300 horas de experimento	101
Figura 81	- Experimento 2, anel mediano, aumento de 100x	102
Figura 82	- Experimento 2, anel mediano, aumento de 500x	103
Figura 83	- Experimento 2, anel mediano, aumento de 1000x	103
Figura 84	- Gráfico para cálculo do fator geométrico da resistência à flexão	113

Figura 85	- Gráfico para cálculo do número de tensão admissível	114
Figura 86	- Fator de ciclagem de tensão	115

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Técnicas de análise de vibrações	22
Tabela 2 - Fatores de segurança das engrenagens	51
Tabela 3 - Informações do medidor de vibração	58
Tabela 4 - Especificação dos componentes da bancada	62
Tabela 5 - Especificações do RPD pelo fabricante	67

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABRAMAN	Associação Brasileira de Manutenção e Gestão de Ativos
CA	Corrente alternada
CC	Corrente contínua
CTB	Custo total da manutenção
CWT	Transformada contínua de wavelet
FB	Faturamento bruto
FFT	Transformada rápida de Fourier
DWT	Transformada discreta de wavelet
FDP	Função densidade probabilidade
GUI	Interface gráfica do usuário
HB	Número Brinell de dureza
LWT	Transformada linear de wavelet
PET	Politereftalato de etileno
PIB	Produto Interno Bruto
PQ	Quantidade adimensional de partículas magnéticas
PQA	Monitor de partículas ferrosas
PSD	Amplitude da densidade espectral
RMS	Raiz do valor quadrático médio
RPD	Depositor rotativo de partículas
RPM	Rotações por minuto
STFT	Transformada de Fourier de curta duração
TSA	Média temporal síncrona
WVD	Distribuição de Wigner-Ville

LISTA DE SÍMBOLOS

τ	Ponto no tempo para STFT
$\Delta\xi$	Variação na frequência
Δt	Variação no tempo
ω_p	Velocidade de rotação do pinhão
ψ	Wavelet mãe
Ψ	Wavelet com escala alterada
σ	Tensão flexional
a	Parâmetro de escala
b	Parâmetro de translação
C_e	Fator de correção do alinhamento de engrenamento
C_{ma}	Fator de alinhamento de engrenamento
C_{mc}	Fator de correção de carga
C_{pm}	Fator modificador da proporção do pinhão
C_{pf}	Fator de proporção do pinhão
d_p	Diâmetro primitivo do pinhão
f	Frequência em Hz
f_c	Frequência central
F_t	Força tangencial transmitida
F^{-1}	indica a transformada inversa de Fourier
$g(t)$	Janela limitante na STFT
h_t	Altura do dente
J_p	Fator geométrico da resistência à flexão do pinhão
J_c	Fator geométrico da resistência à flexão da coroa
K_0	Fator de sobrecarga
K_B	Fator de espessura de borda
K_H	Fator de distribuição de carga
K_R	Fator de confiabilidade
K_s	Fator de tamanho
K_T	Fator de temperatura
K_v	Fator dinâmico
L	Largura da face
m_B	Razão de reforço

m_t	Módulo métrico
P	Potência transmitida em kW
Q_v	Número de controle de qualidade
S_F	Fator de segurança de resguardo contra a falha por fadiga flexional
S_H	Fator de segurança de resguardo contra a falha de crateramento
S_t	Número de tensão admissível
t	Tempo
t_R	Espessura da borda do dente
v_t	Velocidade de engrenamento
$X(f)$	signal no domínio da frequência
$x(t)$	signal no domínio do tempo
y	Sinal após a TSA
Y_J	Fator geométrico da resistência à flexão
Y_N	Fator de ciclagem de tensão

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	18
1.1	OBJETIVOS	18
1.2	ANÁLISE DE VIBRAÇÕES	19
1.3	ANÁLISE DAS PARTÍCULAS DO ÓLEO	20
1.4	UNIÃO DAS DUAS TÉCNICAS	21
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	23
2.1	MANUTENÇÃO	23
2.1.1	Manutenção corretiva	25
2.1.2	Manutenção preventiva	26
2.1.3	Manutenção preditiva	27
2.1.3.1	Curva da banheira para o desgaste da máquina	28
2.1.3.2	Fases da manutenção preditiva	29
2.2	TRIBOLOGIA	30
2.2.1	Origem e tipos de desgaste	31
2.2.2	Desgastes em dentes de engrenagens	33
2.3	MONITORAMENTO DE CONDIÇÕES USANDO ANÁLISE DE VIBRAÇÕES	36
2.3.1	Parâmetros no domínio do tempo	37
2.3.2	Parâmetros no domínio da frequência	37
2.3.3	Parâmetros no domínio tempo-frequência	38
2.4	PROCESSAMENTO DE SINAIS	38
2.4.1	Da transformada de Fourier para a transformada contínua de wavelet	38
2.4.2	Princípio da incerteza de Heisenberg	40
2.4.3	A transformada de wavelet	41
2.4.4	A transformada continua de wavelet	42
2.4.5	Média temporal síncrona	44
3	BANCADA EXPERIMENTAL	46
3.1	MESA INERCIAL	47
3.2	INVERSOR DE FREQUÊNCIA	47

3.3	MOTOR DE INDUÇÃO TRIFÁSICO	48
3.4	ACOPLAMENTO	48
3.5	REDUTOR/MULTIPLICADOR	49
3.6	PAR ENGRENADO	50
3.7	GERADOR	51
3.7.1	Excitador do gerador	53
3.8	PAINEL DE LÂMPADAS	53
3.9	TRIGGER	55
3.10	ACELERÔMETRO	56
3.11	MEDIDOR DE VIBRAÇÃO	57
3.12	COMPUTADOR E SOFTWARE DE AQUISIÇÃO	58
3.12.1	Lógica do dasylab	58
4	MATERIAIS E MÉTODOS EXPERIMENTAIS	61
4.1	CONDIÇÕES DO EXPERIMENTO	63
4.2	ANÁLISE DE LUBRIFICANTES	64
4.2.1	Ferrografia	65
4.2.2	Contagem de partículas	72
4.3	AQUISIÇÃO DOS SINAIS	74
4.3.1	Frequência de amostragem	74
4.3.2	Processamento dos sinais	75
4.4	EXPERIMENTOS	75
4.4.1	Experimento 1	76
4.4.2	Experimento 2 – dente trincado	76
5	RESULTADOS	78
5.1	EXPERIMENTO 1	78
5.1.1	Análise wavelet	78
5.1.2	Período de amaciamento	78
5.1.3	Período de funcionamento normal	82
5.1.4	Fim da vida útil	84
5.1.5	Comparativo análise wavelet x Função densidade probabilidade beta	86
5.1.6	Curva da magnitude da wavelet	88

5.1.7	Análise das partículas de desgaste	88
5.2	EXPERIMENTO 2	97
5.2.1	Análise das partículas de desgaste	102
6	CONCLUSÕES	104
6.1	TRABALHOS FUTUROS	106
	REFERÊNCIAS	107
	ANEXOS	111

1 INTRODUÇÃO

O objetivo da manutenção é descobrir, diagnosticar, prever, prevenir e eliminar danos para manter um sistema mecânico na condição de trabalho mais adequada. A manutenção moderna não é apenas eliminar falhas, mas também definir o estágio de um perigo potencial de uma falha súbita na operação do sistema. O diagnóstico tem por finalidade definir a condição do sistema, a localização, forma e motivo da formação do dano.

Redutores são utilizados em várias aplicações industriais. Consequentemente, é de extrema importância identificar os sintomas de falha de seus componentes na fase inicial. Sinais de vibração são frequentemente utilizados para identificar falhas nos componentes. No entanto, tais sinais geralmente são complexos, principalmente quando medidos em aplicações reais, por incorporarem ruídos de diversas fontes. Desse modo, a informação útil está mascarada de tal forma que é difícil estabelecer a condição para que uma conclusão possa ser feita.

Utilizando técnicas de diagnóstico da condição das engrenagens dos redutores é possível melhorar a operabilidade e a disponibilidade do equipamento, entre as muitas ferramentas atualmente em uso para diagnosticar falhas de engrenagens estão as utilizadas neste trabalho que é análise de vibração e a análise de partículas de desgaste do óleo.

1.1 OBJETIVOS

Esta dissertação visa detectar defeitos nos dentes de engrenagens utilizando a transformada contínua de wavelet por sua capacidade de identificar danos pontuais e a análise das partículas de desgaste presentes no óleo lubrificante pela capacidade de monitorar as condições de todo equipamento. A detecção e a capacidade de diagnóstico dessas técnicas são discutidas e comparadas com base nos resultados dos experimentos referentes a falhas comuns em dentes de engrenagem. No primeiro experimento as condições de um par engrenado são monitoradas até a engrenagem atingir sua vida útil, no segundo é feito um entalhe na raiz do dente representando uma trinca por fadiga. E por fim a sensibilidade de cada técnica será avaliada para cada tipo de defeito encontrado nos experimentos.

1.2 ANÁLISE DE VIBRAÇÕES

Todas as técnicas atuais de diagnóstico de engrenagens têm um objetivo comum: detectar e localizar a menor falha o mais cedo possível. Em todo tipo de falha que comprometa o funcionamento da engrenagem e se manifesta claramente no sinal de vibração, as técnicas disponíveis devem ser capazes de identificá-la. Devido à interferência de ruídos, a informação geralmente é ocultada no sinal de vibração e a questão real é qual técnica é sensível o suficiente para detectar a falha escondida no meio do ruído.

De acordo com McFadden e Toozhy (2000) e Bonnardot et al. (2005), a Média Temporal Síncrona (TSA) do sinal de vibração é a técnica mais bem sucedida para o processamento dos sinais de vibração para o diagnóstico das falhas de máquinas rotativas.

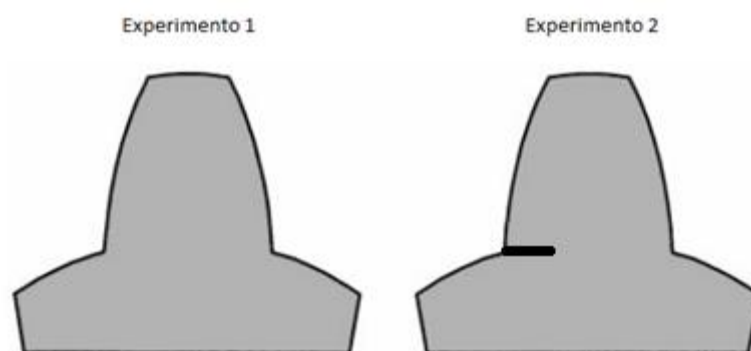
A técnica foi inicialmente proposta em 1986 por McFadden (1986). Mais tarde, Dalpiaz e Meneghetti (1991) implementaram a ideia de McFadden e usaram a curtos de fase da modulação de fase como um indicador da presença de trincas. Lin, Golnaraghi e Ismail (1997) investigou o impacto de uma trinca no dente da engrenagem e correlacionou com um sinal de vibração do redutor.

Avanços recentes no processamento de sinal nos domínios do tempo e frequência forneceram ferramentas muito poderosas e interessantes para a análise de sinais. A transformada wavelet é um método de análise de sinal de tempo-frequência, que foi melhorado e tem sido amplamente utilizado recentemente. Tem a característica do domínio do tempo, e as vantagens do domínio da frequência. Wang e McFadden (1995) usaram tanto as transformações de ondas wavelet discretas como contínuas para detectar transientes anormais gerados pelo dano precoce da engrenagem. Um dos seus principais resultados é que a transformada discreta de wavelet (DWT) é uma representação muito eficiente e sem redundâncias, no entanto, o mapa de escala no tempo obtido a partir da DWT tem detalhes limitados e, portanto, não é muito informativo. Lin e McFadden (1997) apresentaram a transformada linear de wavelet (LWT), na qual a normalização do mapa wavelet baseia-se na amplitude do sinal em oposição à energia.

Existem técnicas baseadas na análise da energia do sinal e aquelas baseadas na fase do sinal. McFadden (1987) mostrou que tanto a amplitude como a modulação de fase da TSA do sinal reflete a presença de uma trinca no dente. A maioria das outras técnicas baseia-se exclusivamente na amplitude do sinal. Neste estudo, será explorado o uso dos mapas de amplitude e de fase da transformada contínua de wavelet (CWT) para identificar e avaliar falhas em um experimento com um redutor instrumentado.

Inicialmente será feita uma revisão da transformada wavelet contínua e enfatizado os aspectos mais relevantes para esta dissertação. Em seguida, serão abordadas algumas questões computacionais e serão exibidos alguns erros comuns, muitas vezes encontrados no cálculo da wavelet. O experimento realizado neste estudo é então descrito e as informações necessárias para implementar as técnicas discutidas neste trabalho serão apresentadas. Essas técnicas são então aplicadas em dois casos de teste diferentes: o primeiro de uma engrenagem saudável em operação até atingir sua vida útil e o segundo de uma engrenagem com entalhe transversal na raiz de um dente como uma trinca por fadiga como demonstrado na Figura 1.

Figura 1 - Detalhe do dente da engrenagem para cada tipo de experimento



Fonte: Próprio autor

A análise de vibrações é uma das técnicas mais comuns na manutenção preditiva de pares engrenados, outra técnica muito utilizada é a análise das partículas presentes no óleo lubrificante.

1.3 ANÁLISE DAS PARTÍCULAS DO ÓLEO

A palavra tribologia vem do grego τριβω (tribo) cujo significado é esfregar, atritar, friccionar, e λόγος (logos) que significa estudo, foi definida em 1966 como "a ciência e tecnologia da interação de superfícies em movimento relativo e assuntos e práticas relacionados" (JOST, 1990). Seu objetivo principal é fornecer um filme de baixa resistência ao cisalhamento, reduzindo a fricção entre sólidos em movimento relativo. Isto é, reduzir o atrito e proteger contra o desgaste as superfícies.

Como o lubrificante reduz os efeitos negativos dos processos tribológicos relacionados ao atrito, desgaste e aumento da temperatura, todos os tipos de manutenção incluem a

lubrificação como parte importante de todo o processo de manutenção. Por outro lado, o lubrificante é um componente chave que traz informações sobre o estado de todo o sistema. Portanto, a análise do óleo lubrificante, com base em um programa corretamente definido, representa um método eficaz para monitorar o estado dos sistemas mecânicos, reconhecendo precocemente problemas que podem levar a falhas e degradação do equipamento.

Há uma variedade de razões para falhas de sistemas reais, o desgaste, a fadiga e a vibração mecânica são alguns exemplos das razões subjacentes às falhas de contato. Gohar e Rahnejat (2008) destacam esses modos de falha, e os métodos de previsão de vida de fadiga para contatos concentrados também são observados.

O monitoramento das partículas presentes no óleo lubrificante é um procedimento importante no diagnóstico do sistema. A vantagem deste procedimento é que a informação sobre a funcionalidade dos componentes do sistema é obtida sem parar e desmontar o equipamento Mang e Lingg (2017).

Neste trabalho foi apresentado técnicas de análise de lubrificantes, utilizada a ferrografia pela capacidade de identificar o tipo de desgaste e a contagem de partículas por quantificar o número de partículas presentes no óleo. No experimento foram coletadas amostras do óleo periodicamente e o resultado analisado.

1.4 UNIÃO DAS DUAS TÉCNICAS

Silva (2001) realizou 13 técnicas de análise de vibrações que podem ser vista na Tabela 1 em dois experimentos um com a engrenagem sem defeito e outro com a engrenagem sem um dente. Ele concluiu que para detecção de danos pontuais a técnica de wavelet era a mais recomendada.

Tabela 1 - Técnicas de análise de vibrações

Técnica de Análise	CONDIÇÕES ANALISADAS		
	Capacidade de Detecção da Excentricidade	Detecção da Evolução da Excentricidade	Capacidade de Detecção de Dano Pontual
TSA	Nenhuma	Nenhuma	Muito Boa
Sinal Residual	Nenhuma	Nenhuma	Muito Boa
Demodulação	Boa	Boa	Muito Boa
Variância	Nenhuma	Nenhuma	Boa
RMS	Indeterminada	Indeterminada	Boa
Skewness	Nenhuma	Nenhuma	Boa
Kurtosis	Nenhuma	Nenhuma	Muito Boa
Crest Factor	Nenhuma	Nenhuma	Muito Boa
Espectro	Excelente	Excelente	Boa
STFT	Boa	Boa	Excelente
Wavelet	Pequena	Pequena	Excelente
Wigner-Ville	Boa	Boa	Excelente
Pseudo Wigner-Ville	Boa	Boa	Excelente

Fonte: Silva (2001).

Segundo Cunha (2005), foi verificado o desgaste de um redutor analisando as duas técnicas e concluiu que a análise de partículas do óleo é vantajosa, pois fornece informações mais rápidas dos modos de desgaste. No trabalho de Lago (2007) foi utilizado um redutor e verificou-se duas técnicas, análise de vibrações por demodulação e análise de partículas. Ele concluiu que a integração das duas técnicas é a melhor alternativa para manutenção de um redutor. Silva (2015) ensaiou uma engrenagem por toda sua vida útil, as análises de vibrações foram feitas utilizando a técnica da função densidade probabilidade (FDP) beta e também foi feita análise das partículas de desgaste, neste trabalho a FDP beta teve ótimos resultados para indicar o nível de severidade de cada dente.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 MANUTENÇÃO

De acordo com a NBR 5462 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS- ABNT, 1994) a definição de manutenção é a “Combinação de todas as ações técnicas e administrativas, incluindo as de supervisão, destinadas a manter ou recolocar um item em um estado no qual possa desempenhar uma função requerida”. O gerenciamento de manutenção, por outro lado, determina os objetivos de manutenção, estratégias, responsabilidades e a execução de planos de ação conscientemente selecionados para atender aos objetivos gerais de organização e manutenção. Também foi mostrado por (ARATO JUNIOR, 2004) que uma manutenção efetiva realiza tarefas no momento certo com velocidade e habilidade. Segundo o relatório de 2013 da Associação Brasileira de Manutenção e Gestão de Ativos Abraman (2013) sobre a Situação Da Manutenção No Brasil, o custo da manutenção no país representa 4,3% do PIB (Produto Interno Bruto), isso significa que bilhões são gastos com manutenção no Brasil e um planejamento, pesquisas e utilização de técnicas inovadoras é essencial para evitar gastos desnecessários. A Figura 2 oferece uma visão geral sobre o custo da manutenção no Brasil, relacionando o ano com o PIB, o custo total da manutenção (CTB) pelo faturamento bruto (FB) e o custo final.

Figura 2 - Custo da Manutenção no Brasil

CUSTO DA MANUTENÇÃO NO BRASIL				
Ano da Pesquisa	Ano Base	PIB (Milhões de R\$)	CTM/FB (%)	Custo (Milhões de R\$)
2013	2012	4.403.000	4,69	206.500,700
2011	2010	3.675.000	3,95	145.162,500
2009	2008	2.900.000	4,14	120.060,000
2007	2006	2.322.000	3,89	90.325,800
2005	2004	1.769.202	4,10	72.537,282
2003	2002	1.346.028	4,27	57.475,396
2001	2000	1.101.255	4,47	49.226,099
1999	1998	914.188	3,56	32.545,093
1997	1996	778.887	4,39	34.193,139
1995	1994	349.205	4,26	14.876,133

Fonte: Abraman (2013).

Muitas empresas procuram obter vantagem competitiva em relação ao custo, qualidade e serviço. O efeito da manutenção nessas variáveis levou a uma maior atenção à área de manutenção como parte integrante da melhoria da produtividade. A manutenção está evoluindo rapidamente para um grande fator no desempenho e rentabilidade dos processos de fabricação. Na verdade, alguns consideram a manutenção como a "última fronteira" para a fabricação (KAUPPI; YLINEN, 2005).

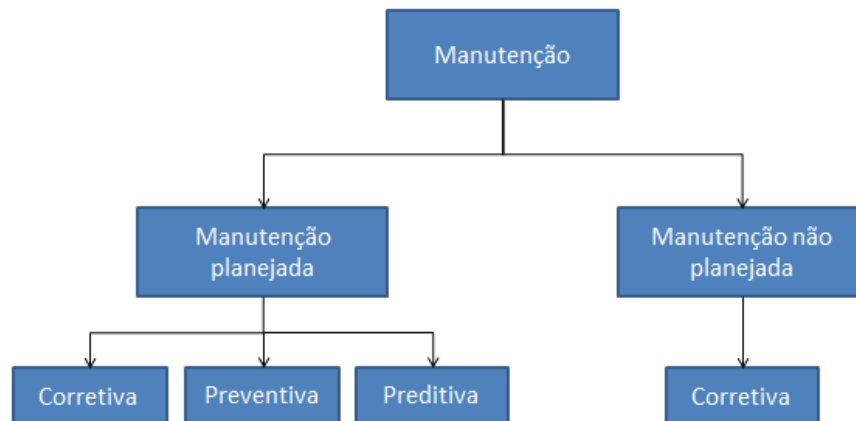
As porcentagens médias dos diferentes tipos de manutenção apresentados, com base nos dados disponíveis da indústria (ABRAMAN, 2013), indicam que mais de 30% de todas as atividades relacionadas à manutenção na indústria brasileira estão em manutenção corretiva e isso significa que praticamente em um terço das vezes, as atividades de manutenção acontecem como uma surpresa para os gerentes de manutenção, e sua consequência natural é um custo inesperado e equipamento parado. Esses dados estão disponíveis na Figura 3.

Figura 3 - Aplicação dos Recursos na Manutenção (%)

Aplicação dos Recursos na Manutenção (%)				
Ano	Manutenção Corretiva	Manutenção Preventiva	Manutenção Preditiva	Outros
2013	30,86	36,55	18,82	13,77
2011	27,40	37,17	18,51	16,92
2009	26,69	40,41	17,81	15,09
2007	25,61	38,78	17,09	18,51
2005	32,11	39,03	16,48	12,38
2003	29,98	35,49	17,76	16,77
2001	28,05	35,67	18,87	17,41
1999	27,85	35,84	17,17	19,14
1997	25,53	28,75	18,54	27,18
1995	32,80	35,00	18,64	13,56
Hh (serviços de manutenção) / Hh (total de trabalho)				

Fonte: Abramam (2013).

Ao discutir a teoria da manutenção, é necessário esclarecer a terminologia, estrutura e objetivos dos diferentes tipos de manutenção. Em um sentido amplo, as três práticas de manutenção são a manutenção corretiva, a manutenção preventiva e a manutenção preditiva que serão discutidas neste capítulo e demonstrado na Figura 4.

Figura 4 - Visão geral da manutenção

Fonte: Próprio autor

2.1.1 Manutenção corretiva

É a manutenção com a filosofia "corrigir quando quebrar", definida pela NBR 5462 (ABNT, 1994) como “Manutenção efetuada após a ocorrência de uma pane destinada a recolocar um item em condições de executar uma função requerida”. Ela é também conhecida pelo seu termo em inglês “Run To Failure” (RTF) que significa “rodar até quebrar” (MOBLEY, 2002). Existem alguns casos em que a manutenção corretiva pode ser viável e planejada, é importante a utilização racional desse tipo de manutenção e que seja considerada em equipamentos cuja quebra não afete drasticamente o processo produtivo.

A manutenção corretiva envolve todas as ações não programadas realizadas como resultado do sistema ou falha no produto. Basicamente, é uma tentativa de restaurar o equipamento para uma condição especificada. As etapas desse tipo de manutenção estão descritos abaixo:

- 1) Identificação de falha;
- 2) Localização e isolamento;
- 3) Desmontagem;
- 4) Remoção e reposição ou reparo do item no local;
- 5) Remontagem;
- 6) Verificação e condição verificação.

Esta abordagem é principalmente uma resposta à quebra da máquina. Infelizmente, muitas indústrias ainda estão em um modo de operação corretivo. Seu principal objetivo é produzir, quando o equipamento quebrar, eles corrigem o mais rápido possível e, em seguida, volta à operação até que ele quebre novamente. Este é um processo pouco confiável, mas a vida útil é estendida até o máximo. Devido à sua natureza imprevisível, pode facilmente causar interrupções no processo de produção. É importante aproveitar a tecnologia e processos de manutenção mais sofisticados para obter melhores resultados.

2.1.2 Manutenção preventiva

Definida como “Manutenção efetuada em intervalos predeterminados, ou de acordo com critérios prescritos, destinada a reduzir a probabilidade de falha ou a degradação do funcionamento de um item” (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA E NORMAS TÉCNICAS-ABNT, 1994). Outros termos comumente utilizados para se referir à manutenção preventiva incluem manutenção programada, manutenção sistemática. As tarefas de manutenção realizadas no equipamentos antes de um estado de falha são conhecidas como manutenção preventiva (ARATO JUNIOR, 2004). A teoria que orienta a filosofia da manutenção preventiva é "corrigir antes de falhar". O pressuposto é que toda máquina sofrerá determinadas quantidades de degradação à medida que a vida útil dos seus componentes seja atingida e eventualmente falhará com tempo ou uso.

Seu objetivo é garantir que a qualidade da produção seja mantida e que os horários de entrega sejam atendidos. Além disso, uma máquina bem cuidada durará mais tempo e causará menos problemas. Na manutenção preventiva a atividade da manutenção é realizada com base nas informações do fabricante do equipamento, avaliações estatísticas ou experiência prática, sem qualquer análise do desempenho real da peça substituída (FORSTHOFFER, 2011). Não importa se a peça está funcionando, ela deve ser descartada quando o intervalo predeterminado tenha sido alcançado.

Os benefícios resultantes da manutenção preventiva são muitos. Alguns deles estão listados abaixo:

- Segurança;
- Menor custo;
- Redução de falhas e avarias;
- Extensão da vida do equipamento;

- Maior valor de troca / comercialização de equipamentos;
- Aumento da confiabilidade do equipamento;
- Aumento da produtividade da planta;
- Menos surpresas.

A grande desvantagem é descartar itens que ainda possuem vida útil. Outra desvantagem desse tipo de manutenção, é que ela não atende falhas provenientes do erro humano ou falhas que ocorrem no início da vida útil, como problemas de fabricação, defeitos de instalação e montagem incorreta.

Falhas no início da vida útil do equipamento ocorrem, por isso é importante manter a manutenção apenas conforme necessário, ou seja, com base na condição real do equipamento e não apenas em deduções históricas. Por isso iniciou-se o estudo da manutenção preditiva.

2.1.3 Manutenção preditiva

A manutenção preditiva baseia-se na filosofia: "se não estiver quebrado, não conserte". Ela envolve a realização de manutenção em uma máquina antes do tempo em que ocorreria uma falha se a manutenção não fosse realizada. Isso significa que é preciso calcular quando uma máquina está prevista para falhar. As máquinas rotativas geralmente mostram sinais de falhas iminentes antes da ocorrência de uma eventual quebra. Por exemplo, pode haver um aumento na temperatura ou fissuras nas superfícies, aumento do nível de vibração, alteração nos padrões de vibração no espectro da frequência e alterações das formas de onda do tempo. Pode haver uma queda no desempenho, um aumento do nível de ruído, maior rigidez do rotor ou mudanças nas correntes e tensões do motor entre vários outros sinais. Existem muitas técnicas em uso hoje que podem fornecer sinais iniciais desses modos de degradação (MOBLEY, 2002). Essas técnicas coletam dados sobre variáveis que podem ser usadas para indicar uma falha iminente (vibração, temperatura, som, cor, etc.). Estes dados são então analisados para identificar quando uma falha irá ocorrer e a manutenção será agendada antes dessa hora.

As atividades de manutenção e os trabalhos de reparação são planejados de uma forma que consideram não apenas as necessidades de manutenção, mas também os horários de produção. Idealmente, haverá maior disponibilidade de máquina, maior lucro, menor custo de estoques de peças sobressalentes e custos de manutenção drasticamente mais baixos. A

manutenção preditiva é mais do que apenas monitoramento de condição, ela envolve mudanças nos procedimentos de gerenciamento para permitir que as atividades de manutenção sejam acionadas por necessidades reais de manutenção, em vez de manter a manutenção com base em que horas são no relógio ou na agenda do gerente. Com isso, o tempo de inatividade não planejado é minimizado (FORSTHOFFER, 2011).

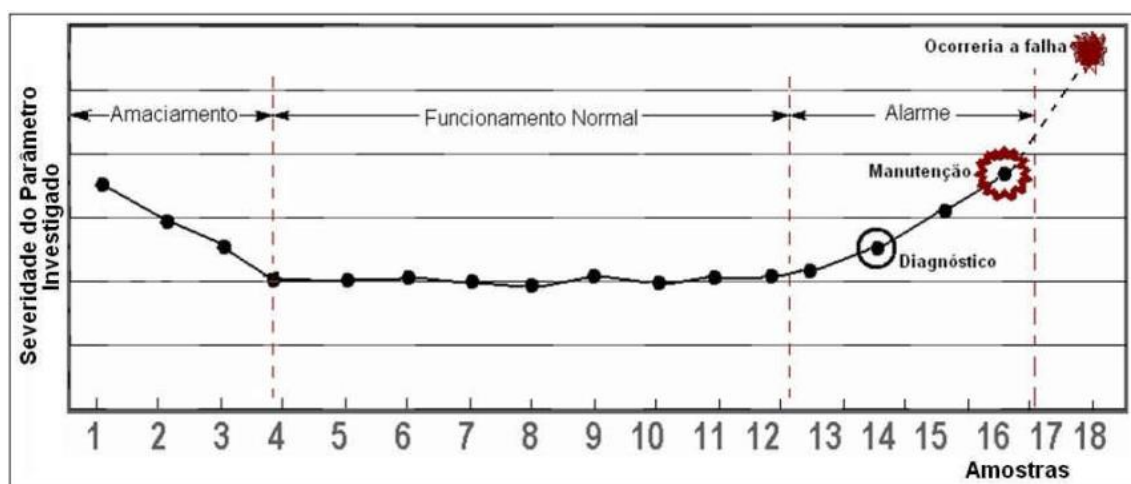
Uma manutenção preditiva bem estruturada é importante para evitar paradas não planejadas ou mitigar as consequências de falhas súbitas. Aumentar a porcentagem de atividades de manutenção preditiva de seu atual nível de 18,82 por cento (ABRAMAN, 2013), terá um impacto positivo direto sobre os fatores de segurança e rentabilidade dos ativos de manutenção.

Para uma boa manutenção é importante conhecer a curva da banheira para o desgaste da máquina e os seus três períodos.

2.1.3.1 Curva da banheira para o desgaste da máquina

Muitas distribuições de vida útil possuem o formato da curva da banheira e muitos dados da vida real exibem esta propriedade (ZENG; LAN; CHEN, 2016). Quando a severidade do parâmetro investigado é mostrada no eixo vertical e o tempo no eixo horizontal, a curva parece uma banheira. Por isso a curva da Figura 5 é chamada de curva da banheira.

Figura 5 - A curva da banheira para o desgaste da máquina



Fonte: Arato Junior (2004).

A curva da banheira possui três estágios, o período de amaciamento, do funcionamento normal e o período de alarme após o fim da vida útil.

O amaciamento é o período em que ocorrem falhas relativamente precoces no início de operação de um equipamento e é caracterizada por uma severidade alta com um declínio gradual (ROESCH, 2012). Esse fenômeno é causado pelo amaciamento dos componentes do equipamento.

Uma vez que o amaciamento chegou ao fim, a severidade do parâmetro investigado se estabiliza em um nível baixo e constante por um longo período até o fim de sua vida útil (ARATO JUNIOR, 2004).

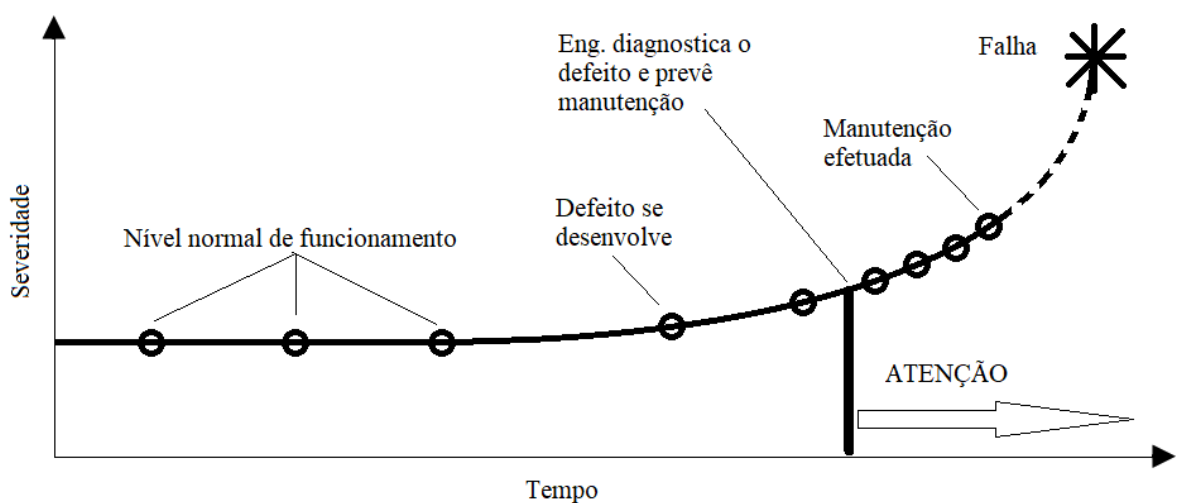
Após a vida útil do equipamento inicia-se o período de alarme, o período em que os equipamentos falham devido ao desgaste e fadiga, com a severidade do parâmetro investigado aumentando ao longo do tempo (ZENG, 2016).

A manutenção preditiva monitora o equipamento até diagnosticar a falha e divide o fim da curva da banheira em fases.

2.1.3.2 Fases da manutenção preditiva

A Figura 6 fornece uma visão das fases da manutenção preditiva, que indica o comportamento de um equipamento, desde o ponto do início da falha até o ponto na qual ocorre a falha.

Figura 6 - Fases da manutenção preditiva



Fonte: Próprio autor

As fases da manutenção preditiva são acompanhadas para impedir que a máquina atinja o ponto de falha inesperadamente. Após o ponto de desenvolvimento do defeito e o engenheiro responsável diagnosticá-lo, entra em um período de atenção com um aumento da frequência das análises e a realização da manutenção.

A análise de vibração fornece indicações de alerta precoce e ajudar a detectar esses mecanismos de falha antes de atingir um nível alarmante. A manutenção preditiva é a aplicação sistemática dessas condições com base em alertas antecipados para a manutenção dos ativos de produção em consideração (MOBLEY, 2002). Um sistema que fornece um sinal precoce de falha e ajuda a evitar surpresas.

A análise das partículas do óleo que também é discutida em detalhes neste trabalho pode fornecer pode detectar a erosão das superfícies metálicas em equipamentos. A lubrificação inadequada, o desequilíbrio dos membros rotativos e a folga excessiva são causas comuns de desgaste de componentes em equipamentos, especialmente em máquinas rotativas.

2.2 TRIBOLOGIA

No estudo da tribologia uma das áreas mais importantes é a lubrificação, ela pode ser formada por qualquer substância que separe superfícies em movimento relativo e reduza o atrito. Geralmente os lubrificantes são líquidos, mas também existem na forma gasosa, sólida e pastosa (CUNHA, 2005). Existem várias técnicas de análise das partículas provenientes do desgaste de equipamentos mecânicos presentes nos óleos lubrificantes e são muito importantes na manutenção preditiva. Com intervalos regulares, as coletas das amostras de lubrificantes mostram as condições do funcionamento de um sistema mecânico. As técnicas mais conhecidas são a ferrografia, a análise espectrográfica e a contagem de partículas (SILVA, 2015).

As técnicas de análise de óleo lubrificante não determinam o estado de funcionamento dos equipamentos mecânicos, mas fornecem uma relação quantitativa dos elementos químicos individuais, como contaminantes e aditivos contidos no óleo. No caso das engrenagens lubrificadas por óleo, pode-se comparar quantitativamente os contaminantes de cada amostra da máquina, com isso é possível identificar os padrões de desgaste, e ao ocorrer uma mudança desse padrão uma falha é eminente.

Para o controle de qualidade do óleo lubrificante, temos a análise espectrográfica, através do estado atual do óleo, a análise espectrográfica na manutenção preditiva poderá

programar intervalos de troca do óleo. Uma redução no número de trocas de óleo auxilia na diminuição dos custos anuais de manutenção. Apenas por uma amostra e ensaios de baixo custo, é possível identificar quando a troca do óleo de uma máquina deve ser realizada (SNIDLE; EVANS; ALANOU, 2003).

2.2.1 Origem e tipos de desgaste

Em engenharia de materiais, o termo desgaste designa a indesejada remoção de materiais de superfícies sólidas por ação de energia mecânica, o que vem a ser uma das principais razões para falhas e substituição de peças do sistema (STOETERAU, 2004). Os processos de desgastes dependem diretamente dos materiais envolvidos e suas composições assim como dos parâmetros de operação (carga, velocidade, temperatura, tempo), da estrutura do sistema tribológico (corpo, contra-corpo, interface, ambiente) e suas formas de ação (rolamento, deslizamento, impacto e escoamento).

De acordo com Rabinowicz (2013), os desgastes podem ser classificados em quatro tipos primários: abrasivo, adesivo, corrosivo e por fadiga, além de processos secundários que são frequentemente vistos como formas de desgaste. Cada um desses processos ocorre de acordo com suas próprias leis, e a atuação de um pode interferir em outro e caracteriza um sistema complexo de ações mecânicas. Visto isso, é de muita importância o estudo de cada caso para que se encontre a causa primária do desgaste e para o entendimento do cenário completo.

2.2.1.1 Desgaste abrasivo

Desgastes abrasivos ocorrem quando uma superfície dura e rugosa desliza contra outra de menor dureza (abrasão de dois corpos) ou quando partículas duras deslizam entre duas superfícies de menor dureza (abrasão de três corpos). Esse processo, geralmente resulta em remoção de material por microcortes ou microsulcamento, especialmente quando a superfície desgastada é metálica, e fraturas superficiais podem ocorrer durante abrasão de superfícies frágeis.

A rugosidade da superfície é uma variável importante para o desgaste abrasivo. Abrasão de dois corpos é reduzida em superfícies com menor rugosidade, por exemplo, um mancal de rolamento feito de um material mais macio do que o do eixo de transmissão irá

deslizar sobre o eixo com pequena ou quase nula abrasão, devido ao acabamento da superfície. A adição de elementos podem ser incorporados ao material mais macio e evitar que ocorra a abrasão de três corpos. Essa técnica pode gerar danos ao rolamento, mas isto é preferível, pois a manutenção e reposição dessa peça é mais fácil e tem menor custo do que a troca de todo o eixo de transmissão.

2.2.1.2 Desgaste adesivo

Desgaste adesivo é causado por fortes forças de atração entre duas superfícies com uma área de contato real. Isso resulta na remoção de pequenas partículas de ao menos uma das superfícies do sistema, geralmente a de menor dureza, esse desgaste é chamado de estria ou risco de atrito (scoring). As partículas podem fundir-se à outra superfície ou se misturar com outros materiais, antes de serem expelidas como partículas de desgaste soltas.

Quando a aspereza gerada pelo desgaste for muito extensa de maneira que as superfícies não mais deslizem entre si tem-se uma falha chamada emperramento, que pode ocorrer, por exemplo, em motores que funcionam após a perda de lubrificação ou refrigeração. Um grau ainda mais severo de desgaste por adesão, em que maior quantidade de material é transferido entre superfícies, é conhecido por raspagem.

O desgaste adesivo pode ser particularmente severo entre superfícies cujos materiais contem grande afinidade um pelo outro, como, por exemplo, superfícies feitas com o mesmo metal. Segundo Stoeterau (2004), existem dois importantes critérios para a escolha dos materiais para o par deslizante, a composição por metais mutualmente insolúveis e que um dos metais seja do sub-grupo B da tabela periódica.

2.2.1.3 Desgaste corrosivo

Desgaste corrosivo ocorre devido à ação química do óleo lubrificante ou de aditivos. Ferrugem, ou oxidação, é uma das formas de desgaste mais comuns. Materiais nobres são conhecidos por suas propriedades não corrosivas. Ouro, especificamente, é usado em aparelhos eletrônicos como revestimento devido a sua habilidade em resistência a corrosão. Ferro e materiais ferrosos são mais propensos à ferrugem e também a descamação, expondo outra camada que permite a oxidação para continuar o desgaste corrosivo.

O desgaste corrosivo pode ser controlado por alcalinidade ou acidez no lubrificante, sendo o índice entre 0,02 a 0,10. Esse desgaste ocorre geralmente com rápidas reações iniciais, e com diminuição de ação corrosiva após um tempo, já que existe a formação de um filme protetor na superfície, separando elementos reativos. No entanto, em alguns não há a formação de filme lubrificante e as reações continuam indefinidamente. Em sistemas em que o processo dominante é o desgaste adesivo, produtos corrosivos são adicionados ao lubrificante, de maneira que a ação do desgaste corrosivo forme um filme macio com baixo teor de desgaste, o qual protege a adesão entre superfícies.

2.2.1.4 Desgaste por fadiga

O desgaste por fadiga ocorre por repetição do movimento de rolamento ou deslizamento sobre uma superfície desgastada, o que resulta no início da formação de uma trinca subsuperficial, que depois de cíclicas tensões sobre o material podem gerar um dano mais severo. A trinca gerada pode chegar à superfície formando uma partícula superficial macroscópica com a relativa formação de covas (pitting) ou lascamento (spalling), processos observados mais comumente em dentes de engrenagem, rolamentos e cames.

Distinguem-se dois tipos de desgaste por fadiga, a fadiga de alto-ciclo e a de baixo-ciclo. Na fadiga de alto-ciclo, o número de ciclos antes que ocorra a falha é alto, em que a vida útil do componente é relativamente longa. As trincas nesse caso são formadas devido a pequenos desgastes já existentes no material. Já na fadiga de baixo-ciclo, o número de ciclos antes da falha é baixo e nesse caso, plasticidade é induzida a cada ciclo e a partícula de desgaste é gerada ao longo do curso de repetidos ciclos.

2.2.2 Desgastes em dentes de engrenagens

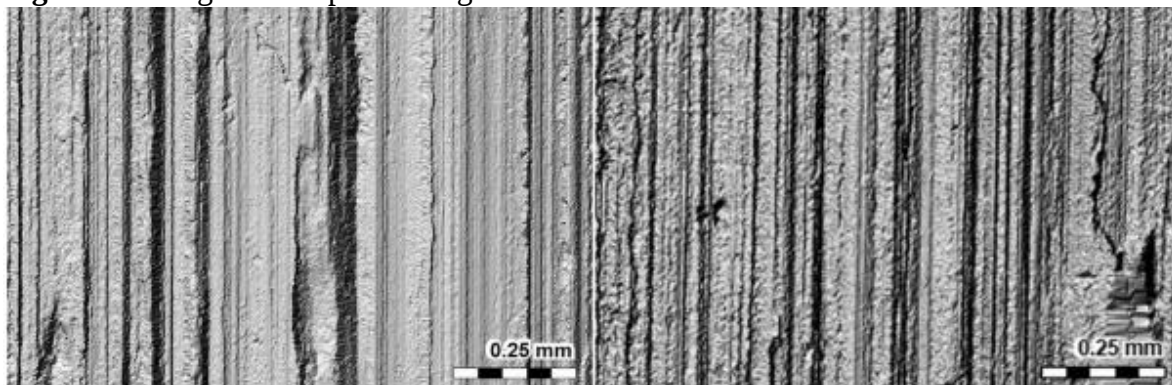
O desgaste pode ser definido como a remoção ou deslocamento de material de superfícies em contato como resultado de ação mecânica, química ou elétrica. O desgaste pode ser classificado como leve, moderado ou grave (AMERICAN NATIONAL STANDARDS INSTITUTE- ANSI; AMERICAN GEAR MANUFACTURERS ASSOCIATION- AGMA, 2014). O desgaste pode ser causado por vários mecanismos, como por exemplo, desgaste adesivo e desgaste abrasivo, e o mecanismo de desgaste predominante dá origem a um modo de falha específico.

2.2.2.1 Scuffing

Geralmente, o desgaste por “scuffing” ocorre em uma temperatura crítica de contato, na qual a película de lubrificante falha e ocorre uma micro-soldagem entre as superfícies (WOJCIECHOWSKI; WIECZOROWSKI; MATHIA, 2017). O processo de desgaste das engrenagens é lento e contínuo, mas a vida das engrenagens geralmente é deliberadamente limitada pela fadiga da superfície, uma vez que uma quebra do dente irá parar imediatamente a função de engrenagem.

Pode ser visto na Figura 7 exemplos do desgaste adesivo severo do tipo “scuffing”, que é conhecido por deixar faixas ásperas na direção da rotação da engrenagem.

Figura 7 - Desgaste do tipo scuffing



Fonte: Wojciechowski, Wieczorowski e Mathia (2017).

2.2.2.2 Pitting

Outra forma de desgaste que ocorre em engrenagens é o “pitting” e se caracteriza pela formação de covas no flanco do dente da engrenagem como visto na Figura 8. O desgaste inicia-se por adesão microscópica que com o movimento ocorre a remoção de material formando covas ou pits (KATTELUS; MIETTINEN; LEHTOVAARA, 2018). A formação de “pitting” nas superfícies dos dentes pode ser considerado como uma condição de desgaste leve, deve-se notar que o desgaste leve é considerado normal em muitas aplicações. No entanto, o desgaste leve também é susceptível a atuar como um catalisador para desgaste por fadiga (SPANGENBERG; FRÖHLING; ELS, 2018).

Figura 8 - Desgaste do tipo pitting



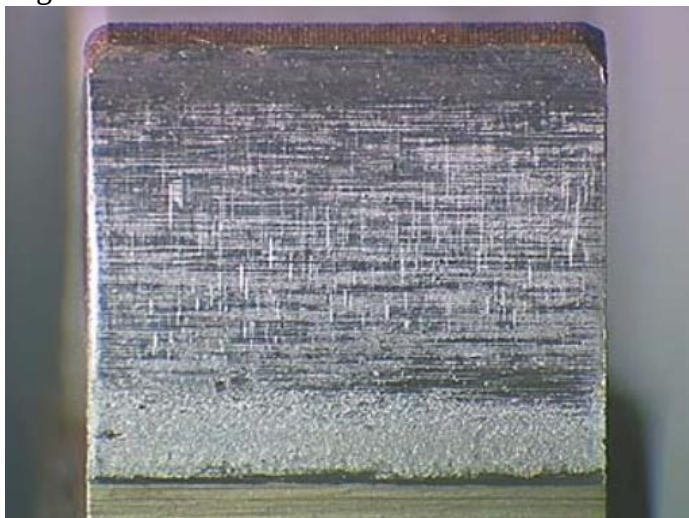
Fonte: Predki, Nazifi e Lützig (2011).

Devido aos avanços nas capacidades de modelagem, nos aços de engrenagens com menos impurezas e na qualidade das superfícies o desgaste leve da superfície dos dentes de engrenagens ganhou significância (KAHRAMAN; BAJPAI; ANDERSON, 2005).

2.2.2.3 Micropitting

O “micropitting” é um dos mecanismos de falha mais comuns em engrenagens (SNIDLE et al., 2003). Este mecanismo pode afetar a precisão das engrenagens e causar desgaste não uniforme nos dentes (SHENG, 2010). Esse defeito ocorre devido ao contato cíclico dos dentes da engrenagem que operam em altas rotações e ao fluxo plástico das rugosidades, pode ser considerado como uma falha por fadiga, com trincas se propagando em um ângulo raso para a superfície e covas que tem apenas alguns micrômetros de profundidade (BRANDÃO et al., 2014). Micropitting é classificado como um desgaste superficial avançado, e é comum abaixo do círculo primitivo da engrenagem, onde a tração deslizante reduz a vida por fadiga (DRAGO; CUNNINGHAM; CYMBALA, 2010). Na Figura 9 está uma engrenagem com “micropitting” na raiz do dente.

Figura 9 - Micropitting



Fonte: Snidle (2013).

Não há uma explicação completa dos principais fatores que contribuem para a formação do “micropitting”. Há vinte anos, não era considerado um modo de falha problemático (BRECHOT et al., 2000; DRAGO; CUNNINGHAM; CYMBALA, 2010), mas o problema se tornou generalizado e sua solução agora é urgente (SNIDLE et al., 2003).

A manutenção preditiva de um par engrenado pode ser feita analisando as partículas formadas pelos desgastes que ficam presentes no óleo lubrificante, outra análise pode ser feita a partir da análise de vibrações do equipamento.

2.3 MONITORAMENTO DE CONDIÇÕES USANDO ANÁLISE DE VIBRAÇÕES

As máquinas rotativas originam vibrações e consequentemente ruído. As características de cada máquina têm uma assinatura de vibração própria. Portanto, uma mudança na assinatura de vibração, devido a uma alteração no estado da máquina, pode ser usada para detectar defeitos ainda no início, antes de se tornarem críticos. Este é o objetivo do monitoramento de condições, em que as informações obtidas a partir de uma assinatura da máquina são usadas para detectar falhas em um estágio inicial. Em geral, o processo de monitoramento da condição básica é subdividido em três etapas principais: primeiro uma quantidade física relevante é medida, então os dados coletados são processados e as características do estado da máquina são extraídas, finalmente os recursos de estado extraído são comparados aos valores de referência. Além disso, além da detecção, os métodos de

monitoramento de condições também podem ser usados para diagnosticar o tipo e a evolução de certos defeitos.

Os sinais adquiridos nas máquinas geralmente contêm contribuições de vários componentes diferentes, bem como o ruído. Portanto, o principal desafio de monitoramento de condição é apontar o conteúdo do sinal que está relacionado ao estado do componente monitorado.

Há um grande número de técnicas de processamento de sinal que podem ser usadas para extrair informações interessantes de um sinal de vibração. A seguir, alguns conceitos básicos dessas técnicas serão apresentados.

2.3.1 Parâmetros no domínio do tempo

Parâmetros estatísticos simples que avaliam o sinal ao longo do domínio do tempo podem fornecer informações interessantes sobre defeitos potenciais. Por exemplo, a raiz do valor quadrático médio, mais conhecido como RMS, é referida ao nível geral de vibração. Estes parâmetros estatísticos são simples de implementar, no entanto, são ferramentas bastante insensíveis para a detecção de defeitos (SILVA, 2001). Uma técnica útil em muitas detecções de defeito é a técnica da média temporal síncrona (TSA) (QU et al., 2013). O resultado da TSA é a média do sinal, que é a média de todo sinal no domínio do ângulo, amostrada de forma síncrona em relação à rotação de um eixo particular. Em seu resultado, o ruído aleatório e o sinal de componentes não sincronizados são atenuados. A principal vantagem da TSA é a possibilidade de extrair de um sinal de vibração complexo, um sinal mais simples referente a uma volta da engrenagem de interesse. No entanto, esta técnica tem uma desvantagem fundamental relacionada à complexidade do equipamento de medição, pois nela é necessário um tacômetro (trigger) para medir a velocidade do eixo de rotação.

2.3.2 Parâmetros no domínio da frequência

Os defeitos nos dentes da engrenagem podem também ser analisados pelo espectro no domínio da frequência do sinal de vibração. Para calcular o espectro da frequência de um sinal no tempo, o algoritmo da transformada rápida de Fourier (FFT) pode ser usado como um método numericamente eficiente (PARKER, 2017). Os métodos digitais da transformada de Fourier assumem sinais estacionários, periódicos na janela de tempo.

2.3.3 Parâmetros no domínio tempo-frequência

Os métodos espectrais mencionados anteriormente, como a FFT, assumem sinais estacionários, com isso os defeitos localizados geralmente apresentam componentes de sinal não estacionários (PRUDHOM et al., 2017), que não podem ser descritos corretamente por métodos espectrais comuns. Esta desvantagem pode ser superada pelo uso da Transformada de Fourier de curta duração (STFT) que é uma transformada de Fourier aplicada em muitas janelas de curta duração. No entanto, janelas no tempo estreitas significam baixa resolução na frequência. Esse problema entre tempo e resolução na frequência é a principal desvantagem da STFT, que pode ser resolvido pelo uso de outras técnicas no domínio tempo-frequência, como a distribuição de Wigner-Ville (WVD) e a transformada contínua de wavelet (CWT).

2.4 PROCESSAMENTO DE SINAIS

Várias técnicas de processamento de sinal são aplicadas a sinais estacionários tanto no domínio da frequência quanto do tempo para fins de diagnóstico de máquinas rotativas, como a média temporal síncrona (TSA), a amplitude da densidade espectral (PSD) e as demodulações de fase. No entanto, uma tendência mais recente tem sido a representação na análise tempo-frequência, como a transformada de wavelet. Neste trabalho, a atenção está focada na técnica de tempo-frequência e os antecedentes teóricos sobre a transformada contínua de wavelet (CWT) serão descritos.

2.4.1 Da transformada de Fourier para a transformada contínua de wavelet

A análise de tempo-frequência oferece um método alternativo para a análise de sinal, apresentando informações simultaneamente no domínio do tempo e na frequência.

Para sinais estacionários, a abordagem clássica é a conhecida transformada de Fourier.

$$X(f) = \int_{-\infty}^{+\infty} x(t) \cdot e^{-2j\pi ft} dt \quad (1)$$

Ela transforma o sinal no tempo para o domínio da frequência (análise espectral) sendo a ferramenta matemática mais utilizada para processamento de sinais. Utiliza como funções de base, funções harmônicas (senos e cossenos). Qualquer função periódica, por mais

complicada que seja, tem sua representação equivalente como uma soma de componentes senoidais de frequências distintas, por conta da série de Fourier.

A informação obtida quando se aplica a Transformada de Fourier em um sinal é completamente caracterizada pelo seu conteúdo na frequência, inclusive não é possível localizar o tempo em que as frequências ocorrem.

Enquanto estivermos satisfeitos com operadores temporários invariantes no tempo, a transformada de Fourier fornece respostas simples para a maioria das questões. A qualidade do seu resultado torna-a adequada para uma ampla gama de aplicações, como transmissões de sinais ou processamento de sinal estacionário. No entanto, se estamos interessados em fenômenos transitórios, a transformada de Fourier torna-se uma ferramenta pesada. De fato, como pode-se ver na equação (1), os coeficientes de Fourier $X(f)$ são obtidos por produtos internos de $x(t)$ com ondas senoidais de duração infinita no tempo. Portanto, as informações globais dificultam a análise de qualquer propriedade local de $x(t)$, pois qualquer mudança abrupta no sinal do tempo está espalhada por todo o eixo da frequência. Como consequência, a transformada de Fourier não pode ser adaptada a sinais não estacionários.

Para superar esta dificuldade, foi introduzido um parâmetro de "frequência local" na transformada de Fourier, de modo que a transformada de Fourier "local" veja o sinal através de uma janela sobre a qual o sinal é aproximadamente estacionário.

A STFT foi proposta primeiramente por Gabor (1946) para definir uma representação de tempo-frequência bidimensional. Fixando o sinal $x(t)$ em uma janela limitada $g(t)$, que é centrada em um determinado ponto no tempo τ , com isso a transformada de Fourier de curto termo é definida da seguinte forma:

$$STFT(\tau, f) = \int_{-\infty}^{+\infty} x(t).g^*(t - \tau).e^{-j\pi ft} dt \quad (2)$$

Em que $*$ denota o complexo conjugado.

Mesmo que muitas propriedades da transformada de Fourier sejam transferidas para a STFT, a análise do sinal depende fortemente da escolha da janela $g(t)$. Em outras palavras, o STFT pode ser visto como uma representação do conteúdo espectral do sinal em cada instante. De fato, para uma dada frequência f , a STFT filtra o sinal em cada instante, com um filtro de passa banda em função da janela modulada (BEYLKIN; COIFMAN; ROKHLIN, 1991). Uma vez escolhida a janela na STFT, a resolução tempo-frequência será fixa em todo o plano tempo-frequência, sendo que a mesma janela é utilizada em todas as frequências.

A partir da interpretação da STFT, algumas considerações sobre as resoluções da transformada de tempo e frequência podem ser feitas. De fato, as resoluções de tempo e frequência estão ligadas à energia da janela $g(t)$, portanto seu produto é limitado pelo princípio da incerteza de Heisenberg. A resolução no domínio do tempo diminui enquanto a resolução no domínio da frequência aumenta, sendo impossível aumentar a resolução em um sem diminuí-lo no outro.

2.4.2 Princípio da incerteza de Heisenberg

Para obter uma alta resolução dos dados da frequência de um sinal, é preciso observar o sinal no domínio do tempo por um longo intervalo. Se alguém observar o sinal no domínio do tempo apenas por um intervalo curto, então a transformada de Fourier (dados de frequência) do sinal é menos precisa. Quando é desejado altas resoluções no domínio da frequência, é necessário um número alto de amostras no domínio do tempo para análise. Isso equivale a dizer que o intervalo de tempo do sinal precisa ser mais longo.

No entanto, este não era um problema desde que a análise fosse restrita a um único domínio (ou seja, domínio de tempo ou domínio de frequência). Mas surge um problema quando se começa a analisar sinais em domínios compostos. A análise de domínio compostos consiste em estudar dados em dois ou mais domínios simultaneamente. A necessidade dessa análise surge quando se deseja extrair os componentes de frequência em diferentes instantes de tempo.

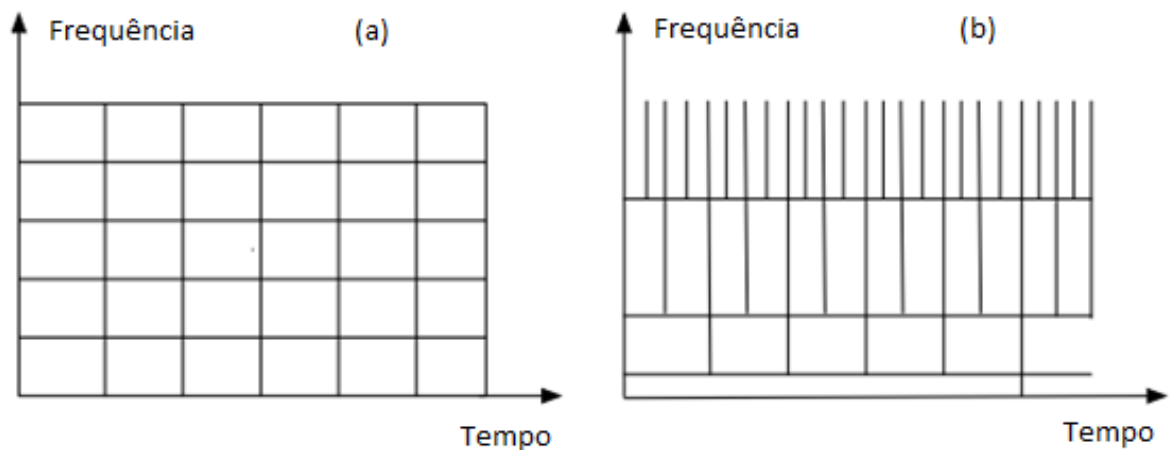
Para um mesmo número de pontos, um sinal com alta resolução no domínio do tempo precisa ser medido com uma alta frequência de amostragem. Para uma alta resolução no domínio da frequência, o tempo de leitura precisa ser o mais longo possível, para isso é necessário uma baixa frequência de amostragem.

Se analisarmos um sinal em tempo e frequência juntos, quanto mais ampliarmos a resolução no tempo, menor fica a qualidade das informações no domínio da frequência e vice-versa (WOLFF, 2014).

Por isso, se quisermos ampliar a resolução no tempo e na frequência simultaneamente, chegamos a um limite fundamental que é um limite imposto pela natureza. Este limite para a mais alta resolução que se pode alcançar no domínio composto de tempo-frequência é o princípio da incerteza de Heisenberg.

Para amenizar este problema em processamento de sinais, foi pensado em um filtro em que a resolução no tempo aumenta com a frequência, com os filtros regularmente espaçados em uma escala logarítmica como demonstrado na Figura 10. Desta forma, a desigualdade de Heisenberg ainda estaria satisfeita, com a resolução no tempo boa em altas frequências e a resolução da frequência boa em baixas frequências. Este conceito foi a base para o desenvolvimento da transformada de wavelet.

Figura 10 - Comparativo entre (a) STFT e (b) wavelet



Fonte: Próprio autor

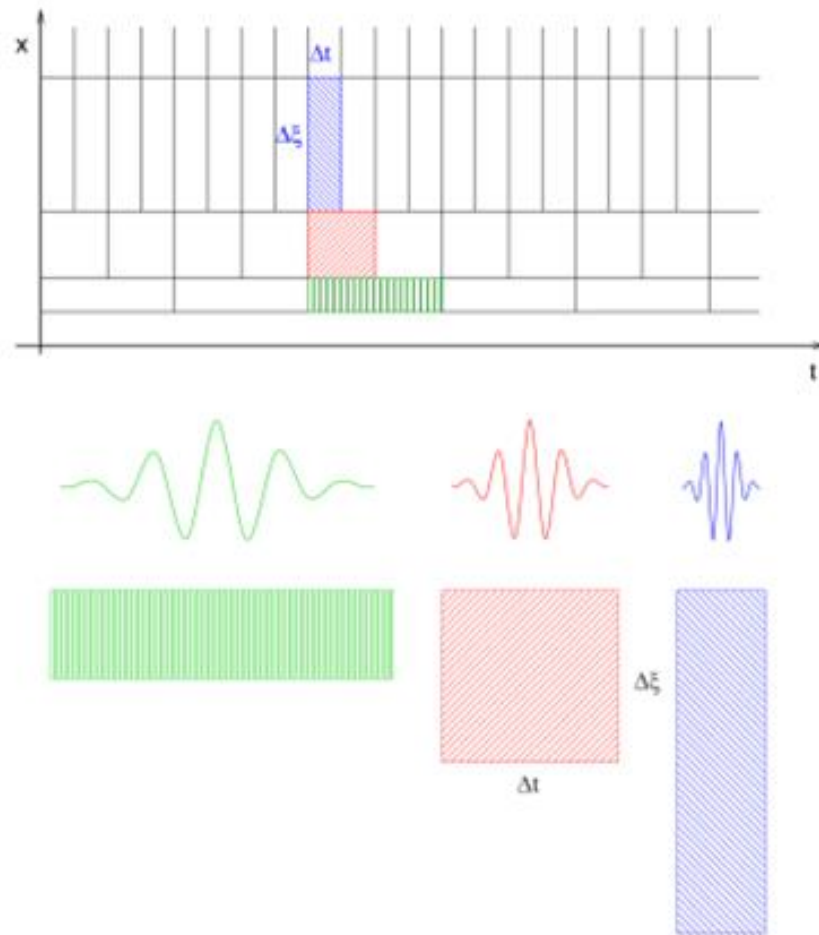
2.4.3 A transformada de wavelet

A análise espectral ou FFT é extremamente útil para sinais estacionários cujas propriedades mudam com o tempo. Porém, a análise de Fourier na transformada para o domínio da frequência, perde informação no tempo, e a STFT possui limitações de resolução devido as suas janelas fixas.

Para solucionar estes problemas, foi desenvolvida a partir da década de 1980 a transformada de wavelet. Essa técnica é eficiente para a análise local de sinais não estacionários e rápidos. A transformada wavelet é um mapeamento do sinal que não é apenas local em tempo, mas também em frequência.

A transformada wavelet fornece análise multi-resolução com janelas dilatadas. A análise das frequências altas é feita usando janelas estreitas, enquanto que a análise das frequências baixas é feita usando janelas largas. Uma boa forma de demonstrar a transformada de wavelet é observando a Figura 11, sendo Δt a variação no tempo e $\Delta \xi$ a variação na frequência.

Figura 11 - Plano tempo–frequência e as representações das caixas para a Transformada wavelet.



Fonte: Domingues et al. (2016).

2.4.4 A transformada continua de wavelet

A análise por wavelet permite adequar a janela de acordo com a leitura desejada da frequência. Sendo o tamanho dessas janelas inversamente relacionadas com as frequências, portanto, uma janela menor implica na leitura de uma alta frequência e vice-versa.

A wavelet por usar janelas variáveis, a torna mais adequada para análises de sinal não estacionárias. A função base para a transformada wavelet é dada em termos do parâmetro de translação, b , e do parâmetro de escala, a , com a seguinte wavelet mãe:

$$\psi_{a,b}(t) = \frac{1}{\sqrt{a}} \psi\left(\frac{t-b}{a}\right) \quad (3)$$

A transformada wavelet, $\psi(a, b)$ de um sinal de tempo $x(t)$ é definida como uma integral da convolução de $x(t)$ com versões escaladas e transladas da função wavelet mãe $\psi(t)$:

$$W(a,b) = \frac{1}{\sqrt{a}} \cdot \int_{-\infty}^{+\infty} x(t) * \psi\left(\frac{t-b}{a}\right) \cdot dt \quad (4)$$

Quando o sinal $x(t)$ é periódico, a equação (4) torna-se uma convolução circular, e a transformada wavelet contínua é melhor calculada no domínio da frequência e assumir a seguinte forma alternativa:

$$W(a,b) = \sqrt{a} \cdot \mathcal{F}^{-1} \cdot [X(f) * \Psi(af)] \quad (5)$$

Com $X(f)$ e $\Psi(f)$ sendo as transformadas de Fourier do sinal $x(t)$ e a wavelet com escala alterada $\psi(t)$, respectivamente e o operador $\mathcal{F}^{-1}$ indica a transformada inversa de Fourier.

As equações (4) e (5) indicam que a análise wavelet é uma análise tempo-frequência, existe uma equação de reconstrução universal para qualquer tipo de wavelet:

$$x(t) = C_{\psi}^{-1} \iint W(a,b) \psi_{a,b}(t) \frac{da}{a^2} db \quad (6)$$

Na qual:

$$C_{\psi} = \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{|\Psi(f)|^2}{|f|} df < \infty \quad (7)$$

$$\Psi(f) = \int \psi(t) \exp(-2\pi i f t) dt \quad (8)$$

A wavelet de Morlet é derivada de uma função Gaussiana, então estas wavelets possuem janela Gaussiana em domínio de frequência. No domínio do tempo, a wavelet Morlet pode ser escrita como (9):

$$\psi(t) = \frac{1}{\sqrt{\pi f_b}} e^{j2\pi f_c t} e^{(-t^2/f_b)} \quad (9)$$

E f_b é um parâmetro relacionado à largura da banda (variância) e controla a resolução tempo-frequência da wavelet Morlet e f_c é a frequência central. Ao aplicar a transformada de Fourier, a seguinte equação é derivada:

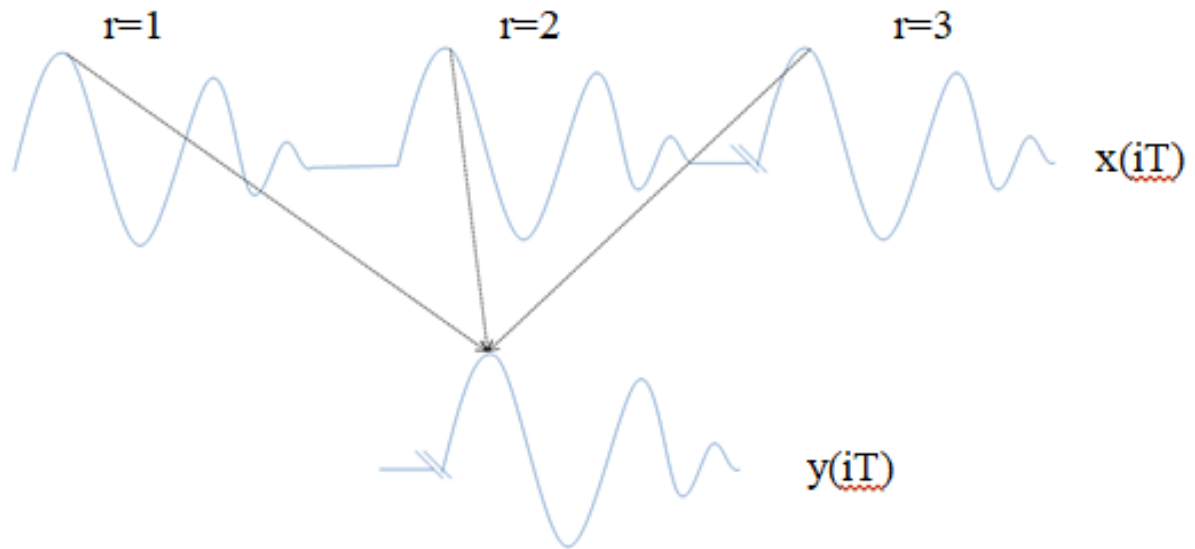
$$\Psi(f) = \Psi^*(f) = e^{-\pi^2 f_b (f - f_c)^2} \quad (10)$$

2.4.5 Média temporal síncrona

A técnica da média temporal síncrona (TSA) é muito utilizada na detecção de falhas de engrenagens (SILVA, 2015; SILVA, 2001). É útil na filtragem de ruídos assíncronos presentes nos sinais de vibrações.

A TSA utiliza a informação de cada revolução coletada por um tacômetro, com isso é possível separar o sinal de vibração por revolução. Conhecendo o sinal referente a cada volta da máquina, a TSA faz um agrupamento dos dados que estão exatamente nas mesmas posições angulares. Por fim, uma média entre todos os dados da mesma posição angular é feita, resultando no sinal referente a uma volta sem os ruídos assíncronos, uma média temporal síncrona, como observado na Figura 12.

Figura 12 - Esquema geral da obtenção de uma média temporal síncrona



Fonte: Silva (2015).

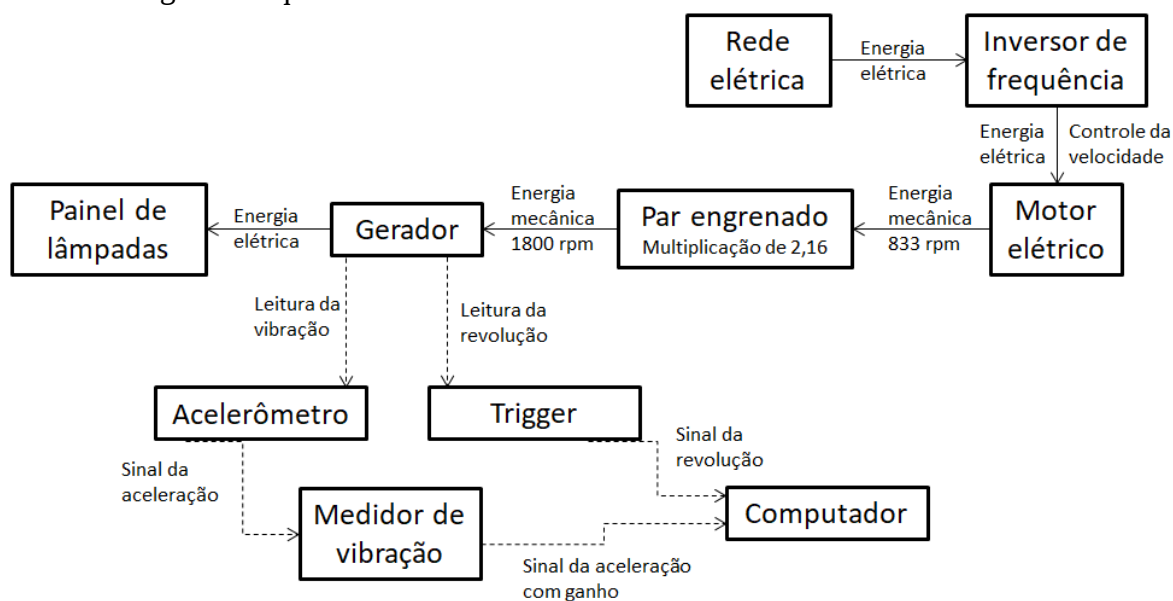
Quanto maior a duração da medição, ao longo de muitas revoluções da engrenagem, melhor a qualidade da TSA. Isso reduz os componentes assíncronos da vibração e o ruído médio a zero, porque o valor esperado da medida em que o número de revoluções médias é muito grande aproxima-se de zero. O método é amplamente aplicado como um passo de pré-processamento em trabalhos de detecção de falhas em engrenagens.

Para o monitoramento das condições de um par engrenado foi desenvolvida uma bancada que estará detalhada no próximo capítulo.

3 BANCADA EXPERIMENTAL

Para a realização dos experimentos foi construída uma bancada experimental, seu diagrama esquemático está na Figura 13 e uma fotografia da bancada na Figura 14. Nas seções seguintes os componentes da bancada serão descritos.

Figura 13 - Diagrama esquemático da bancada



Fonte: Próprio autor

Figura 14 - Bancada utilizada nos experimentos



Fonte: Próprio autor

3.1 MESA INERCIAL

A mesa inercial é um suporte não entrará em ressonância com as excitações provenientes dos equipamentos fixados sobre sua superfície. Isso é importante para não afetar o sistema e para uma melhor leitura dos dados de vibrações, diminuindo os ruídos na leitura. A mesa inercial possui uma massa muito maior em relação aos seus equipamentos, tendo uma frequência natural mais baixa, dificultando a ocorrência de ressonância.

Além disso, a mesa inercial possui um sistema nivelador e anti-vibração em seus pés, formado por um amortecedor com objetivo de fazer o isolamento das vibrações da bancada.

3.2 INVERSOR DE FREQUÊNCIA

Um inversor de frequência é um dispositivo eletrônico de precisão projetado especificamente para controlar a velocidade de motores de indução de corrente alternada, sem afetar o consumo elétrico, torque, impedância e fluxo magnético do motor. Possui uma interface para o operador ler e dar os comandos de controle. O inversor de frequência utilizado na bancada é um Weg modelo CFW-08 e está na Figura 15.

Figura 15 - Em destaque o inversor de frequência



Fonte: Próprio autor

A velocidade de qualquer motor de corrente alternada é inversamente proporcional ao número de polos do estator e diretamente proporcional à frequência da tensão de alimentação. Portanto, para alterar a velocidade desse motor é preciso alterar a sua frequência de alimentação ou o número de polos do estator. Como o número de polos para cada motor é fixo, não sendo possível alterá-lo a única opção restante é trabalhar com a frequência. Ao variar a frequência da tensão de alimentação a velocidade do motor pode ser alterada.

A velocidade do motor é variada alterando a magnitude da tensão de entrada, bem como a frequência a uma relação constante, com isso o motor é capaz de manter um torque constante mesmo em velocidades mais baixas.

3.3 MOTOR DE INDUÇÃO TRIFÁSICO

Um motor elétrico converte energia elétrica em energia mecânica, esses motores operam em corrente alternada e são classificados como motores síncronos, monofásicos e trifásicos. De todos os tipos, os motores de indução trifásicos são os mais utilizados industrialmente. Eles são motores projetados para funcionar alimentado por três fases de corrente alternada (CA). A corrente alternada muda do sentido negativo para positivo e volta muitas vezes por segundo, cada uma das ondas em fase diferente das outras.

O motor de indução trifásico da bancada é um Weg modelo 100L, possui uma potência de 5 HP (3.7 kW) na sua velocidade nominal de 1715 RPM. Na bancada este motor é controlado pelo inversor de frequência e por meio do acoplamento está ligado ao redutor/multiplicador.

3.4 ACOPLAMENTO

Para minimizar a transferência de vibrações e suportar leves desalinhamentos paralelos e angulares, foram utilizados dois acoplamentos de grade elásticas, da marca Falk modelo 4F como demonstrado na Figura 16. Os dois acoplamentos conectam os dois eixos do redutor/multiplicador com os eixos do motor e do gerador.

Figura 16 - Acoplamento de grade elástica



Fonte: Falk (2018).

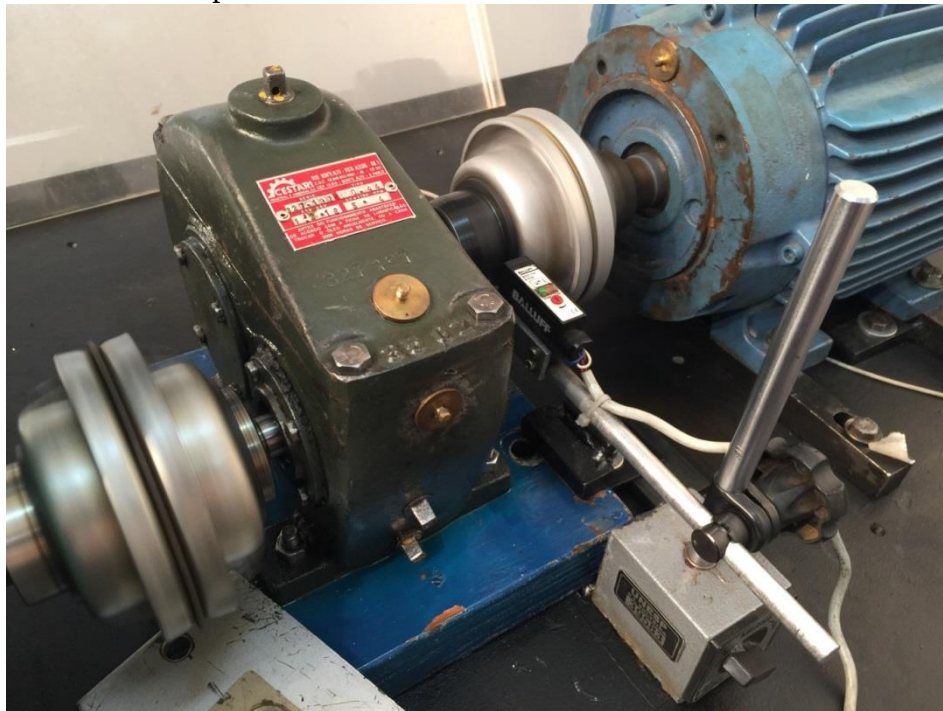
3.5 REDUTOR/MULTIPLICADOR

Nesta bancada está presente a carcaça e os eixos de um antigo redutor, o par engrenado interno pode ser alterado de acordo com a necessidade do experimento. Sendo possível alterar o tipo de engrenagem, a sua relação de transmissão e até se funcionará como redutor ou multiplicador. Neste trabalho o par engrenado é utilizado como multiplicador.

O multiplicador é um equipamento de transmissão de energia mecânica, seu papel é aumentar a velocidade da rotação proveniente do motor e como consequência ocorre a diminuição do torque.

Um exemplo comum do par engrenado na forma de multiplicador é em automóveis, embora dirigindo na cidade ou em serra o desejo mais comum é de mais torque e menos velocidade, nas estradas uma relação de multiplicação é mais desejada, ganhando velocidade mesmo perdendo torque. Um exemplo de redutor/multiplicador está na Figura 17.

Figura 17 - Redutor/multiplicador



Fonte: Próprio autor

O redutor/multiplicador utilizado nesse trabalho é da marca Cestari, modelo HS 0.44 e feito de ferro fundido.

3.6 PAR ENGRENADO

As engrenagens foram projetadas com dentes retos, módulo 1, aço 1045 e com dureza Brinell de 220 HB. A coroa com 95 dentes e o pinhão com 44, com isso o fator de multiplicação foi de 2,16 e demonstrado na Figura 18.

Figura 18 - Par engrenado

Fonte: Próprio autor

Para ter uma referência da vida útil das engrenagens, o projeto foi feito e a largura calculada para que o par engrenado tenha uma vida útil de 1 mês ou 720 horas, resultando em $3,60 \cdot 10^7$ ciclos para a coroa e $7,77 \cdot 10^7$ ciclos para o pinhão.

Após o projeto a largura foi definida em 11 mm. O projeto do par engrenado está no anexo 1 e seus fatores de segurança na Tabela 2.

Tabela 2 - Fatores de segurança das engrenagens

	Fatores de Segurança do pinhão	Fator de Segurança da coroa
Fator de Flexão	0,96	0,98
Fator de Contato	3,49	3,62

Fonte: Próprio autor.

3.7 GERADOR

Os geradores são equipamentos úteis que fornecem energia elétrica, estando disponíveis em diferentes configurações e utilizados em diversas aplicações. Nessa seção será comentado sobre seu funcionamento e seus principais componentes.

O gerador elétrico é um dispositivo que converte energia mecânica obtida de uma fonte externa em energia elétrica como saída. É importante entender que um gerador na

verdade não cria energia elétrica. Em vez disso, ele usa a energia mecânica fornecida para forçar o movimento de cargas elétricas presentes no fio de seus enrolamentos através de um circuito elétrico externo. Este fluxo de cargas elétricas constitui a corrente elétrica de saída fornecida pelo gerador.

O gerador moderno funciona com o princípio da indução eletromagnética descoberto por Michael Faraday em 1831-32. Faraday descobriu que o fluxo de cargas elétricas poderia ser induzido movendo um condutor elétrico, como um fio que contém cargas elétricas, em um campo magnético. Este movimento cria uma diferença de tensão entre as duas extremidades do fio ou condutor elétrico, o que, por sua vez, faz com que as cargas elétricas fluam, gerando corrente elétrica.

Este equipamento contém um conjunto de peças estacionárias e móveis embutidas em uma carcaça metálica. Os componentes trabalham juntos para causar o movimento relativo entre os campos magnético e elétrico, o que, por sua vez, gera eletricidade.

O componente estacionário é o estator ele contém um conjunto de condutores elétricos enrolados em bobinas sobre um núcleo de ferro. O componente móvel que produz um campo magnético rotativo é o rotor, esse campo pode ser produzido de três maneiras.

1. Por indução - Estes são conhecidos como alternadores sem escova e geralmente são usados em grandes geradores.
2. Por ímãs permanentes - Isso é comum em pequenos alternadores.
3. Usando um excitador - Um excitador é uma pequena fonte de corrente contínua que energiza o rotor através de um conjunto de anéis deslizantes e escovas condutoras.

O rotor gera um campo magnético em movimento ao redor do estator, o que induz uma diferença de tensão entre os enrolamentos do estator. Isso produz a saída de corrente alternada (CA) do gerador.

Nesta bancada o gerador encontra-se na saída do redutor/multiplicador, fornecendo energia para o painel de lâmpadas. Ele é fabricado pela Kohlbach com capacidade de 4kVA e rotação nominal de 1800 RPM.

3.7.1 Excitador do gerador

Devido ao estado do gerador utilizado na bancada, o rotor estava desmagnetizando, não sendo possível dar a partida do gerador sem uma bateria externa.

Para solucionar este problema foi desenvolvido um excitador para magnetizar o rotor. O excitador do gerador consiste num transformador de 220 V corrente alternada ligado na rede elétrica do laboratório para 12 V corrente contínua (CC). Para partida do gerador, bastava ligar os terminais dessa fonte nos polos do rotor posicionados na parte de trás do gerador. O excitador desenvolvido para a bancada está na Figura 19.

Figura 19 - Excitador do gerador



Fonte: Próprio autor

3.8 PAINEL DE LÂMPADAS

O painel de lâmpadas da Figura 20 é um dos componentes principais da bancada, sendo responsável por gerar carga no gerador, controlar a potência consumida na bancada e fazer uma partida sem sobrecarregar o gerador.

Figura 20 - Painel de lâmpadas

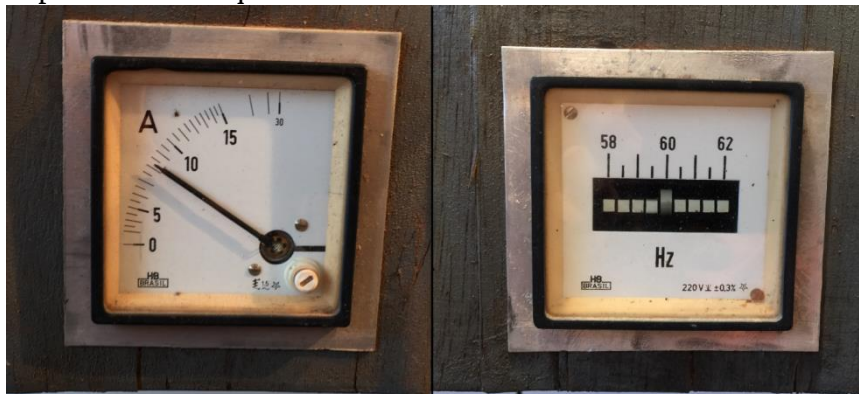


Fonte: Próprio autor

Ele é composto por 25 soquetes de lâmpadas alinhados em cinco fileiras de cinco soquetes, dessa forma é possível ligar as lâmpadas parcialmente, evitando a sobrecarga do gerador. Para o correto funcionamento das lâmpadas e do gerador, o painel possui um frequencímetro. Com esse instrumento a velocidade do motor deve ser ajustada para que o frequencímetro indique a frequência de rede, no valor de 60 Hz.

O painel de lâmpadas da Figura 21 consome a energia gerada pelo gerador, essa quantidade de energia consumida é facilmente alterada adicionando mais lâmpadas no painel. A potência exata de consumo da bancada é verificada com a ajuda de um multímetro e pelo amperímetro presente no painel.

Figura 21 - Amperímetro e frequencímetro

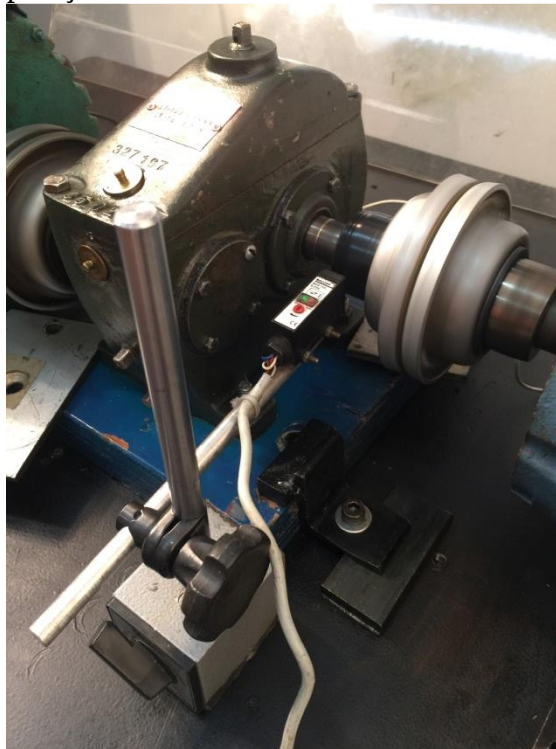


Fonte: Próprio autor

3.9 TRIGGER

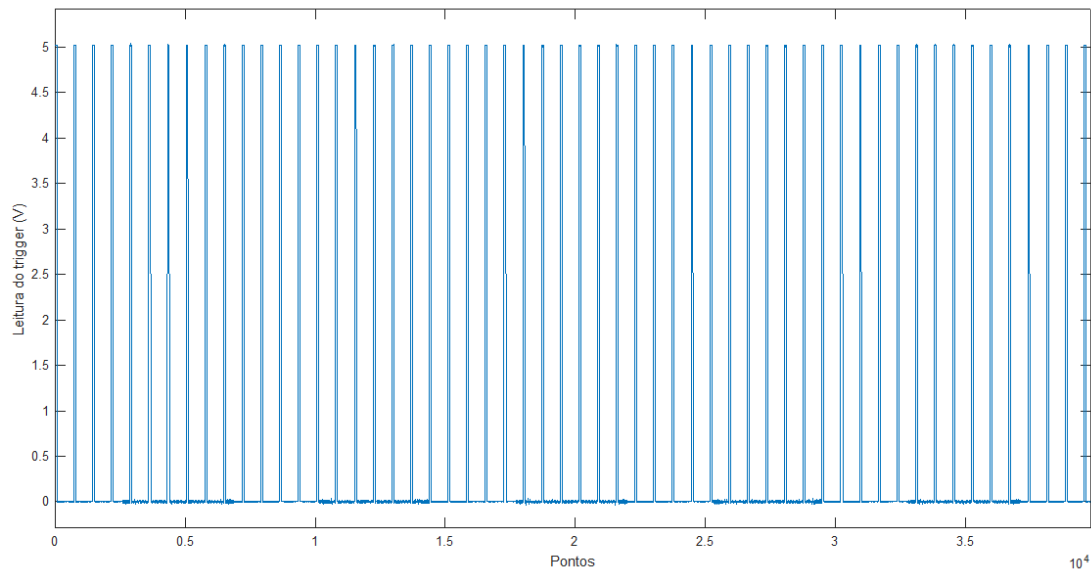
O trigger ou tacômetro é um instrumento usado para medir a velocidade de rotação de eixos. O trigger utilizado no trabalho pode ser visto na Figura 22.

Figura 22 - Trigger em operação



Fonte: Próprio autor

Para seu funcionamento é necessário adicionar uma fita refletiva branca no eixo que a leitura é desejada. Ele funciona lendo 0 V para cor escura e 5 V para cor clara, dessa forma a leitura em cada revolução é feita, gerando pulsos de 5 V no início de cada rotação do eixo. Sabendo o tempo entre cada pico de 5 V, é obtido o período de cada revolução e consequentemente a frequência de rotação. Na Figura 23 o gráfico do trigger no tempo com seus picos referentes ao início de cada volta.

Figura 23 - Sinal do trigger

Fonte: Próprio autor

Na figura acima, o tempo entre o início de cada bloco é o período de cada revolução da engrenagem, com isso é obtida a frequência e a velocidade média de cada revolução.

3.10 ACELERÔMETRO

É utilizado para converter um movimento mecânico, neste caso a vibração a ser analisada, em um sinal elétrico. Na análise de vibrações são usados transdutores de deslocamento, de velocidade ou acelerômetros. Porém, o acelerômetro, é o mais usado pela simplicidade e baixo custo e está demonstrado na Figura 24.

Figura 24 - Acelerômetro

Fonte: Próprio autor

Utilizando um princípio piezelétrico, o acelerômetro produz uma voltagem elétrica proporcional à velocidade, movimento ou aceleração da vibração. Constituído de um cristal piezelétrico e uma massa normalizada em uma estrutura metálica. A massa aplica uma força no cristal, que produz uma carga elétrica proporcional à aceleração. A carga é medida em picocoulombs por grama (pC/g). Alguns sensores têm um amplificador de carga interno, outros precisam de um amplificador externo. A carga é amplificada e convertida em uma carga proporcional em termos de milivolts por grama.

A carcaça do redutor/multiplicador possui vários pontos próprio para fixação do acelerômetro, neste trabalho foi utilizado duas unidades da marca MMF modelo KS 50, posicionados radialmente a cada engrenagem com sensibilidade de $28 \pm 20 \text{ \% pC/g}$.

3.11 MEDIDOR DE VIBRAÇÃO

O medidor de vibração utilizado neste trabalho é o Robotron 00 042, ele é um medidor de vibração analógico portátil alimentado por duas baterias de 9V. Trabalha em conjunto com o acelerômetro piezoelétrico para determinar a aceleração da vibração ou a velocidade da vibração dos sistemas mecânicos. Este medidor de vibração demonstrado na Figura 25 atende os requisitos para a medição padronizada dos níveis de vibração de acordo com as normas internacionais, ISO R 2373, ISO R 2372, DIN 45666 e DIN 45665.

Figura 25 - Robotron 00 042



Fonte: Próprio autor.

O seu alto fator de transmissão de 50 mV/g permite o monitoramento de máquinas utilizando seu filtro incorporado e o controle das vibrações de equipamentos com alta velocidade.

O medidor de vibração Robotron 00 042 possui uma saída de sinal que pode ser usada como corrente alternada ou corrente contínua, para poder conectar osciloscópios ou outros dispositivos de gravação.

Na Tabela 3 está apresentada mais informações do equipamento.:

Tabela 3 - Informações do medidor de vibração

Faixa de operação	0 Hz a 30000 Hz
Tensão de operação	18 volts
Modelo	00 042, FNR.:21182
Fabricante	VEB ROBOTRON

Fonte: Próprio autor

3.12 COMPUTADOR E SOFTWARE DE AQUISIÇÃO

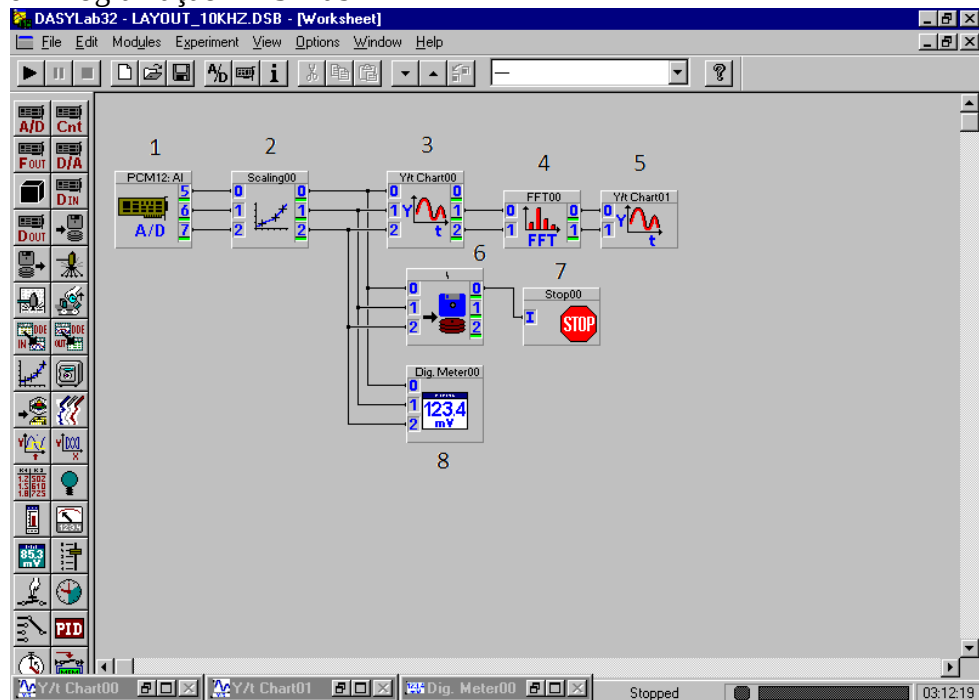
O computador possui uma placa PCMCIA que faz a conversão do sinal analógico recebido do medidor de vibração, para o para sinal digital que irá ser utilizado pelo software de aquisição. O fabricante do computador utilizado neste trabalho é a Toshiba, modelo Satellite 2180 CDT.

Instalado no computador está o software DASYlab, ele faz o processamento do sinal, oferece ferramentas de análise, controle e gráficos em tempo real com interface gráfica do usuário (GUI).

3.12.1 Lógica do dasylab

A programação do DASYlab é feita por blocos e pode ser vista na Figura 26:

Figura 26 - Programação DASYlab



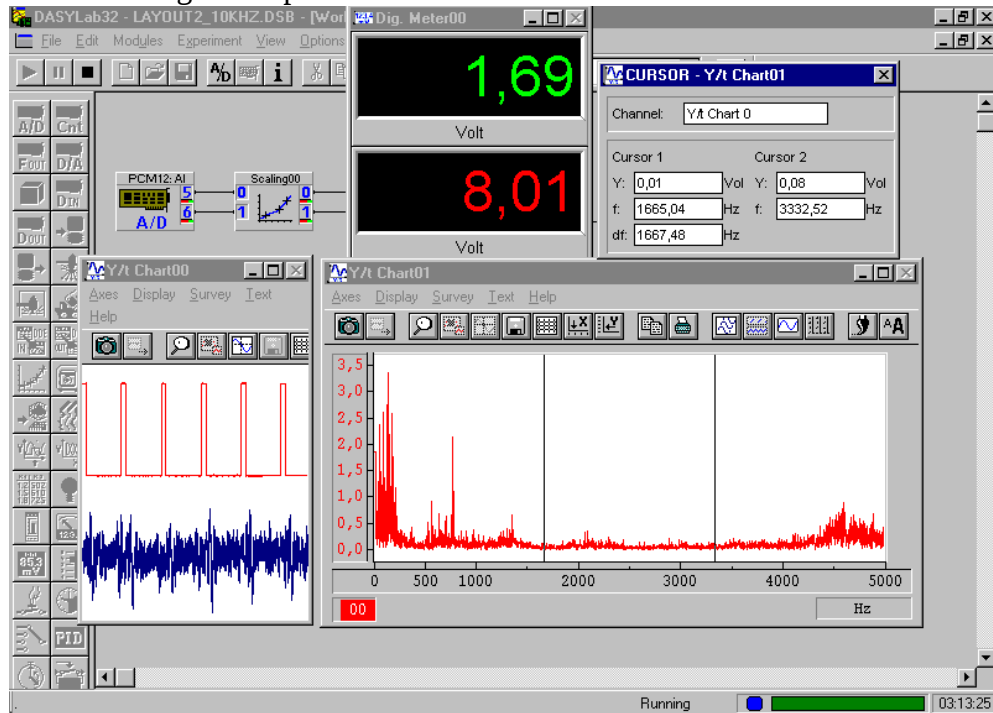
Fonte: Próprio autor.

Abaixo a programação comentada utilizada neste trabalho:

1. No primeiro bloco é feita a aquisição do sinal a partir da placa PCMCIA, nela são configuradas as portas 5, 6 e 7 como de entrada do sinal. No canal 5 está o sinal do trigger e no 6 e 7 dos dois acelerômetros.
2. Neste bloco é configurada as escalas dos 3 sinais para uma leitura correta, para o trigger nada será alterado e para os sinais dos acelerômetros, será alterado conforme o ganho dado no medidor de vibração.
3. O bloco 3 produz um gráfico no tempo, e será feito para os 3 canais.
4. Neste bloco é feita a FFT, transformada rápida de Fourier, para os canais dos dois acelerômetros.
5. O quinto bloco irá plotar os gráficos no espectro da frequência dos dados gerados no bloco 4.
6. No bloco 6 é feita as configurações de armazenamento dos dados.
7. Este bloco é de controle, nele é configurado quantos blocos serão lidos, ao atingir esta quantidade ele para o armazenamento dos dados.
8. Este bloco mostra na tela os valores RMS dos sinais.

Na Figura 27 é possível ver a aquisição dos sinais, o gráfico no tempo do trigger e de um acelerômetro, o espectro na frequência após a FFT de um acelerômetro e os valores em RMS dos sinais.

Figura 27 - Gráficos gerados pelo software



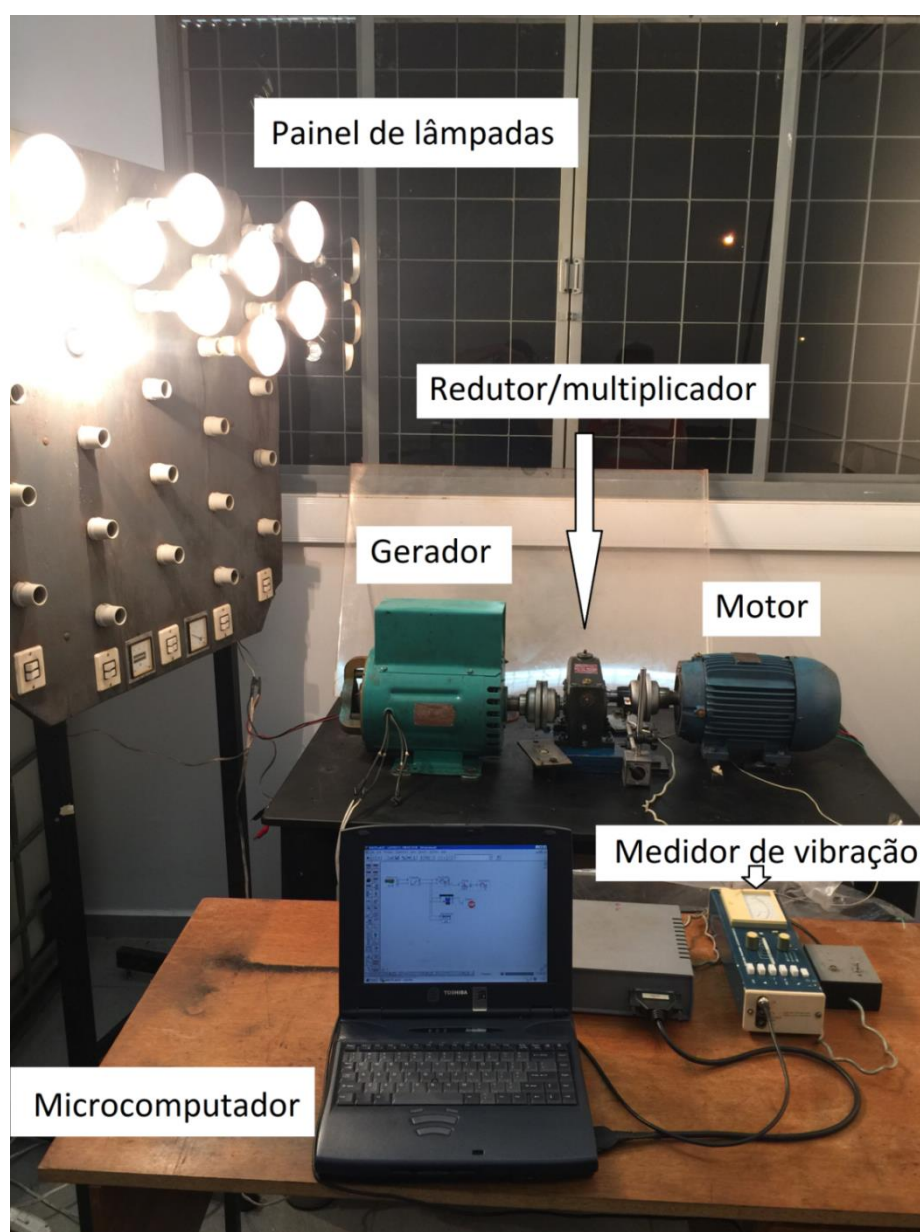
Fonte: Próprio autor.

4 MATERIAIS E MÉTODOS EXPERIMENTAIS

A bancada experimental onde os experimentos foram realizados está localizada no Instituto de Pesquisa em Bioenergia (IPBEN) da Universidade Estadual Paulista, campus de Ilha Solteira.

Como visto mais detalhadamente no capítulo anterior, a Figura 28 mostra o layout da bancada com seus instrumentos e a Tabela 4 os seus componentes.

Figura 28 - Bancada com seus componentes



Fonte: Próprio autor

Tabela 4 - Especificação dos componentes da bancada

Componente	Fabricante	Modelo
Mesa inercial	-	-
Inversor de frequência	Weg	CFW-08
Motor elétrico	Weg	100L
Acoplamento	Falk	4F
Redutor/multiplicador	Cestari	HS 0.44
Gerador	Kohlbach	4kVA
Excitador do gerador	Próprio autor	-
Painel de lâmpadas	-	-
Medidor de vibração	Robotron	00 042
Acelerômetro	MMF	KS 50
Trigger	Sensor Balluff	BOS-15K
Microcomputador	Toshiba	Satellite 2180
Software de aquisição	IOTechInc	DASyLab 4.01.11

Fonte: Próprio autor

O funcionamento da bancada consiste inicialmente pelo inversor de frequência que controla a rotação do motor elétrico trifásico com potência máxima de 3700 W. Este motor está conectado ao redutor/multiplicador por meio de acoplamentos de grade elástica, com o par engrenado na razão de 2,16 na forma de multiplicador.

Na saída do multiplicador está acoplado um gerador elétrico com capacidade 4 kVA, que opera em sua rotação nominal de 1800 RPM, este gerador alimenta um painel de lâmpadas totalizando uma potência de 1600 W.

Como o gerador e as lâmpadas precisam operar na frequência de 60 Hz, a velocidade do motor foi ajustada para que o frequencímetro do painel indica-se a leitura de 60 Hz. Pequenas variações de velocidade ocorriam devido ao aquecimento das bobinas, mas ao se estabilizar a rotação do motor era de 840 rpm e consequentemente do gerador de 1800 rpm.

O acelerômetro foi montado com o eixo de sensibilidade na direção radial (acelerômetro "radial"). Além disso, as revoluções do eixo da coroa foram medidas por meio de um trigger e seu sinal coletado junto do acelerômetro, com isso foi possível relacionar o sinal de vibração com cada dente da engrenagem.

Foram realizados dois tipos de experimento na bancada, variando as condições de operação:

- O primeiro é o acompanhamento dos danos de uma engrenagem nova até atingir sua vida útil.

- No segundo foi realizado um entalhe na raiz de um dente simulando uma trinca por flexão.

4.1 CONDIÇÕES DO EXPERIMENTO

Para não haver interferências externas no experimento o ambiente foi controlado. Foi realizado em local fechado, evitando corrente de vento ou umidade que poderiam queimar lâmpadas do painel, ocasionando em flutuações de potência. A temperatura ambiente foi controlada por meio de um ar condicionado mantido em 18°C. Uma câmera térmica da marca Fluke foi utilizada para verificar todos os componentes da bancada e se estavam trabalhando na temperatura indicada por seus fabricantes, como pode-se ver na Figura 29.

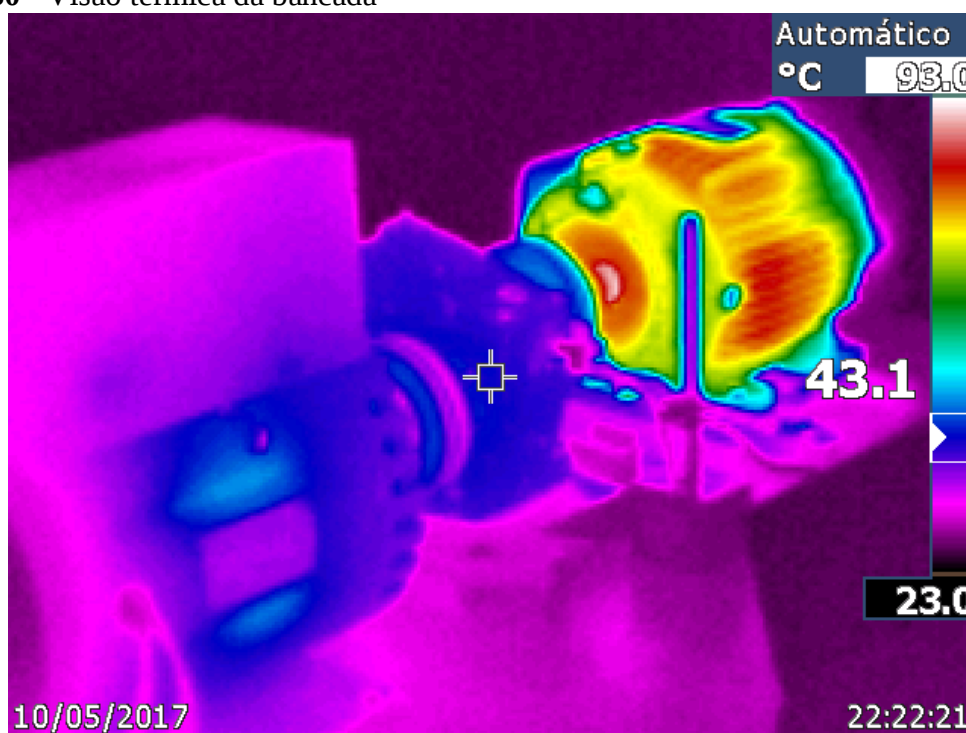
Figura 29 - Monitoramento das temperaturas



Fonte: Próprio autor

As temperaturas críticas na bancada foram às localizadas no motor de indução trifásico, segundo seu fabricante para motores de classe B a temperatura máxima que o material de isolamento das bobinas suporta é de 130°C. Por segurança um ventilador auxiliar foi montado atrás do motor para evitar o superaquecimento. Na Figura 30 está a visão térmica dos componentes da bancada, com o seu centro no redutor na temperatura de 43.1 °C e a temperatura máxima no eixo do motor com 93 °C.

Figura 30 - Visão térmica da bancada



Fonte: Próprio autor

4.2 ANÁLISE DE LUBRIFICANTES

Para análise das partículas de desgaste, amostras do óleo foram coletadas periodicamente nos experimentos. A cada 120 horas uma amostra era coletada por uma seringa industrial de 25 ml, armazenada em tubetes feitos de PET e numeradas. Após isso a mesma quantidade de óleo removida do redutor/multiplicador era adicionada novamente com óleo novo. Na Figura 31 está uma amostra de óleo armazenada no tubete.

Figura 31 - Tubete com o óleo coletado



Fonte: Próprio autor

Com objetivo de quantificar e identificar as partículas presentes no óleo lubrificante, as amostras coletadas nos dois experimentos foram preparadas e analisadas pelos equipamentos comentados nas próximas seções.

4.2.1 Ferrografia

A ferrografia é uma análise do óleo que estuda o desgaste das partículas de componentes mecânicos, através da análise das partículas presentes no óleo lubrificante. Ela pode ser utilizada para prever e diagnosticar defeitos ocorridos nas máquinas. Desde o advento da ferrografia na década de 1970, esta técnica tem sido usada em muitas configurações industriais como uma forma de manutenção preditiva. A seguir os equipamento para utilização desta técnica serão comentados.

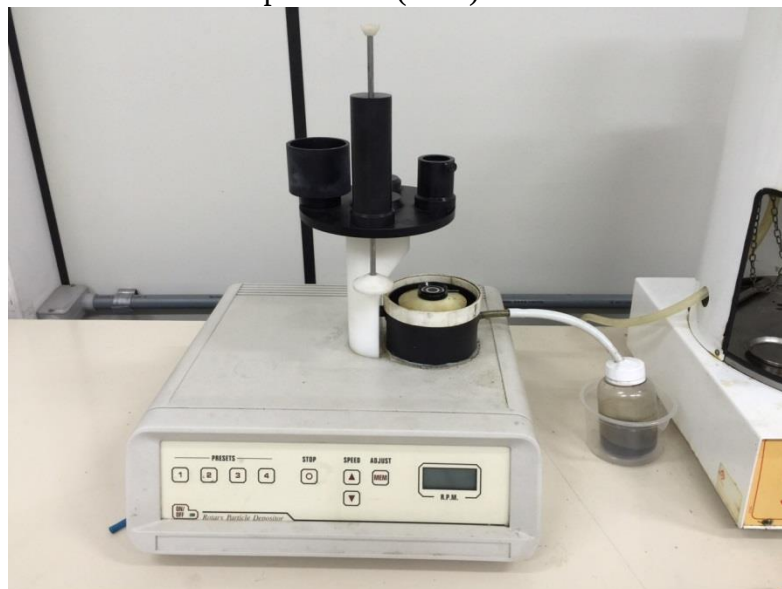
4.2.1.1 *Depositor rotativo de partículas - RPD*

O desgaste por fadiga inicia com pequenas partículas na ordem de 10 a 15 μm de diâmetro. Com isso, quanto antes essas partículas forem identificadas e quantificadas, maior será a oportunidade de responder a uma possível falha catastrófica.

Para separação de acordo com o tamanho das partículas magnéticas o depositor rotativo de partículas, mais conhecido como RPD (do inglês, Rotary Particle Depositor), é o

equipamento indicado e pode ser visto na Figura 32. Neste trabalho foi utilizado um depositador rotativo de partículas da marca Kittiwake com 4 velocidades pré fixadas.

Figura 32 - Depositador rotativo de partículas (RPD)



Fonte: Próprio autor

Nele um volume da amostra de óleo foi aplicado por uma pipeta numa lâmina de vidro, que está fixa no equipamento por meio de ventosas e acima de um conjunto de ímãs rotativos. As partículas de desgaste foram depositadas radialmente nos três anéis concêntricos pelos efeitos combinados das forças rotacionais, magnéticas e gravitacionais. Com isso ocorre a separação das partículas de desgaste em três níveis, de acordo com seu tamanho, as maiores na ordem de 50 a 200 μm se depositam no anel interno, as médias de 10 a 50 μm no anel do meio e as pequenas com até 10 μm no anel externo. Com a amostra preparada e as partículas divididas de acordo com sua dimensão, um microscópio ótico foi utilizado e as partículas analisadas.

O equipamento pertence ao Laboratório de Tribologia e suas especificações estão na Tabela 5.

Tabela 5 - Especificações do RPD pelo fabricante

Fabricante	Kittiwake Developments Ltda
Tensão nominal	110 / 240 V
Frequência	47 a 63 Hz
Potência	75 Watts
Dimensões	360 x 360 x 450 mm
Peso	5,5 Kg
Velocidade de rotação	30 a 200 rpm (4 padrões de velocidade)

Fonte: Kittiwake Developments (2012).

4.2.1.2 *Confecção de amostras para o RPD*

Para a confecção de amostras foram utilizadas lâminas de vidro, pipeta, ponteira de pipeta, tetracloroetileno para limpeza do óleo e um béquer com a amostra como na Figura 33 a seguir.

Figura 33 - Materiais utilizados na preparação das amostras

Fonte: Próprio autor

Para diminuir a viscosidade e obter melhores condições de trabalho, um forno do tipo Mufla, modelo EGD 7000 foi utilizado. A amostra do óleo foi adicionada a um béquer, e este aquecido até a temperatura indicada pelo fabricante de 60° C. Na Figura 34 temos a imagem do forno utilizado neste trabalho.

Figura 34 - Forno mufla

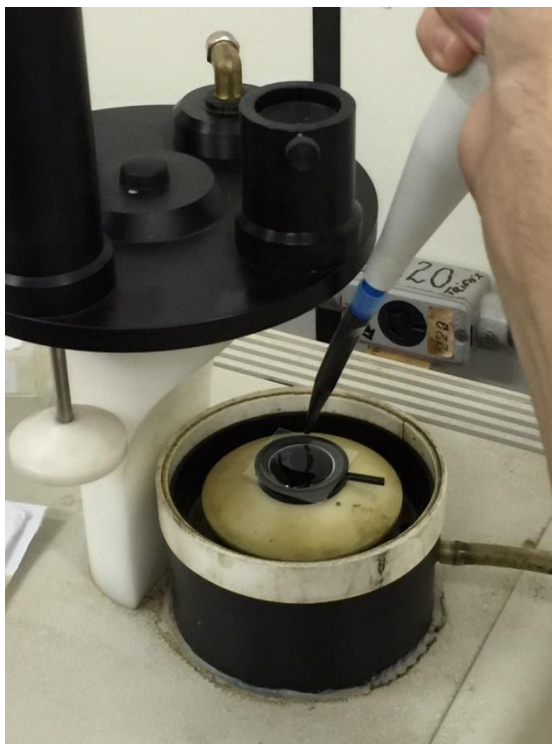


Fonte: Próprio autor

Ao atingir a temperatura necessária para o início do experimento, o béquer foi retirado do forno e seu conteúdo misturado com um bastão de vidro, para homogeneização da amostra e das partículas. Este procedimento foi realizado para que as partículas entrassem em suspensão no meio líquido e ficassem bem distribuídas.

Para início do experimento, uma lâmina de vidro foi adicionada ao depositador rotativo de partículas, fixando-a na ventosa. Primeiramente o RPD é ligado, e colocado na sua primeira velocidade de rotação, de 70 rpm. A seguir, utilizando uma pipeta retira-se o óleo do béquer e deposita-se 1 ml na lâmina de vidro. Esse processo é delicado, sendo necessária uma cautelosa adição do óleo no vidro, como mostrado na Figura 35.

Figura 35 - Óleo lubrificante colocado sobre a lâmina de vidro girando à 70 rpm

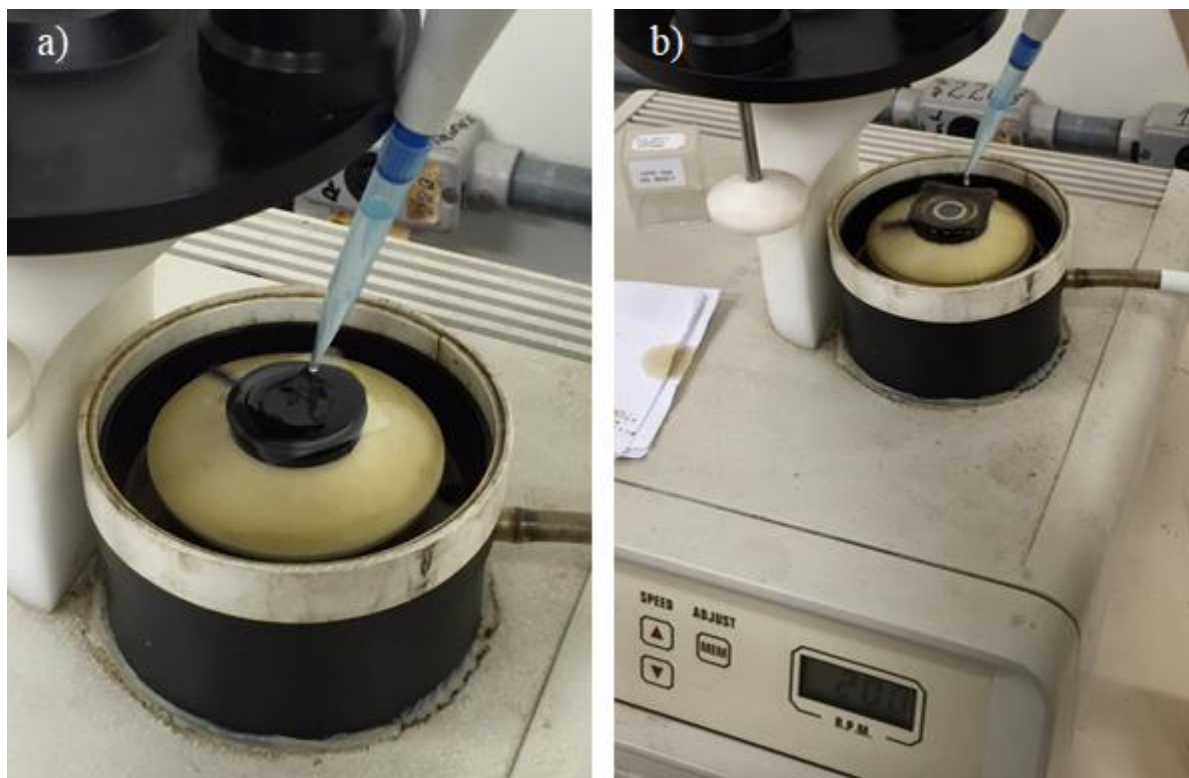


Fonte: Próprio autor

Uma seringa graduada foi utilizada com 2 ml de tetracloretileno para limpeza do óleo, seu conteúdo foi adicionado na lâmina de vidro com delicadeza, para não remover partículas da sua posição.

Ao fim desta etapa, a velocidade foi aumentada para 100 rpm e o procedimento de aplicação de tetracloretileno para limpeza foi repetido até que a placa estivesse mais limpa, sem a presença do óleo bruto. Na Figura 36 a) o óleo está presente e na Figura 36 b) é possível observar o óleo sendo removido da amostra.

Figura 36 - Tetracloroetileno sendo aplicado e o óleo bruto sendo removido



Fonte: Próprio autor

Durante um minuto, a rotação foi aumentada para 130 rpm e o tetracloroetileno foi reaplicado, dessa vez com maior cuidado para não alterar os anéis que já eram visíveis. Após essa etapa, a velocidade foi finalmente aumentada para 200 rpm para induzir a evaporação do tetracloroetileno da amostra e com isso a limpeza do óleo foi concluída como visto na Figura 37.

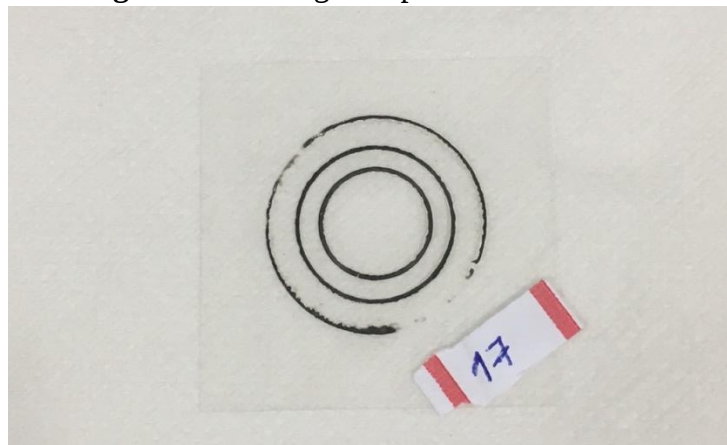
Figura 37 - Limpeza concluída



Fonte: Próprio autor

A amostra com partículas de desgaste em anéis é o ferrograma utilizado para análise no microscópio e no ferrosκόpio e demonstrado na Figura 38.

Figura 38 - Ferrograma proveniente do RPD

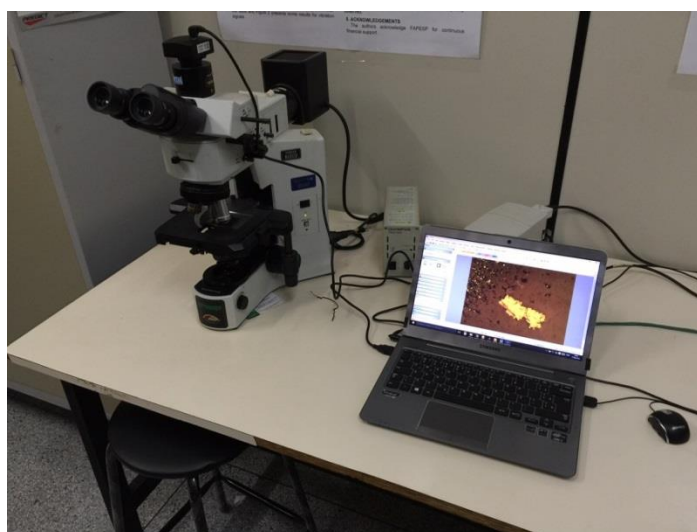


Fonte: Próprio autor

4.2.1.3 Ferrosκόpio

Em análises de ferrografia analítica, o microscópio óptico ou ferrosκόpio, demonstrado na Figura 39, é utilizado para a interpretação de partículas encontradas no ferrograma, permitindo a observação visual para que sejam identificados os tipos de desgaste presentes.

Figura 39 - Ferrosκόpio OLYMPUS BX 41



Fonte: Próprio autor

Para analisar os ferrogramas preparados pelo RPD foi utilizado um microscópio ótico Olympus, modelo BX-41. As partículas encontradas foram analisadas e a causa do seu desgaste identificado, a partir do seu tamanho, forma e coloração.

O equipamento apresenta luz bi-cromática, que possibilita identificar partículas metálicas e não metálicas. Com a utilização de filtros polarizados é possível identificar contaminantes, como partículas fibrosas. As óticas permitem ampliação de 100 a 500 vezes, ajustes para eliminar problemas focais e apresenta um sistema que permite a adição de câmeras, sendo possível a obtenção de imagens com alta qualidade.

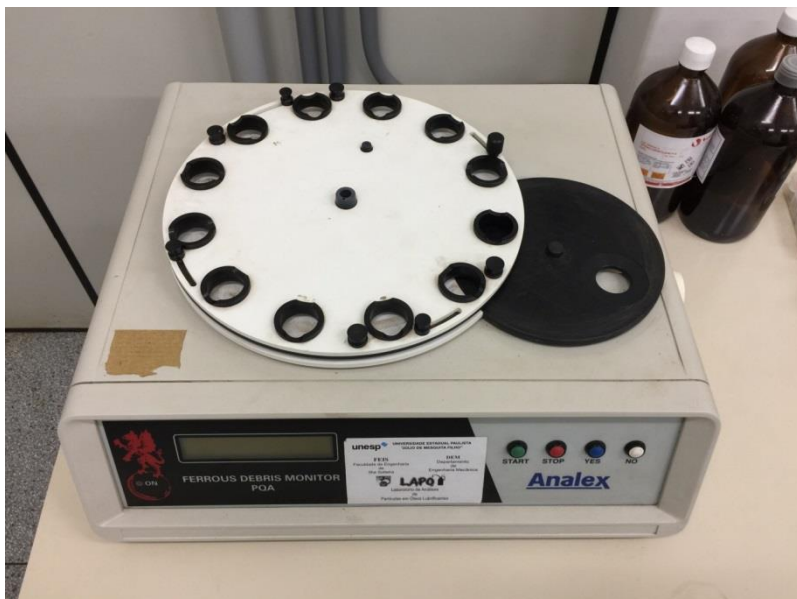
4.2.2 Contagem de partículas

Para quantificar as partículas ferrosas presentes numa amostra de óleo, utilizou-se o monitor de partículas ferrosas (PQA) que é um magnetômetro de alta precisão. O monitor de partículas ferrosas usa um sistema de bobinas e seus campos magnéticos para quantificar a concentração total das partículas magnéticas presentes na amostra e fornece seu resultado de acordo com essa quantidade de partículas, sendo indicada pelo índice PQ.

O índice PQ não possui unidade, mas pode ser pensado como partículas ferrosas em massa por massa de óleo. Este índice não leva em conta o tamanho das partículas e pode ser utilizado para medir o desgaste em óleo, graxa e fluidos refrigerantes.

Para sua utilização, primeiramente foi colocado um padrão com valor conhecido para calibração do equipamento demonstrado na Figura 40. Em seguida, uma quantidade de 2 ml de cada amostra de óleo foi adicionada em recipientes específicos para a medição do índice PQ. Para cada amostra, foi calculada a média aritmética de dez leituras.

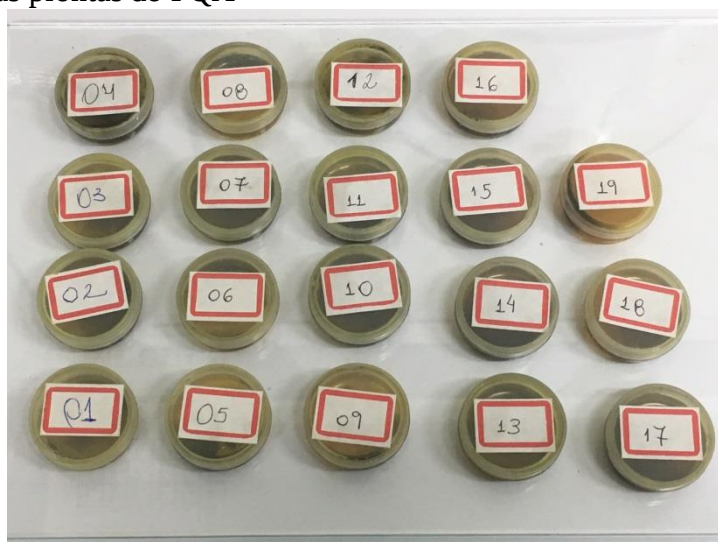
Figura 40 - Monitor automático de partículas



Fonte: Próprio autor

O monitor automático de partículas do Laboratório de Tribologia é da marca Kittiwake Developments Ltda, com temperatura de operação na faixa de 20°C a 30°C. Foram realizadas 5 medidas para cada amostra, demonstradas na Figura 41, e utilizada a média entre essas medidas.

Figura 41 - Amostras prontas do PQA



Fonte: Próprio autor

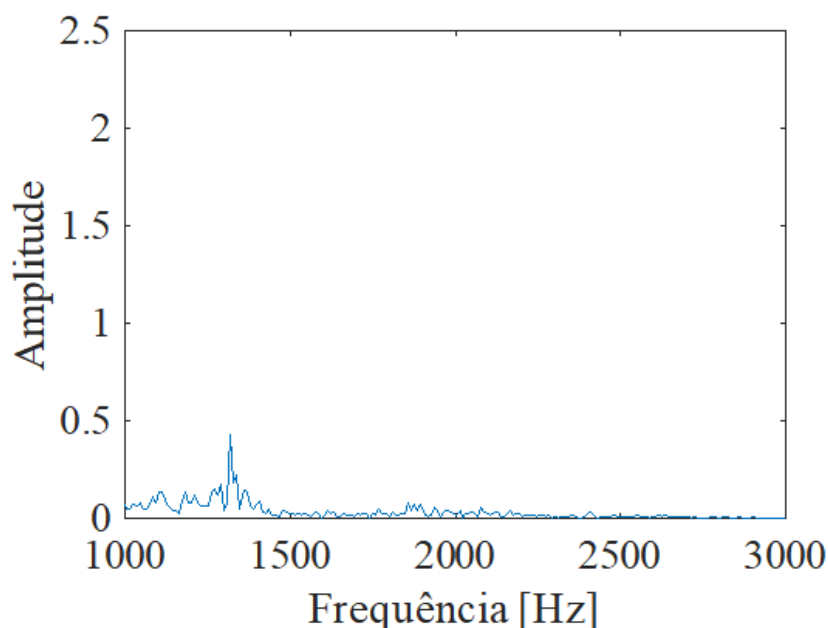
4.3 AQUISIÇÃO DOS SINAIS

O sinal de vibração é adquirido por meio de acelerômetros piezoelétricos montados na carcaça do multiplicador próximo aos eixos e posicionados radialmente em relação às engrenagens. Para uma correta leitura dos dados, a frequência de amostragem precisou ser estudada.

4.3.1 Frequência de amostragem

Para a seleção da frequência de amostragem adequada, o espectro de sinal é usado. Como exemplo, o espectro do sinal experimental é mostrado na Figura 42. A maior frequência que se deseja medir é a frequência de engrenamento, ela ocorre a cada engrenamento e seu valor é o número de dentes x rotação. Neste trabalho para uma coroa de 95 dentes e uma rotação de 14 Hz a frequência de engrenamento é por volta de 1300 Hz. De acordo com o teorema de Nyquist, a frequência de amostragem deve ser pelo menos o dobro da frequência máxima analisada. Para evitar erros de aliasing, o teorema de Nyquist é atendido e a frequência de amostragem precisa ser maior que 2600 Hz.

Figura 42 - Espectro do sinal



Fonte: Próprio autor

A frequência de amostragem selecionada foi de 10000 Hz, pois é consistente com o teorema de Nyquist e atende bem a transformada de wavelet. Foi utilizado para leitura 300 blocos com 4096 pontos, com isso o tempo de aquisição do sinal é de 120 segundos.

4.3.2 Processamento dos sinais

O uso de técnicas de tempo-frequência é sugerido pela natureza do sinal. De fato, a presença de falhas locais, como uma trinca em um dos dentes da engrenagem, introduz mudanças de curta duração no sinal de vibração. Portanto, a característica de sinal não estacionária pode ser bem detectada por técnicas de tempo-frequência.

Para o processamento dos sinais foi elaborado um programa no software Matlab que faz a leitura dos dados provenientes do software DASYLab. Primeiramente o programa faz uma formatação dos dados, separando os sinais do trigger e dos acelerômetros em vetores. Com isso é possível identificar os pontos onde se inicia cada rotação. Com essas informações é possível fazer a TSA comentada no capítulo 2.

Ao remover os ruídos e obter o sinal médio de uma rotação, a análise de wavelet é iniciada. A wavelet mãe utilizada neste trabalho é a wavelet de Morlet. O motivo dessa escolha é devido à grande utilização na literatura deste tipo de wavelet mãe para o diagnóstico de falhas em engrenagem.

Para investigar a sensibilidade do método, a transformada contínua de wavelet foi aplicado ao sinal de vibração radial deste experimento.

Como ela separa o sinal em frequência e tempo, a transformada de wavelet é excelente para fazer filtragem do sinal, não apenas na frequência como no tempo, e foi utilizada para melhor visualização dos defeitos.

Após o filtro, as mudanças no sinal de vibração devido à vibração dos dentes danificados provocam um incremento da magnitude na análise de wavelet, com isso a localização da falha pode ser identificada.

4.4 EXPERIMENTOS

Foram realizados dois experimentos na bancada experimental apresentada anteriormente. O primeiro com uma engrenagem nova durante toda sua vida útil e no segundo

foi incluído um defeito nas engrenagem simulando um dente trincado por fadiga, mais detalhes serão descritos nas suas respectivas seções.

4.4.1 Experimento 1

O primeiro experimento consiste na análise das partículas de desgaste proveniente do óleo lubrificante e da análise por vibrações através da técnica da transformada contínua de wavelet de um par engrenado novo até o fim de sua vida útil. As duas técnicas são comparadas e uma tentativa de correlação foi feita.

Durante o experimento a engrenagem é frequentemente observada para localizar possíveis danos nos dentes.

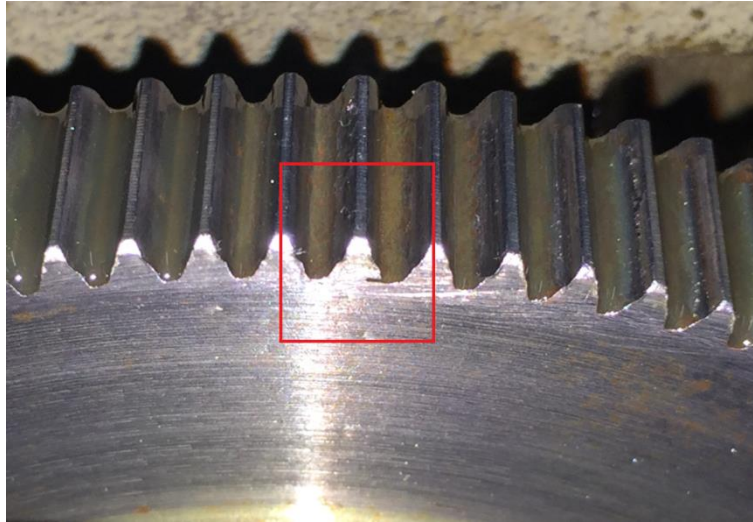
4.4.2 Experimento 2 – dente trincado

Este experimento consiste na análise de um dente trincado pela técnica da transformada contínua de wavelet, a sensibilidade e a capacidade de diferenciar trincas dos outros defeitos que ocorrem em engrenagens foram avaliadas.

A trinca foi simulada por um entalhe no dente de número 74, o dente foi escolhido aleatoriamente, esta foi introduzida mecanicamente na engrenagem através da eletroerosão a fio. O entalhe foi feito por toda largura do dente com uma profundidade de 0,7 mm na sua raiz, com altura de 0,2 mm. A profundidade do entalhe no dente é escolhida de tal forma, que não seja muito grande quebrando o dente rapidamente ou que não seja muito curto, com o dente não propagando a trinca e desgastando por contato.

A Figura 43 mostra o dente número 74 com o entalhe em sua raiz.

Figura 43 - Dente entalhado



Fonte: Próprio autor

A posição correta do entalhe no dente durante o processo de eletroerosão é um objetivo fundamental para a repetibilidade do processo. Para isso, o entalhe foi posicionado na raiz do dente, ponto onde são formadas as trincas por fadiga no dente.

5 RESULTADOS

Para diagnosticar as falhas das engrenagens do redutor de forma eficaz, foi aplicada a TSA e a transformada de wavelet para os dois experimentos. Para análise de vibrações os resultados esperados são os mapas de tempo-frequência da transformada wavelet contínua.

5.1 EXPERIMENTO 1

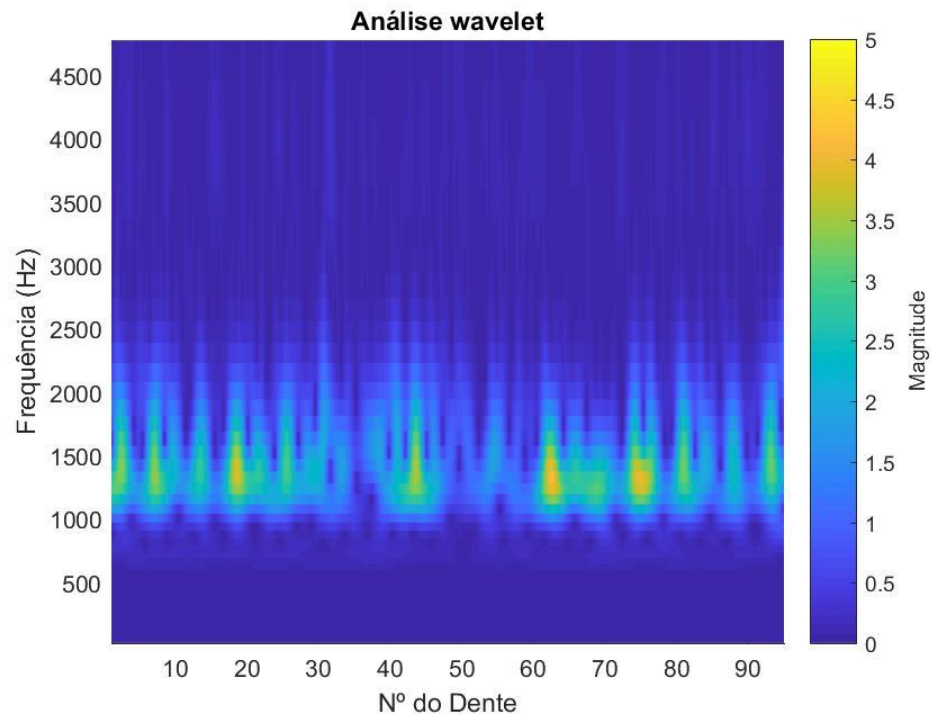
5.1.1 Análise wavelet

O experimento 1 foi realizado e os sinais de vibração foram analisados através da técnica de wavelet durante toda vida útil da engrenagem. Os sinais foram divididos em três períodos conforme a curva da banheira.

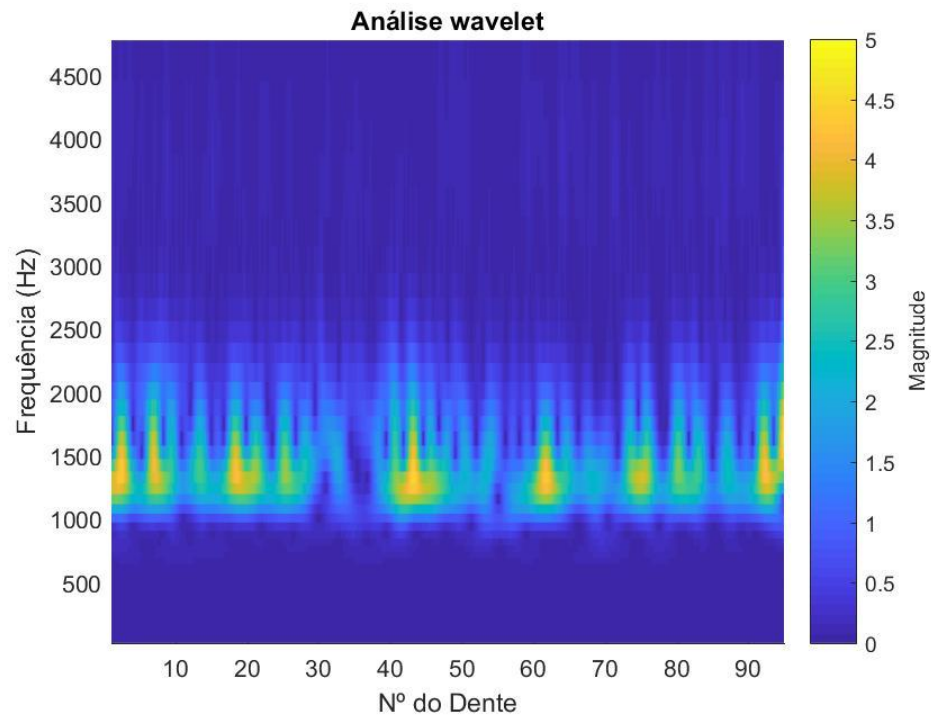
Inicialmente o período de amaciamento, com altas magnitudes distribuídas por todos os dentes da engrenagem. O segundo período é o do funcionamento normal que dura até o fim da vida útil, com características de baixas magnitudes. Por ultimo o período de alarme com início no fim da útil.

5.1.2 Período de amaciamento

Nas Figura 44 e Figura 45 são apresentados os mapas em frequência dos primeiros sinais de vibração coletados da bancada com 1 hora e 8 horas de experimento respectivamente. É possível observar uma magnitude alta por toda engrenagem, referente ao início da vida útil da engrenagem e ao amaciamento dos dentes. Também é possível notar que os picos estão na frequência de engrenamento da engrenagem de aproximadamente 1300 Hz.

Figura 44 - 1 hora de experimento

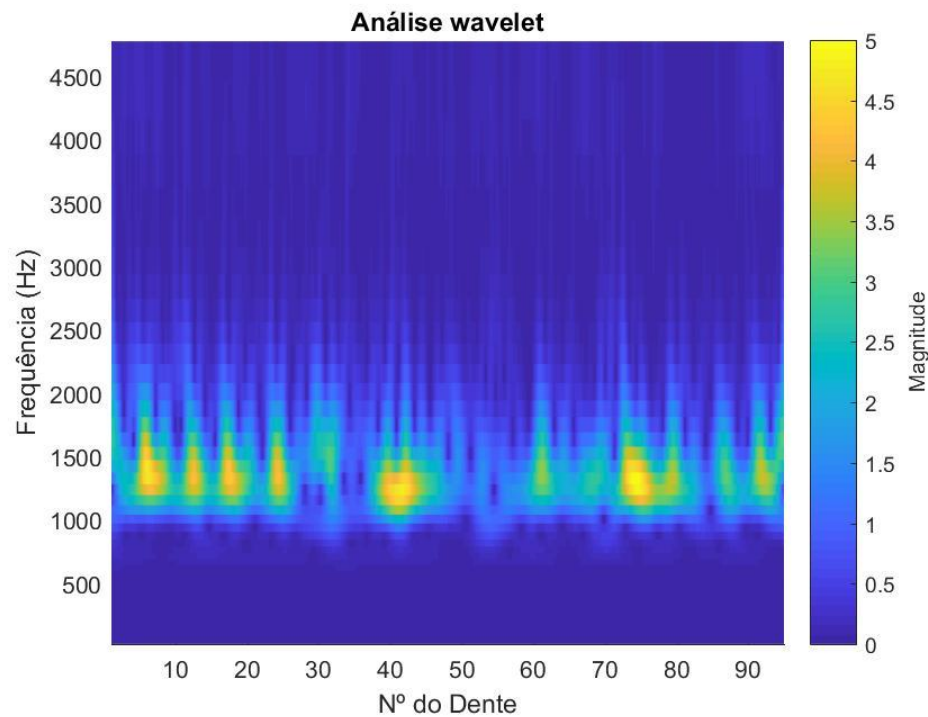
Fonte: Próprio autor

Figura 45 - 8 horas de experimento

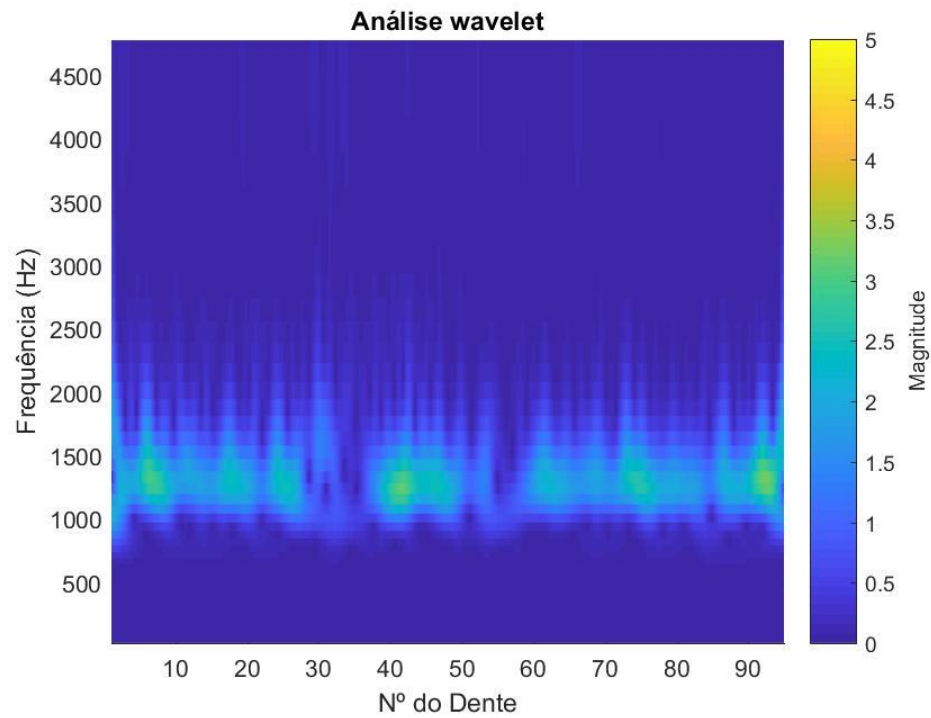
Fonte: Próprio autor

Durante o período de amaciamento da engrenagem foi possível notar a diminuição gradativa da magnitude do sinal. Neste período são observados picos distribuídos por toda a rotação da engrenagem. Essa diminuição gradativa é mostrada nas Figura 46, Figura 47 e Figura 48 com 50, 100 e 200 horas de experimento respectivamente.

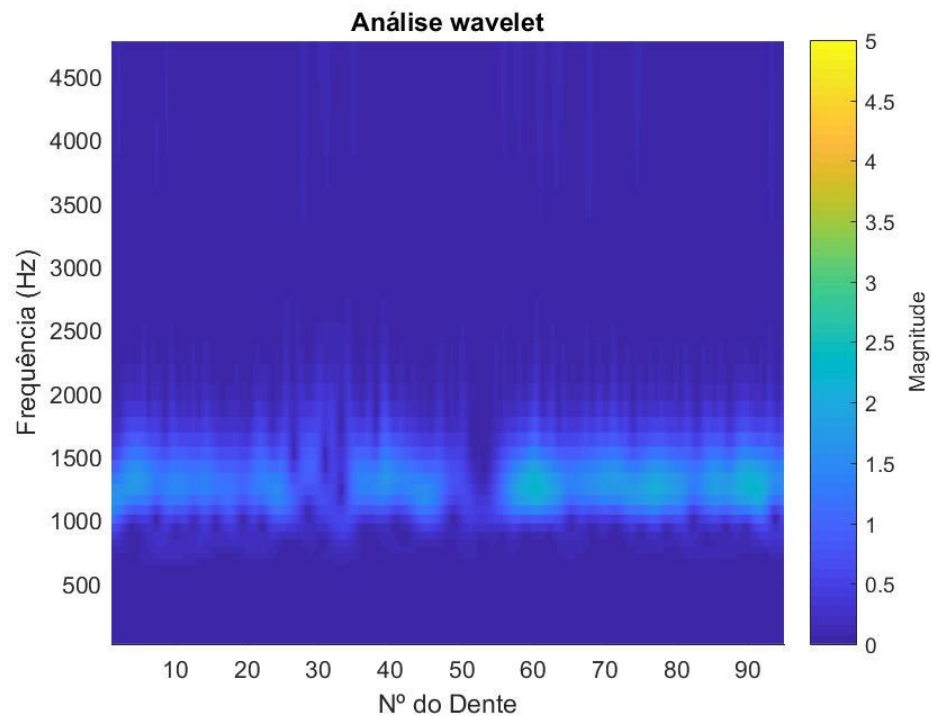
Figura 46 - 50 horas de experimento



Fonte: Próprio autor

Figura 47 - 100 horas de experimento

Fonte: Próprio autor

Figura 48 - 200 horas de experimento

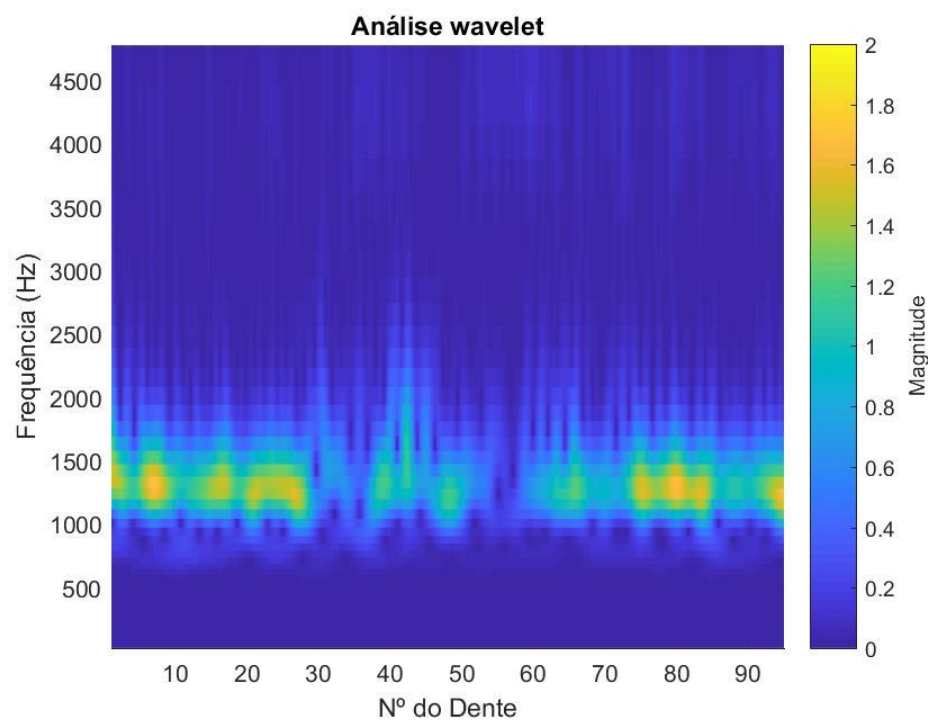
Fonte: Próprio autor

Com a baixa magnitude do sinal, o amaciamento chegou ao fim e iniciou-se o período de funcionamento normal ou período da vida útil.

5.1.3 Período de funcionamento normal

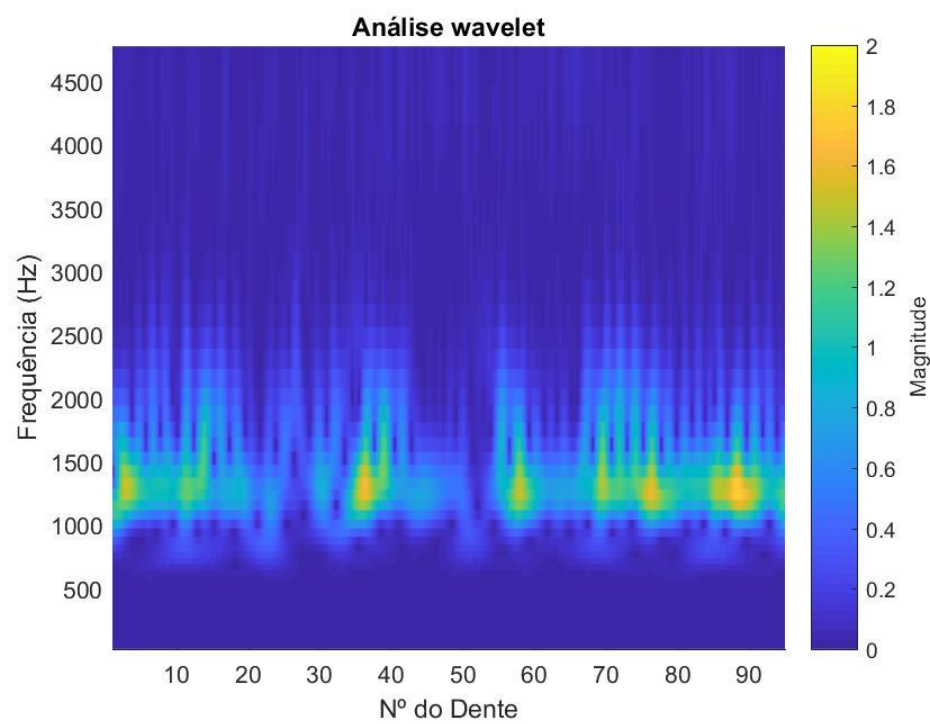
O período de funcionamento normal vai durar até atingir o fim da vida útil da engrenagem e começar a ocorrer desgastes críticos. Neste período é possível observar a baixa magnitude do sinal e sua estabilidade por um longo período de horas. Para melhorar a visualização a escala de magnitude foi alterada e as análises de wavelet demonstradas nas Figura 49, Figura 50, Figura 51 e Figura 52 com 300, 400, 500 e 600 horas de experimento.

Figura 49 - 300 horas de experimento



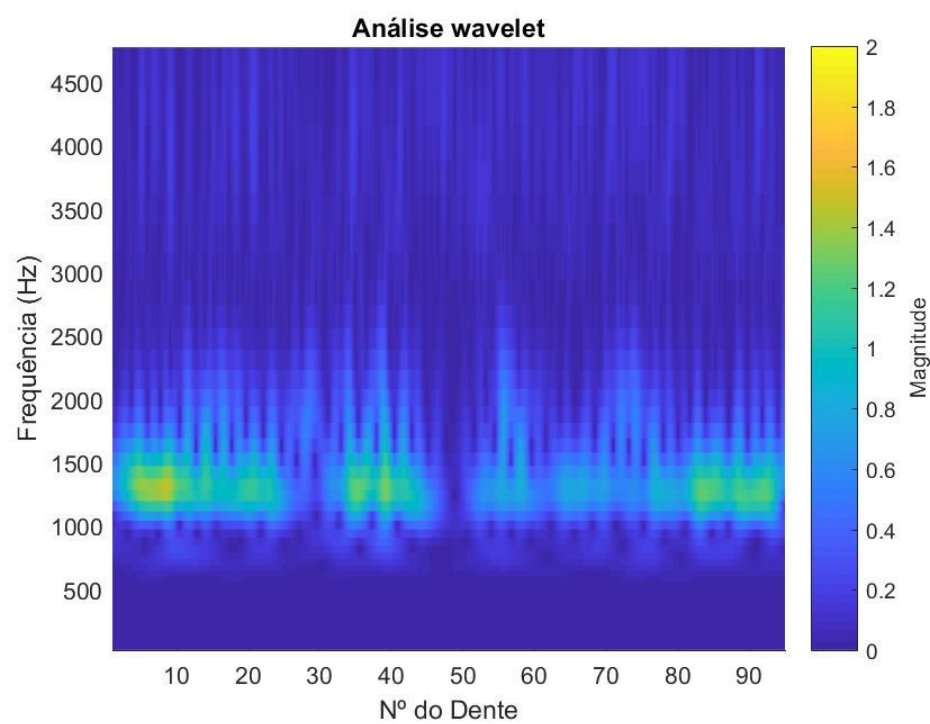
Fonte: Próprio autor

Figura 50 - 400 horas de experimento

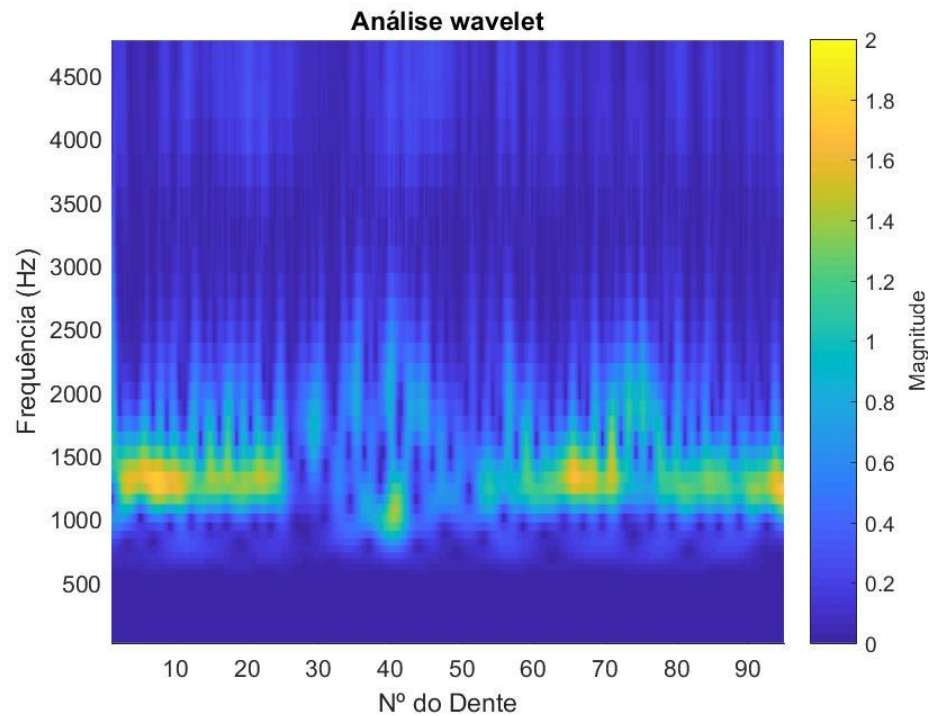


Fonte: Próprio autor

Figura 51 - 500 horas de experimento



Fonte: Próprio autor

Figura 52 - 600 horas de experimento

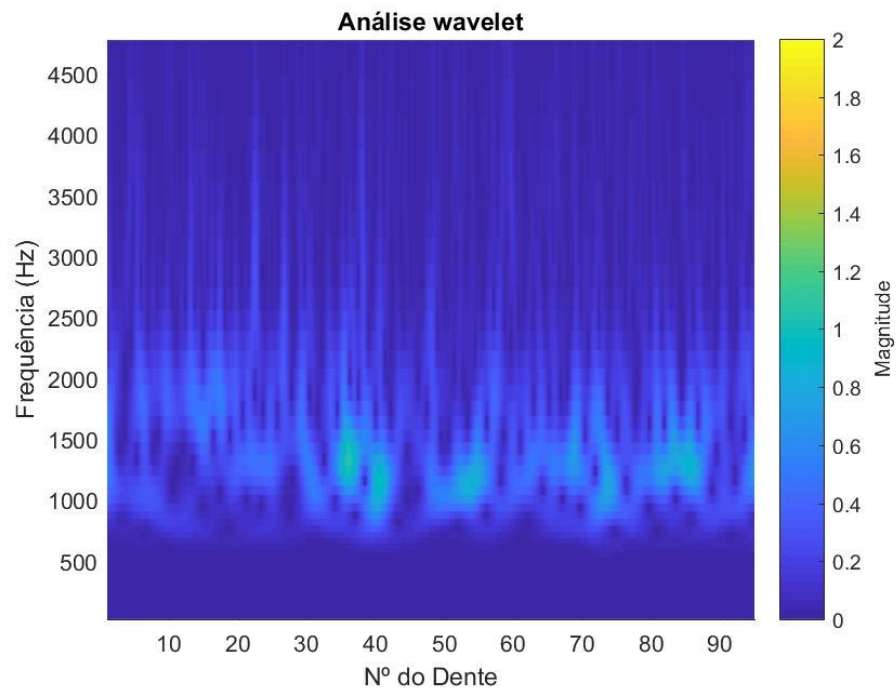
Fonte: Próprio autor

O par engrenado foi projetado para uma vida útil de 720 horas, ao atingir o fim da vida útil, falhas catastróficas estão sujeitas a ocorrer iniciando o período de alarme ou fim da vida útil.

5.1.4 Fim da vida útil

Neste período a engrenagem está sujeita a falhas catastróficas e uma atenção maior deve ser dada à análise de vibrações. Analisando as Figura 53 e Figura 54, com 700 e 800 horas respectivamente, referentes ao fim da vida útil da coroa é possível observar apenas alguns pontos gerando descontinuidade no sinal.

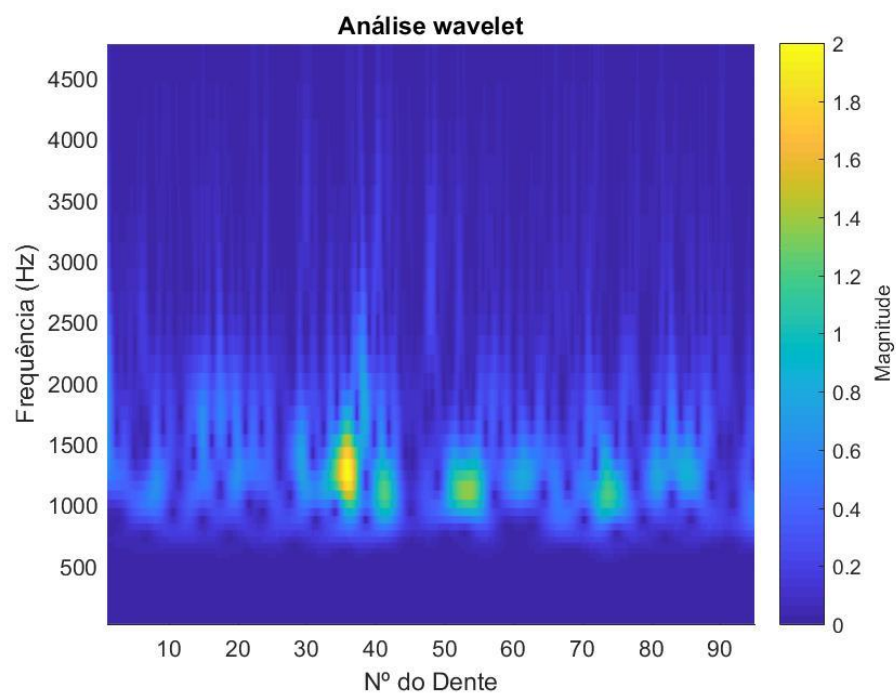
Figura 53 - 700 horas de experimento



Fonte: Próprio autor

Na Figura 54 temos um ponto que se destaca com uma maior magnitude por volta do dente de número 36.

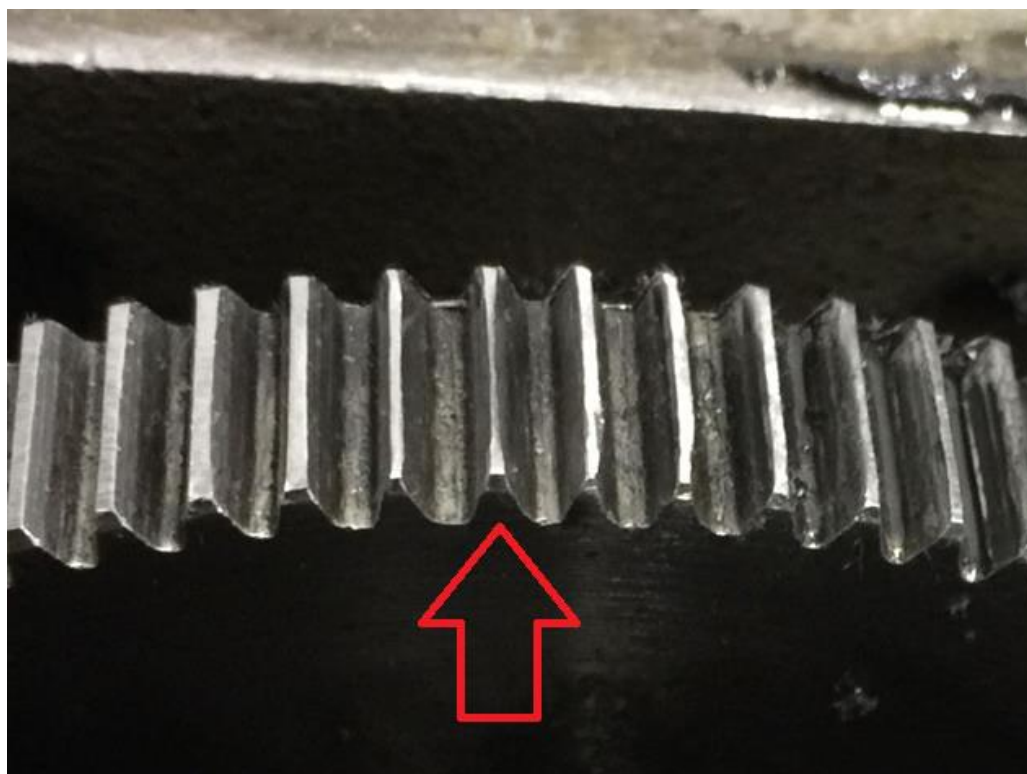
Figura 54 - 800 horas de experimento



Fonte: Próprio autor

Ao parar o experimento e abrir o redutor para observar a engrenagem, foi possível observar um desgaste muito acentuado no dente 36. Esse desgaste pode ser visto na Figura 55, ao comparar a espessura do dente 36 com os outros dentes da engrenagem nota-se uma espessura consideravelmente menor do que nos outros dentes.

Figura 55 - Dente 36 após 800 horas de experimento



Fonte: Próprio autor

Como a técnica da transformada contínua de wavelet foi capaz de identificar o desgaste ocorrido no dente, essa técnica foi comparada com a função densidade probabilidade beta que também se mostrou eficiente ao identificar danos pontuais.

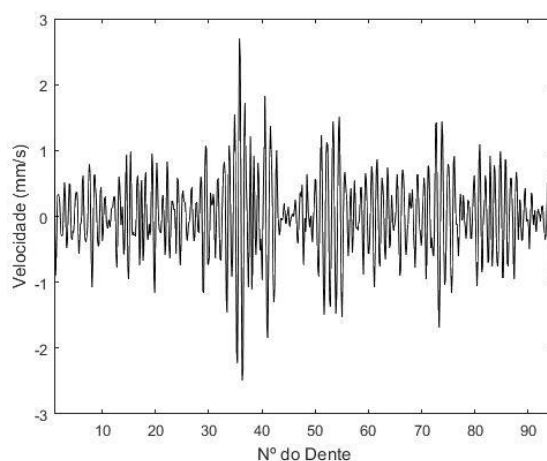
5.1.5 Comparativo análise wavelet x Função densidade probabilidade beta

Neste trabalho foi possível comparar a análise wavelet com a função densidade probabilidade (FDP) beta desenvolvida por Silva (2015). Foi utilizado o programa desenvolvido por Silva com pequenas alterações para compara-lo com a análise wavelet desenvolvida neste trabalho.

O objetivo de se comparar com a FDP beta é que ela se mostrou excelente para monitorar o nível de severidade no dente.

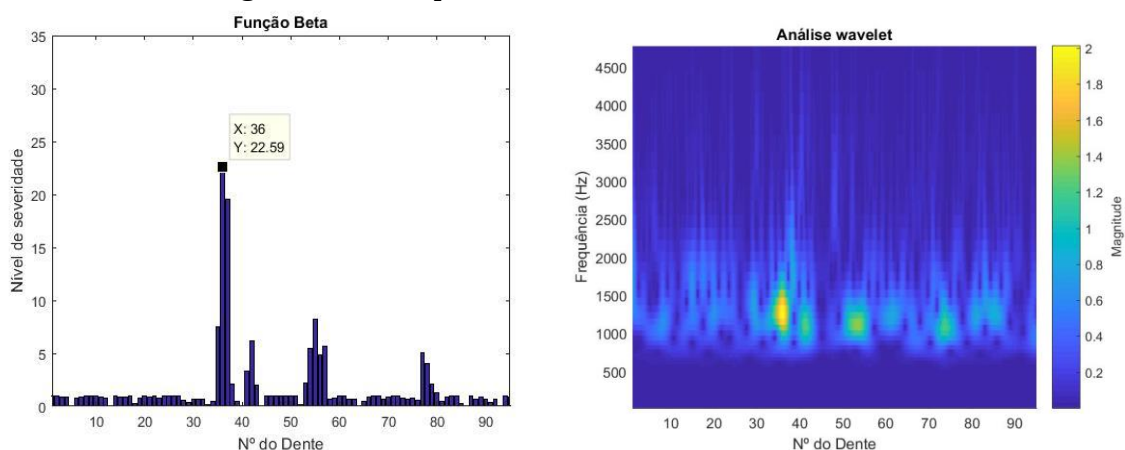
As duas análises foram feitas no sinal com 800 horas do experimento 1. As análises foram comparadas e o resultado mostrado na Figura 57, para complementar as informações, na Figura 56 está o sinal no tempo após a TSA.

Figura 56 - Sinal no tempo com 800 horas de experimento



Fonte: Próprio autor

Figura 57 - Comparativo 800 horas - FDP beta x wavelet



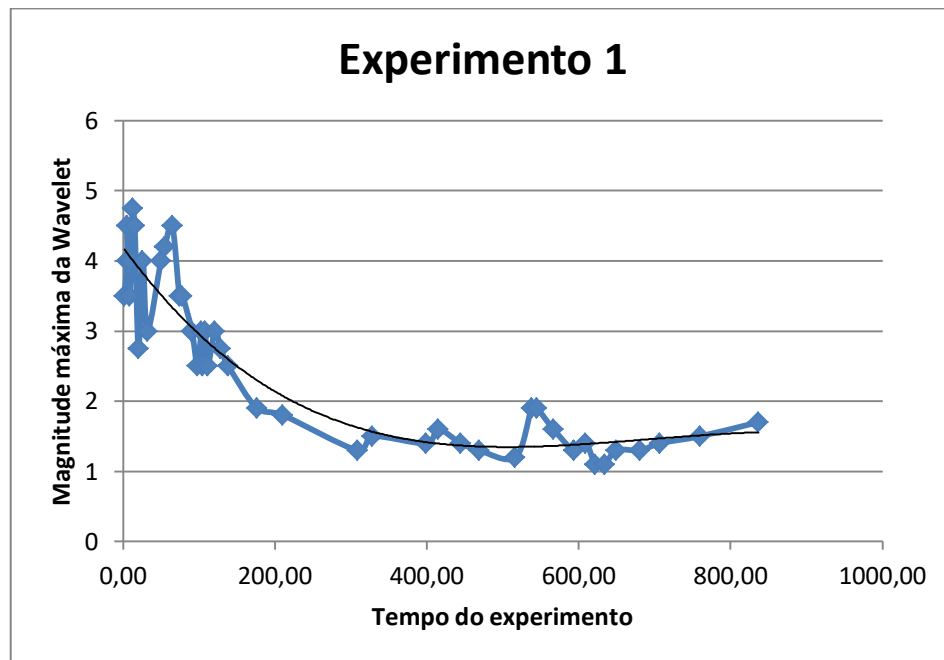
Fonte: Próprio autor

Observa-se uma grande correlação entre as duas técnicas de análise, o diferencial da análise de wavelet é a possibilidade de visualizar as informações em frequência. Com isso é possível diferenciar as fontes de vibração de acordo com as técnicas de análise em frequência.

5.1.6 Curva da magnitude da wavelet

Através da técnica de wavelet foi possível obter outro resultado que é a curva ao longo da vida útil da engrenagem pela magnitude máxima da wavelet de cada sinal coletado que está demonstrada na Figura 58.

Figura 58 - Curva da magnitude pelo tempo



Fonte: Próprio autor

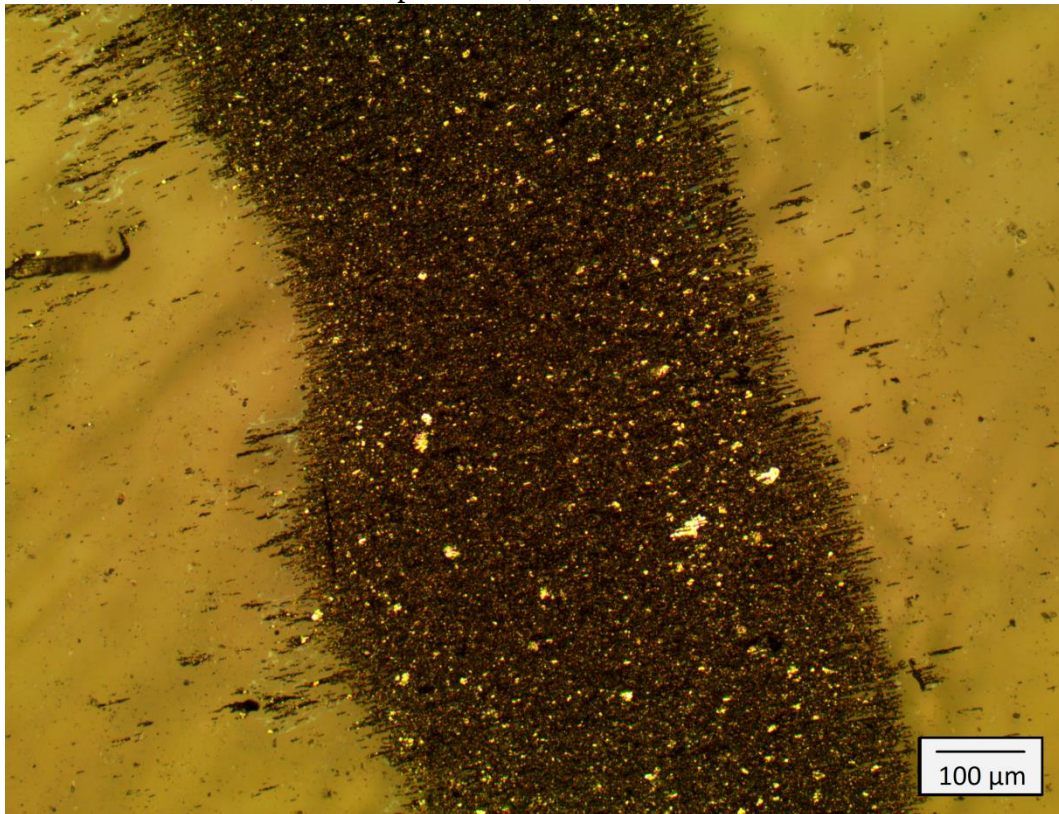
Observa-se características semelhantes à curva da banheira apresentadas na seção 2.1.3.1.

5.1.7 Análise das partículas de desgaste

5.1.7.1 Ferrografia

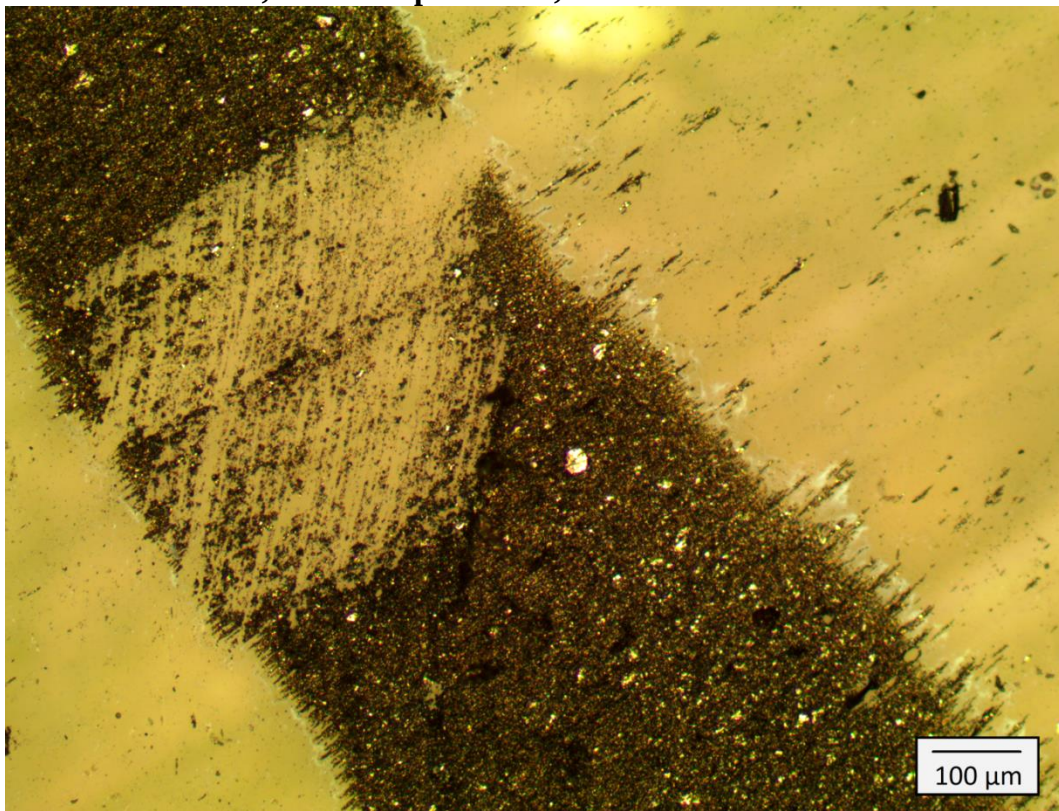
As amostras foram coletadas e os ferrogramas feitos no RPD. Nas Figura 59 e Figura 60 encontram-se as partículas presentes no anel interno do ferrograma da amostra com 24 horas de experimento, onde se encontram as maiores partículas.

Figura 59 - Raio interno, 24 h de experimento, aumento de 100x



Fonte: Próprio autor

Figura 60 - Anel interno, 24 h de experimento, aumento de 100x

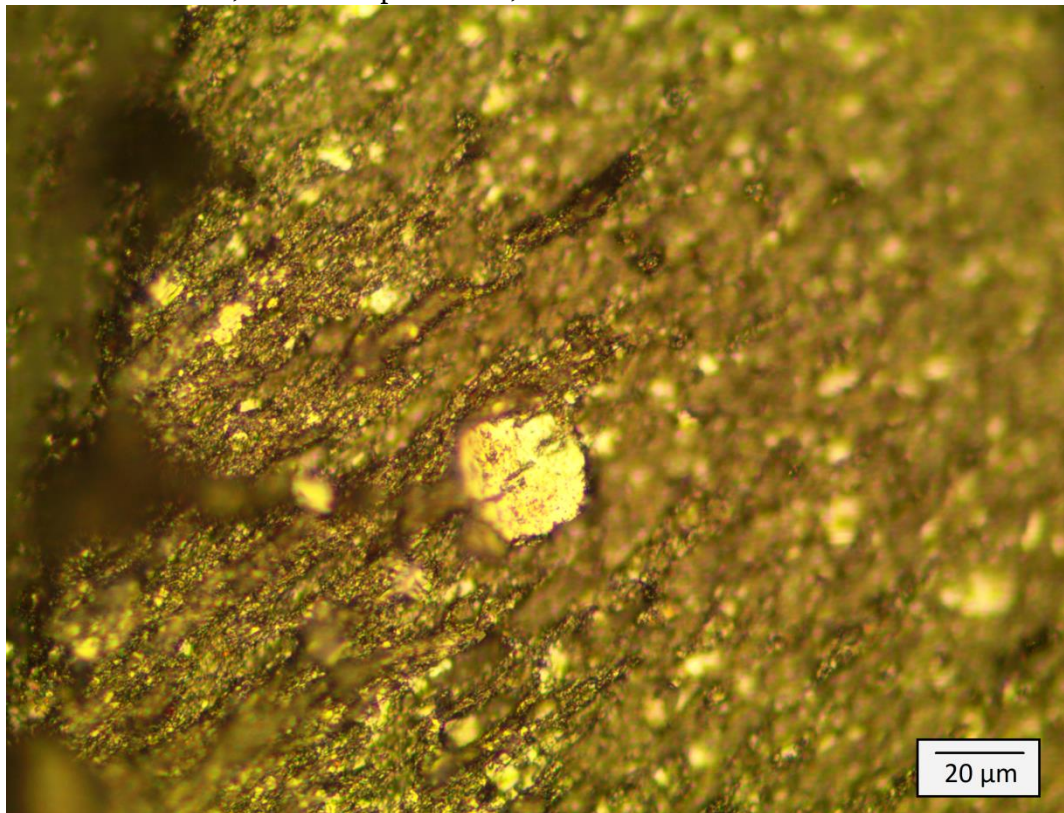


Fonte: Próprio autor

É possível observar uma grande quantidade de partículas pequenas (menores que 15 μm), planas e escuras, elas são proveniente do desgaste por atrito. Também encontra-se presente poucas unidades de partículas maiores, aproximadamente 20 μm , redondas e planas que são formadas por fadiga da superfície.

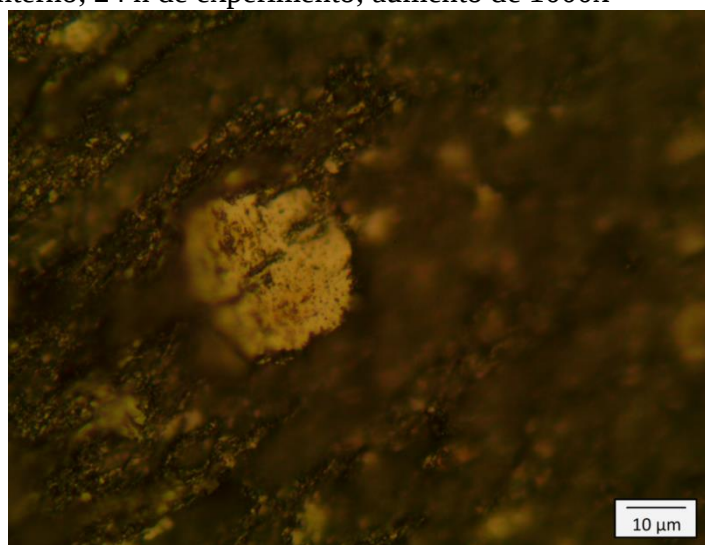
A partícula plana e circular encontrada na Figura 61 foi ampliada no ferrosκόpio e demonstrada a seguir na Figura 62. Sendo possível observar o aumento de 1000 vezes do ferrosκόpio.

Figura 61 - Anel interno, 24 h de experimento, aumento de 500x



Fonte: Próprio autor

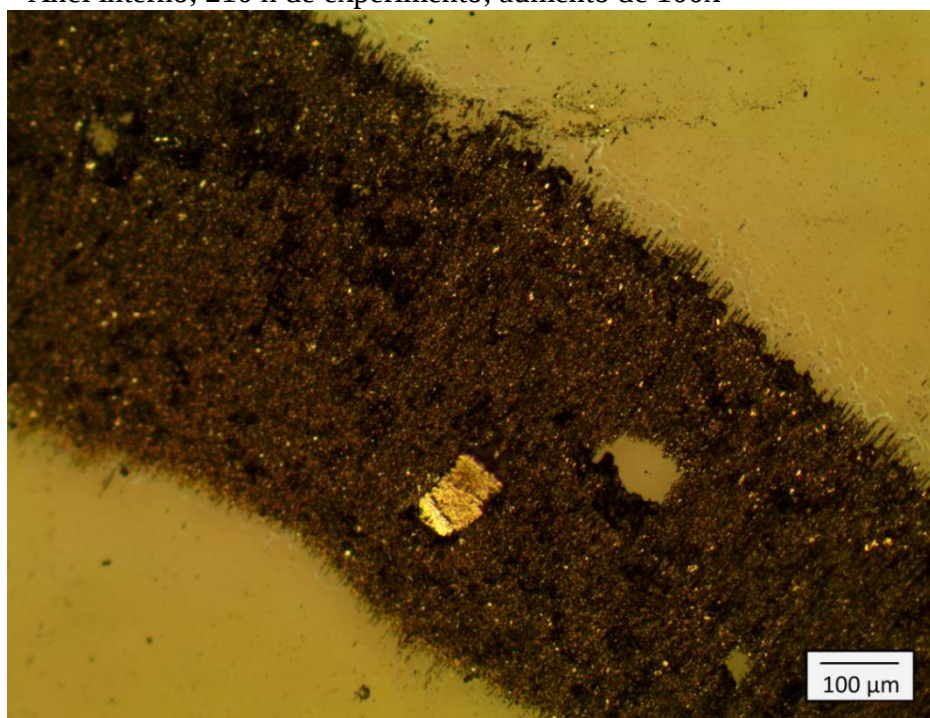
Figura 62 - Anel interno, 24 h de experimento, aumento de 1000x



Fonte: Próprio autor

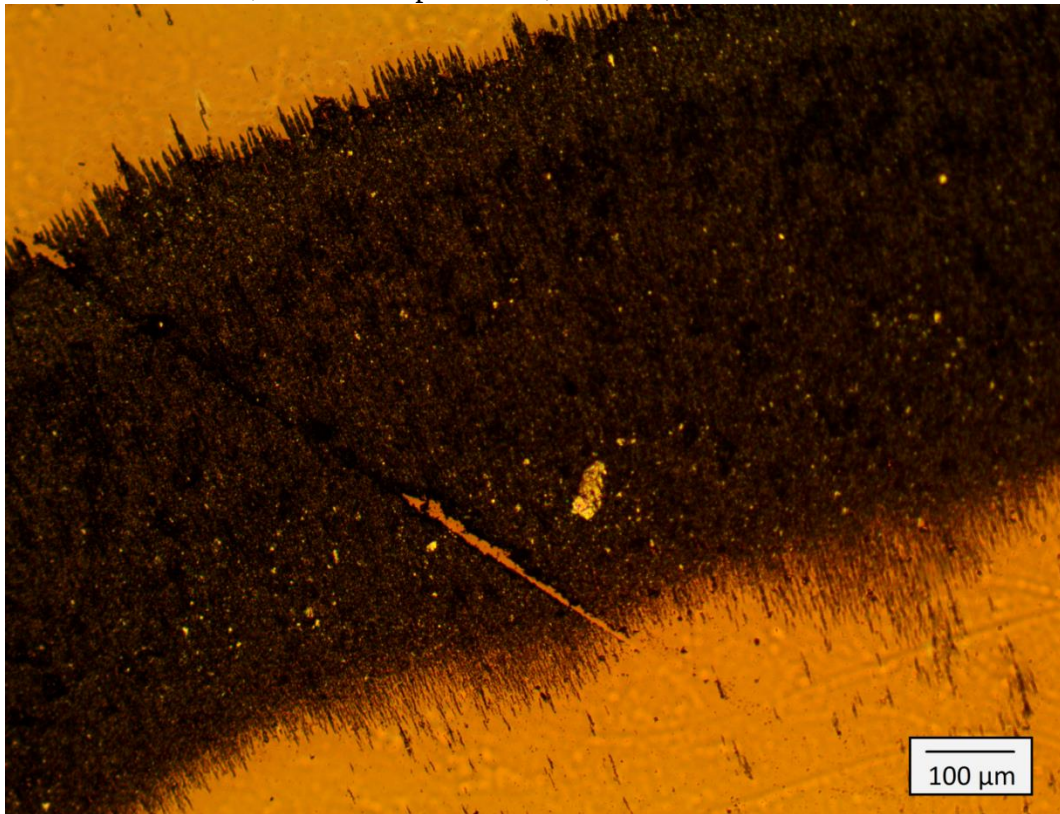
Com 210 horas de experimento a quantidade das partículas pequenas e escuras provenientes do desgaste por atrito está maior. E as primeiras partículas formadas por desgaste severo começam a ser encontradas nos ferrogramas. Essas partículas são grandes (maiores que 20 µm), planas, alongadas e estriadas. Ocorrem por carga ou velocidade excessiva da superfície deslizante. Como observado nas Figura 63, Figura 64 e aumentada na Figura 65.

Figura 63 - Anel interno, 210 h de experimento, aumento de 100x



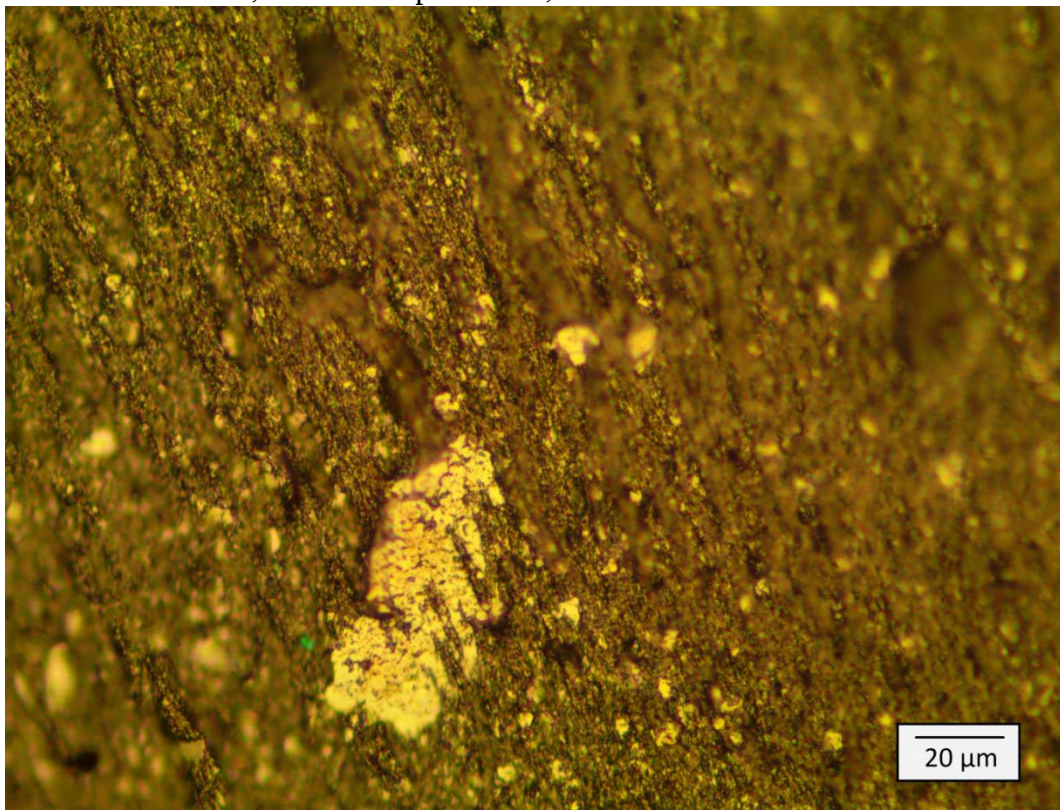
Fonte: Próprio autor

Figura 64 - Anel interno, 210 h de experimento, aumento de 100x



Fonte: Próprio autor

Figura 65 - Anel interno, 210 h de experimento, aumento de 500x



Fonte: Próprio autor

Com 470 horas, ao analisar o anel interno a quantidade de partículas provenientes do atrito está estável, indicando que o amaciamento já terminou. Por outro lado a quantidade de partículas por fadiga da superfície está aumentando. Como pode ser visto na Figura 66.

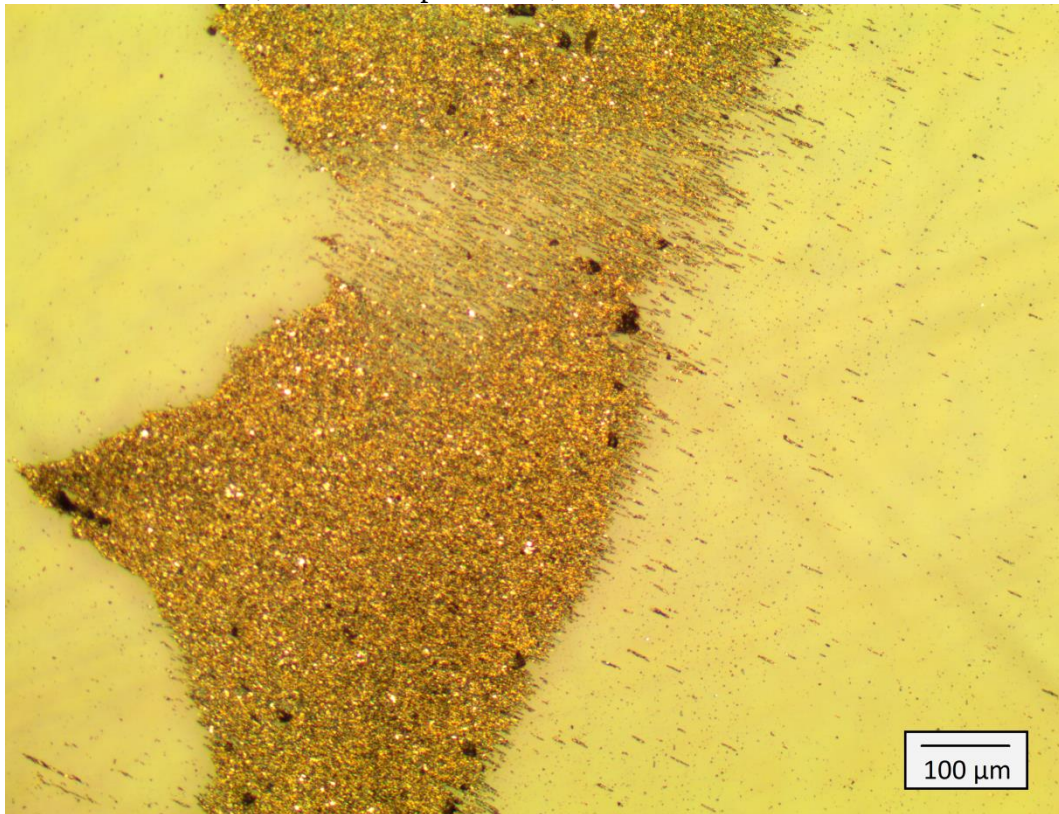
Figura 66 - Anel interno, 470 h de experimento, aumento de 100x



Fonte: Próprio autor

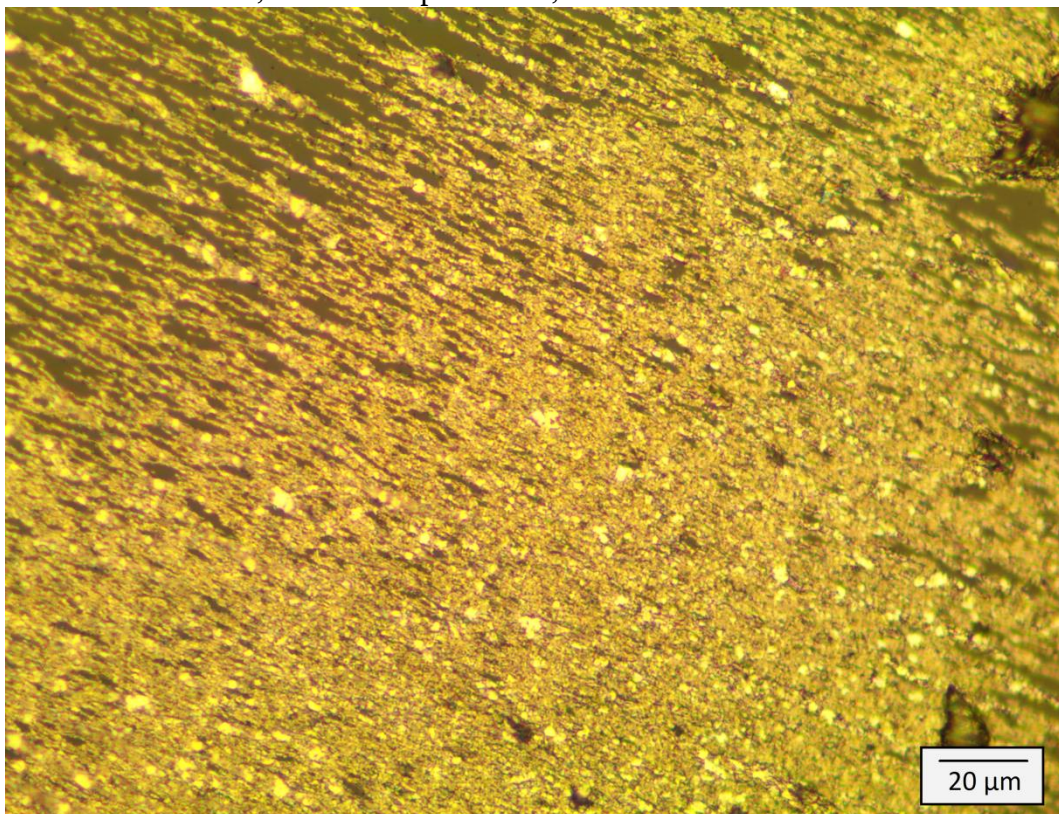
Por meio de forças rotacionais, magnéticas e gravitacionais as partículas menores ficam dispostas no anel externo do ferrograma, isto pode ser visto na Figura 67, que está mais aproximada nas Figura 68 e Figura 69. Nelas encontram-se partículas metálicas, sendo possível notar o seu alinhamento magnético formado durante a preparação do ferrograma no RPD.

Figura 67 - Anel externo, 470 h de experimento, aumento de 100x



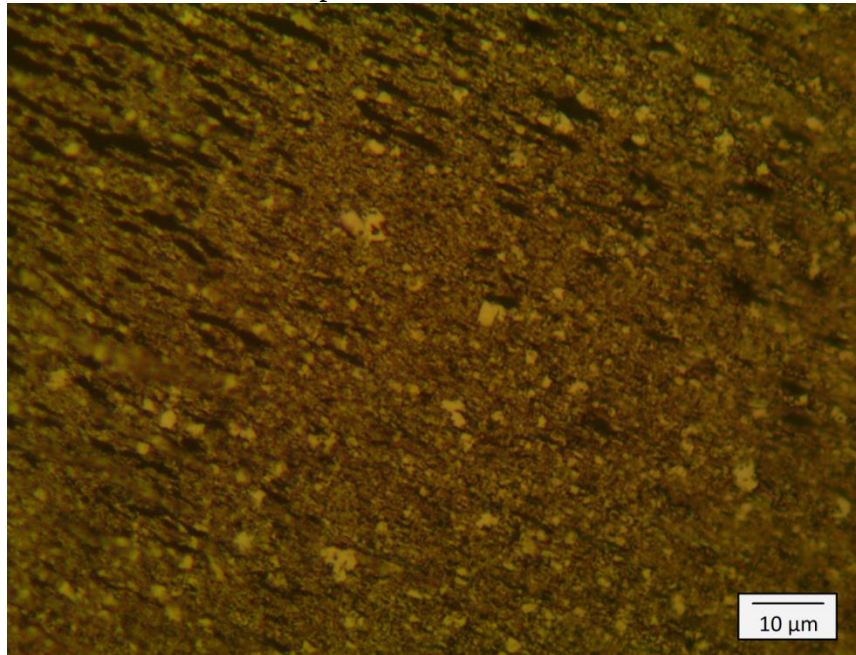
Fonte: Próprio autor

Figura 68 - Anel externo, 470 h de experimento, aumento de 500x



Fonte: Próprio autor

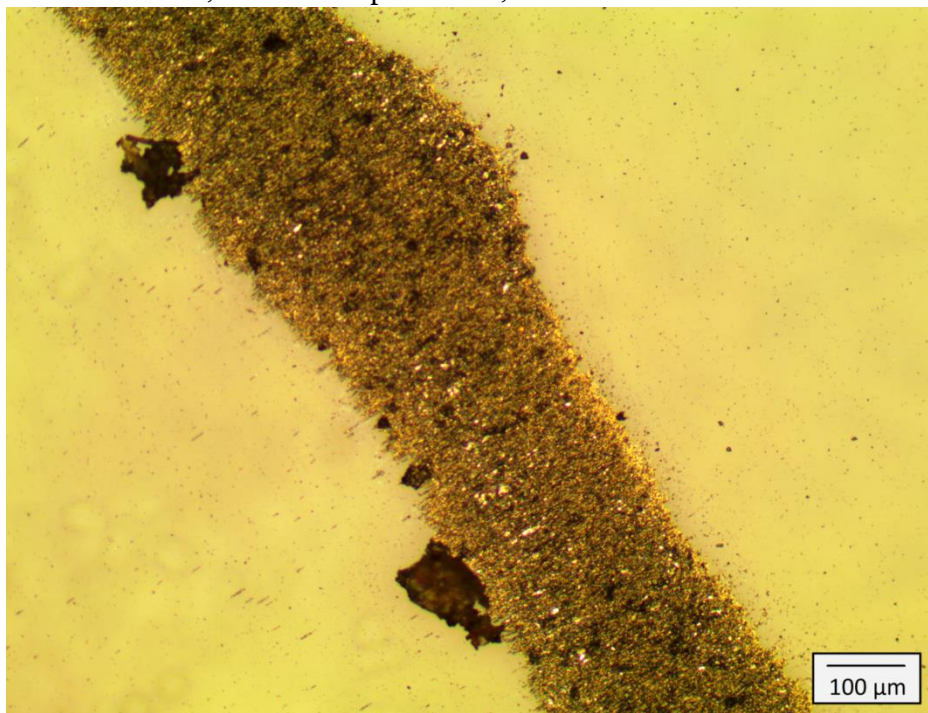
Figura 69 - Anel externo, 470 h de experimento, aumento de 1000x



Fonte: Próprio autor

O anel mediano diferentemente do anel externo possui algumas partículas maiores, mas com tamanho consideravelmente menor do que as do anel interno. Na Figura 70 uma imagem do anel mediano.

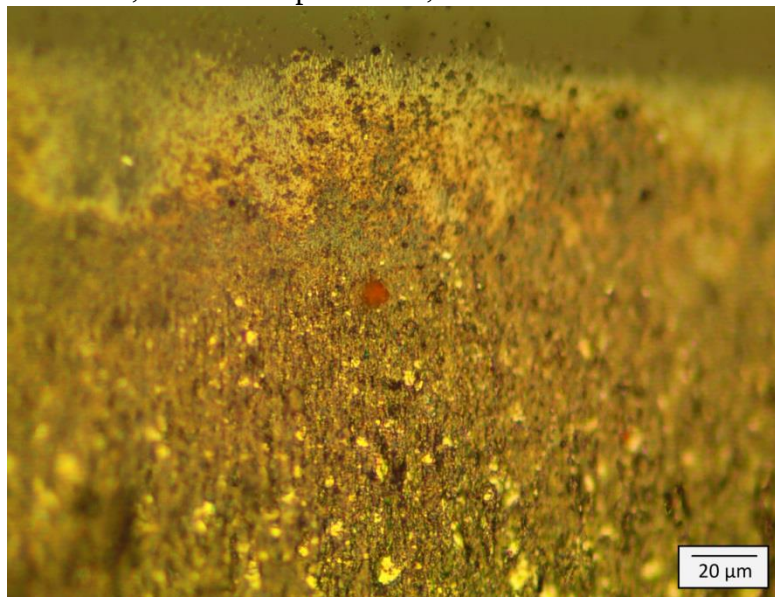
Figura 70 - Anel mediano, 470 h de experimento, aumento de 100x



Fonte: Próprio autor

Com 720 horas no fim da vida útil da engrenagem foi encontrado partículas com oxidação, são partículas pequenas, menor que 10 μm , e avermelhadas. Pode ser vista no centro da Figura 71.

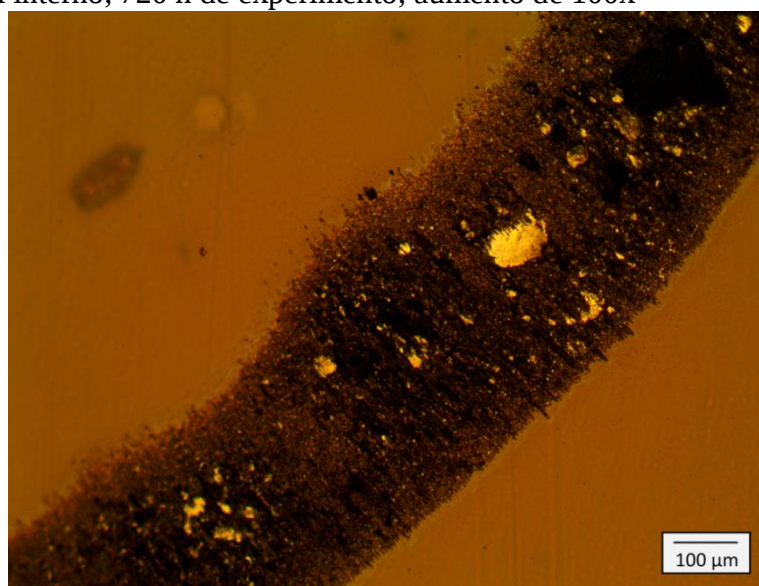
Figura 71 - Anel mediano, 720 h de experimento, aumento de 500x



Fonte: Próprio autor

O número de partículas por fadiga da superfície e desgaste severo aumentou em relação aos últimos ferrogramas. Isto é um indicativo do fim da vida útil e está demonstrado na Figura 72.

Figura 72 - Anel interno, 720 h de experimento, aumento de 100x

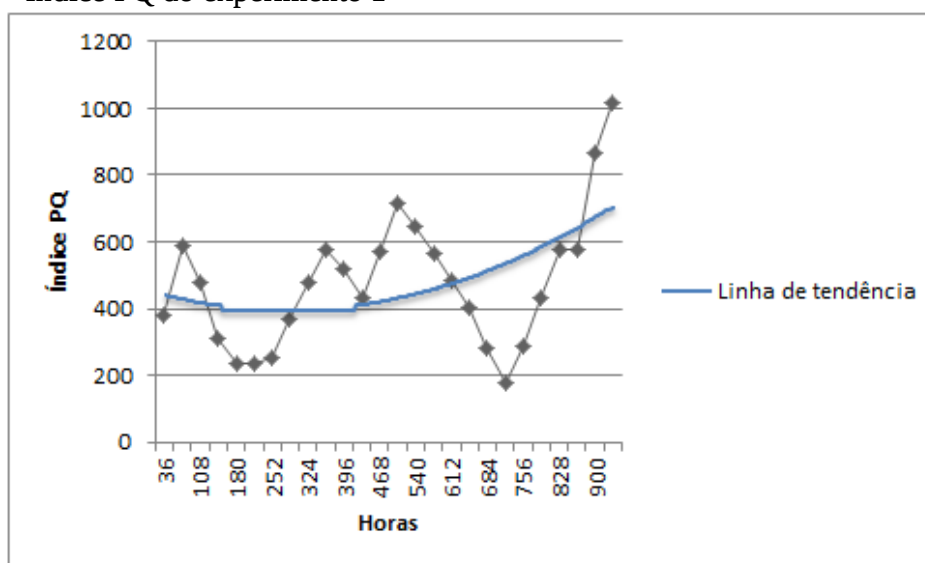


Fonte: Próprio autor

5.1.7.2 Contagem de partículas

As amostras do PQA para contagem das partículas magnéticas foram coletadas a cada 36 horas. Foi feita 10 leituras de cada amostra e com isso seu o índice PQ calculado. Na Figura 73 está o gráfico do índice PQ pelas horas do experimento. Em azul a linha de tendência do tipo exponencial de segunda ordem.

Figura 73 - Índice PQ do experimento 1

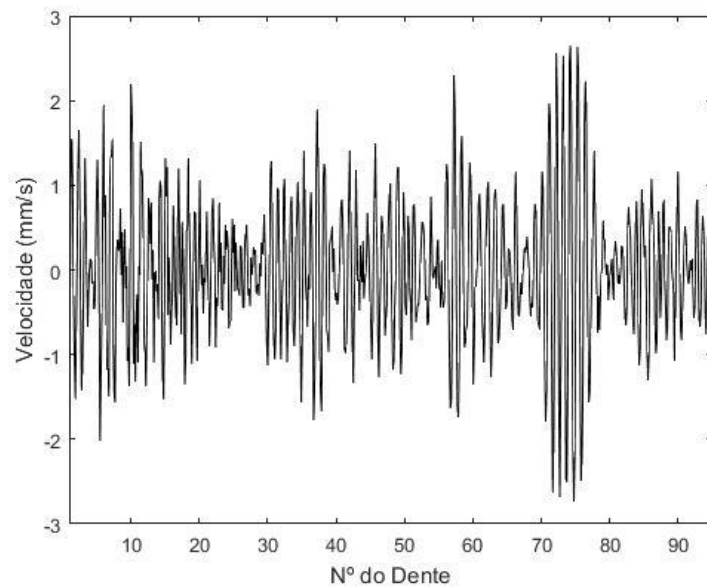


Fonte: Próprio autor

5.2 EXPERIMENTO 2

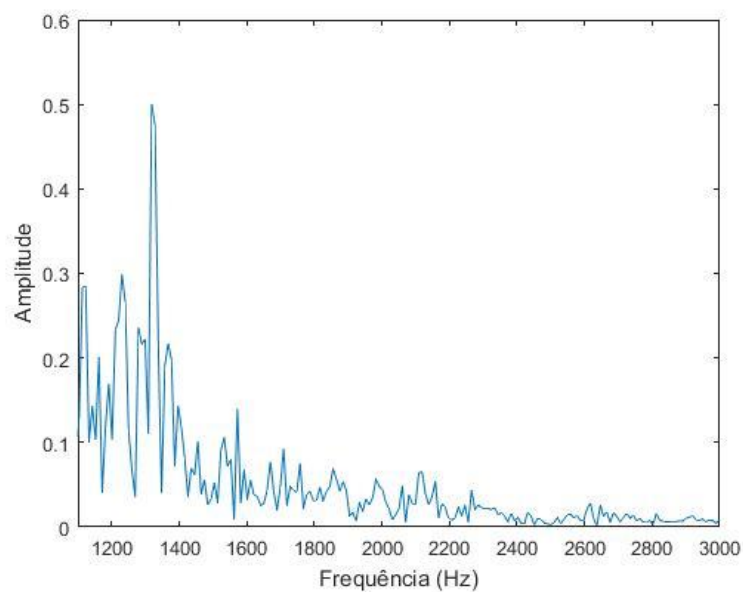
O objetivo desta seção é a análise da trinca por fadiga no dente da engrenagem. A técnica de processamento de sinal de vibração descritas no Capítulo 2, transformada contínua de wavelet, é aplicada aos sinais de vibração da engrenagem entalhada.

A Figura 74 mostra a média temporal síncrona (TSA) do sinal de vibração com 18 horas de experimento.

Figura 74 - TSA sinal de 18 horas

Fonte: Próprio autor

Observa-se alterações no padrão de vibração do sinal, mas esta indicação não é muito clara. Após realizar a transformada de Fourier do sinal, o espectro em frequência é plotado na Figura 75. Pela transformada contínua de wavelet (CWT) foi feito o filtro do sinal, do tipo passa alta na frequência de corte de 1100 Hz, mantendo o harmônico principal deste trabalho que é a frequência de engrenamento, que pode ser observado em aproximadamente 1300 Hz.

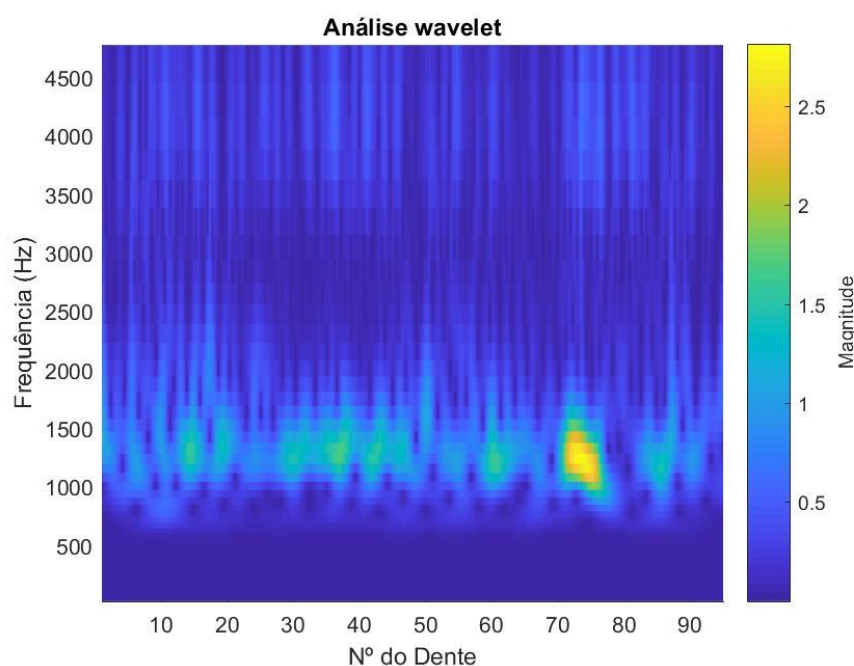
Figura 75 - Espectro em frequência do sinal

Fonte: Próprio autor

A CWT da TSA é calculada usando a wavelet mãe de Morlet e seus mapas tempo-frequência plotados. Em todos os sinais deste experimento observa-se um pico na análise de wavelet entre os dentes 70 e 80.

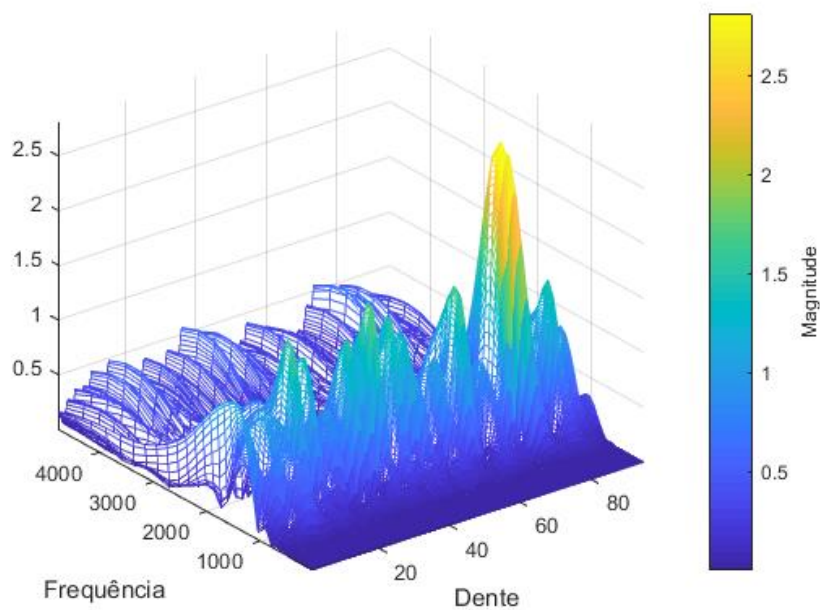
A localização do dente entalhado pode ser obtida por uma inspeção da seção transversal da engrenagem e a contagem dos dentes, neste experimento é o dente 74. Analisando a Figura 76 é possível distinguir claramente os efeitos do dente trincado na região do pico 74.

Figura 76 - 8 h de experimento

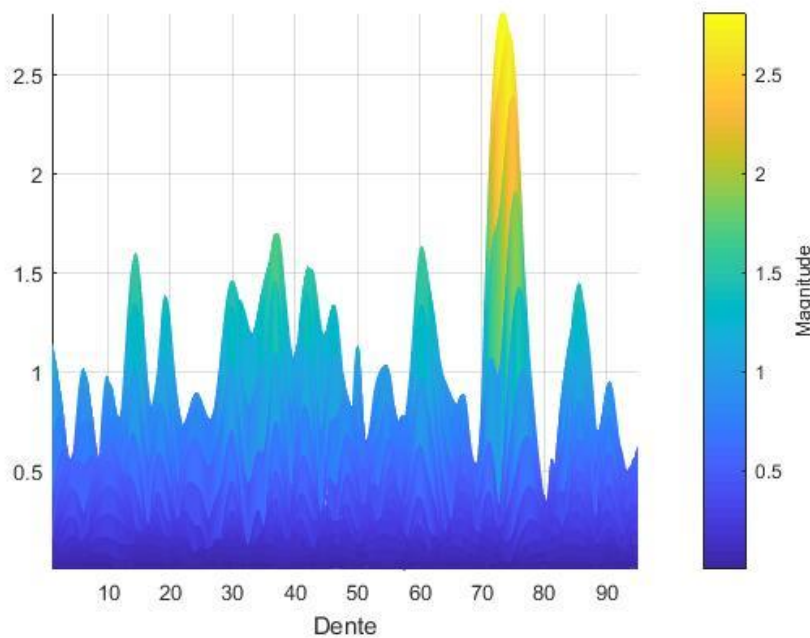


Fonte: Próprio autor

Na análise de wavelet é possível trabalhar com outros tipos de gráficos, podendo ser em 3 dimensões ou alterando seus eixos, como visto nas Figura 77 e Figura 78.

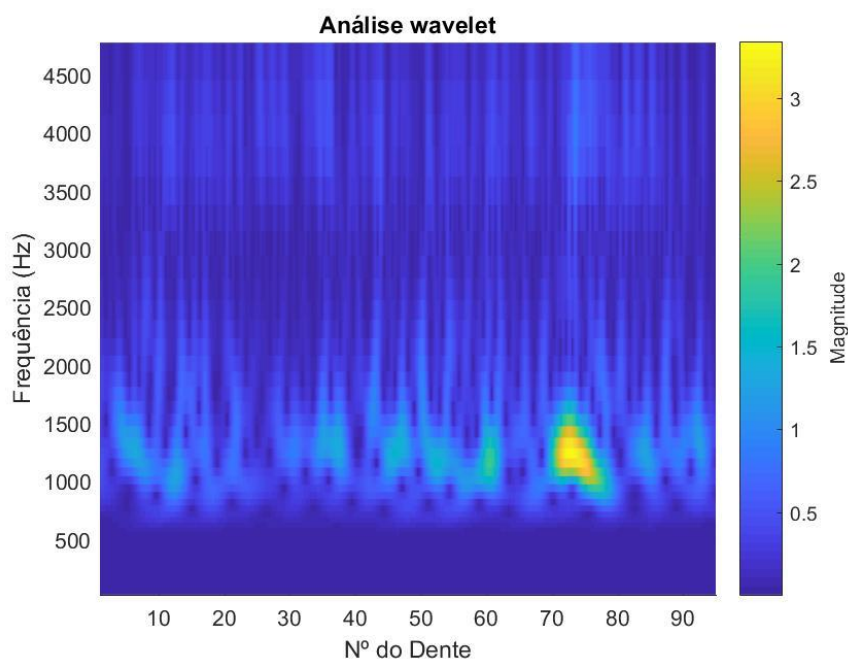
Figura 77 - Plotagem da análise em 3D

Fonte: Próprio autor

Figura 78 - Plotagem da análise em 2D

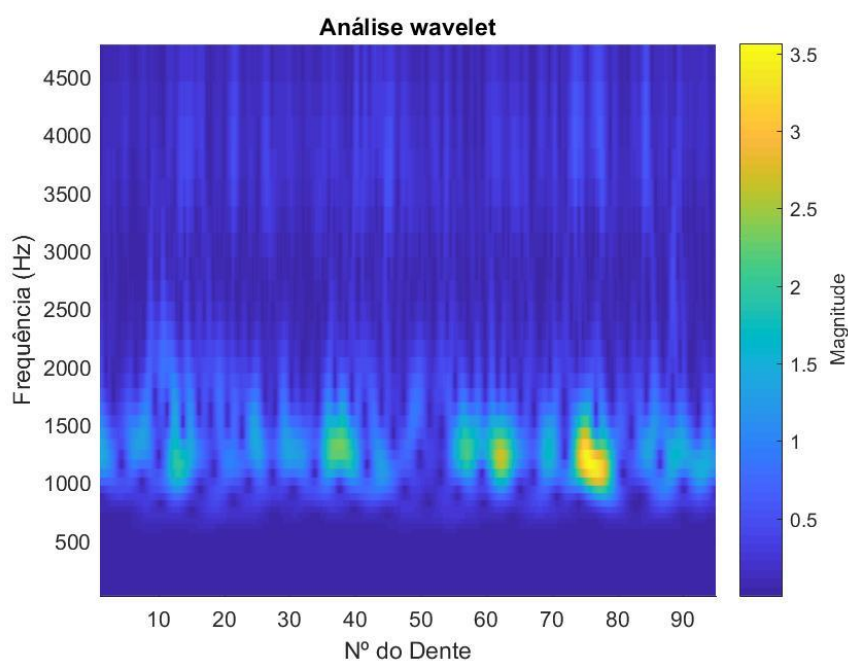
Fonte: Próprio autor

O experimento continuou para visualizar a propagação da trinca a partir do entalhe. Nas Figura 79 e Figura 80 temos a análise com 150 e 300 horas de experimento, respectivamente.

Figura 79 - 150 horas de experimento

Fonte: Próprio autor

Durante todo experimento foi possível observar um aumento progressivo da magnitude na região do entalhe. Mas a propagação da trinca não foi observada, este aumento provavelmente é devido ao desgaste no dente. Este desgaste começou a aparecer nos picos dos outros dentes e pode ser observado na Figura 80.

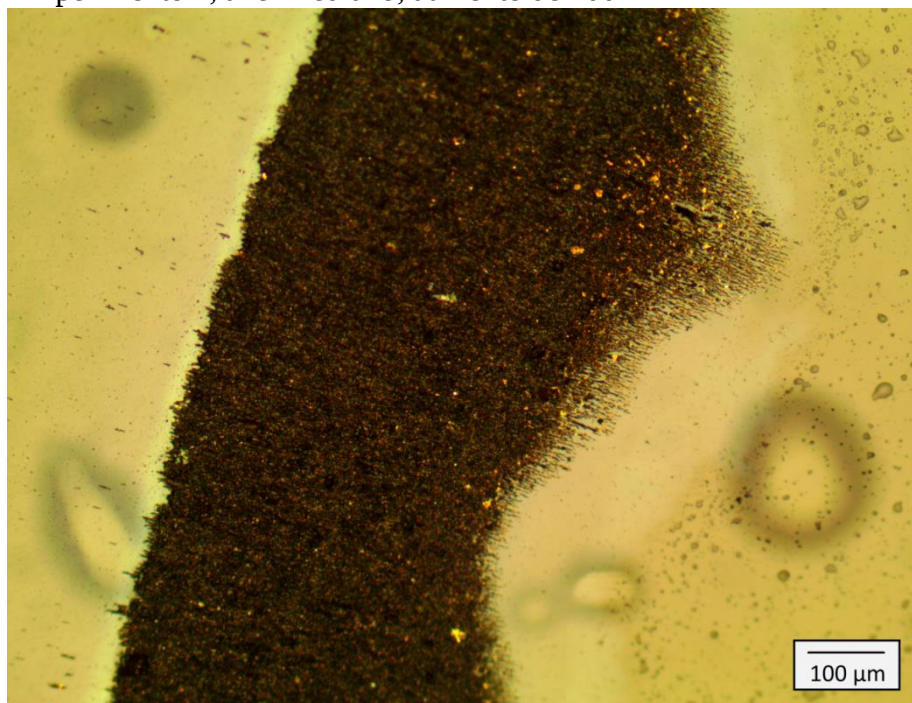
Figura 80 - 300 horas de experimento

Fonte: Próprio autor

5.2.1 Análise das partículas de desgaste

As partículas encontradas no segundo experimento representam em sua maioria desgastes por atrito e com pequenas quantidades de partículas de desgaste por fadiga da superfície. Essas partículas são típicas do período de amaciamento do par engrenado e não foi possível identificar partículas diferentes do comum que pudesse ser relacionada ao entalhe no dente ou propagação de trincas. As Figura 81, Figura 82 e Figura 83 são do segundo experimento com diferentes ampliações.

Figura 81 - Experimento 2, anel mediano, aumento de 100x

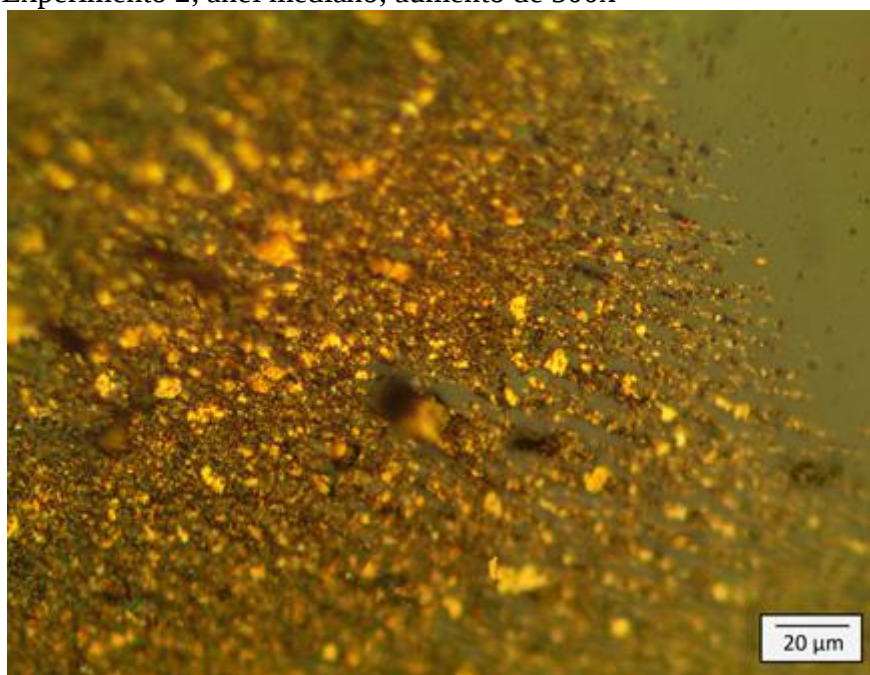


Fonte: Próprio autor

Na Figura 81 com ampliação de 100 vezes, as partículas pequenas e escuras são as provenientes do desgaste por atrito, sendo possível verificar o seu alinhamento magnético. As partículas maiores e mais claras são provenientes do desgaste por fadiga da superfície.

Na Figura 82 com ampliação de 500 vezes, estão as partículas formadas pelo desgaste por atrito.

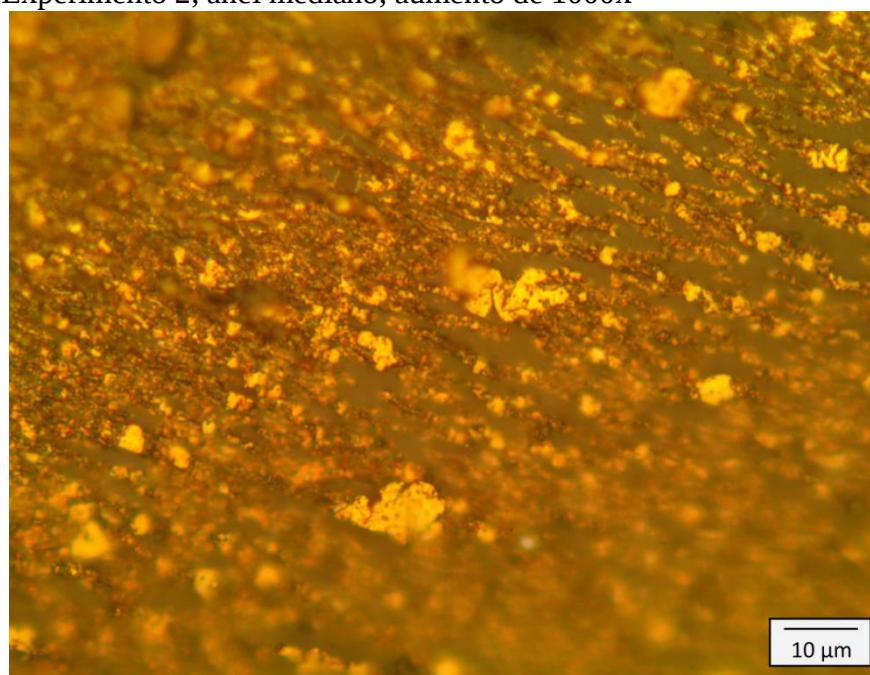
Figura 82 - Experimento 2, anel mediano, aumento de 500x



Fonte: Próprio autor

Na Figura 83 com ampliação de 1000 vezes é possível ver com mais clareza as partículas formadas pelo desgaste por atrito.

Figura 83 - Experimento 2, anel mediano, aumento de 1000x



Fonte: Próprio autor

6 CONCLUSÕES

A análise de vibrações pela técnica da transformada contínua de wavelet se mostrou excelente para análise do sinal no plano tempo-frequência. Ao ser aplicada em uma engrenagem, ela indicou a presença de defeitos nos dentes.

O experimento 1 representou toda vida útil de uma engrenagem, a análise vibrações foi feita e as características da curva da banheira foram encontradas de duas formas. A primeira na análise das informações geradas e a segunda com as magnitudes máximas da wavelet.

No fim da vida útil da engrenagem, a análise de wavelet indicou um dente com um pico de magnitude diferenciando-o dos demais. Ao parar o experimento e ser feita a análise visual deste dente, ele estava com um desgaste acentuado, em estado muito mais avançado que os demais.

Ao comparar a análise de wavelet com a função densidade probabilidade beta que mostrou-se sensível ao identificar danos nas engrenagens no trabalho de Silva (2015), a análise de wavelet obteve um resultado semelhante com a vantagem de mostrar as informações dos danos em frequência.

No segundo experimento com a presença de um dente entalhado, a técnica mostrou-se sensível indicando-o durante todo o experimento.

Com a indicação de diferentes danos em dentes da engrenagem, este trabalho confirma que a análise de wavelet é sensível e precisa para analisar danos pontuais em engrenagens.

Outra função que a transformada contínua de wavelet se destacou foi utilizando-a como filtro dos sinais. Como ela trabalha no plano tempo-frequência, é possível criar filtros do tipo passa-banda tanto no tempo quanto na frequência, sendo uma excelente ferramenta para processamento de sinais.

Pela análise de wavelet não foi possível diferenciar o tipo de dano ocorrido no dente, para ela os danos ocorridos nos dois experimentos foram identificados, mas o tipo de dano é o mesmo.

A ferrografia mostrou-se uma ótima ferramenta para analisar as partículas de desgaste presente do óleo. Observando o tamanho, cor e formato é possível descobrir a causa dos desgastes e ter uma referência de onde está ocorrendo.

O primeiro experimento apresentou as características esperadas da curva da banheira, um início com muitas partículas por atrito, no meio uma estabilização da quantidade de

partículas e no fim da vida útil um aumento considerável de partículas provenientes de fadiga e desgaste severo.

As partículas observadas no segundo experimento possuem as mesmas características do experimento anterior, em sua maioria partículas formadas pelo atrito e por fadiga da superfície, não sendo possível observar partículas com características provenientes do entalhe ou de uma possível propagação da trinca.

6.1 TRABALHOS FUTUROS

Para trabalhos futuros em relação ao par engrenado recomenda-se a utilização de engrenagens com dentes maiores, facilitando a fadiga por flexão e a propagação das trincas. Outra indicação é não utilizar um redutor/multiplicador industrializado, criar a própria carcaça facilitando a visualização, monitoramento e coleta das amostras do par engrenado.

Em relação à análise de vibrações, para uma melhor precisão e indicação do dente defeituoso, um equipamento de aquisição de sinal com melhores especificações é necessário, sendo possível ler mais pontos e ter mais informações do sinal gerado por cada dente.

Em relação à análise de óleo, recomenda-se a utilização de mais técnicas e equipamentos, para uma futura comprovação da correlação entre as análises de óleo e vibrações.

REFERÊNCIAS

- AMERICAN GEAR MANUFACTURERS ASSOCIATION. **2101**: fundamental rating factors and calculation methods for involute spur and helical gear teeth (metric edition). D04 ed. [S.l.]: Agma, 2016.
- AMERICAN GEAR MANUFACTURERS ASSOCIATION. **390.03**: gear handbook gear classification, materials and measuring methods for bevel, hypoid, fine pitch wormgearing and racks only as unassembled gears (partial revision by 2000-a88 for spur, helical and master gears). 80 ed. [S.l.]: Agma, 1980. 69 p.
- AMERICAN GEAR MANUFACTURERS ASSOCIATION. **908**: geometry factors for determining the pitting resistance and bending strength of spur, helical and herringbone gear Teeth. B89 ed. [S.l.: s.n.], 2015.
- AMERICAN GEAR MANUFACTURERS ASSOCIATION. ANSI/AGMA **1010**: appearance of gear teeth - terminology of wear and failure. F14 ed. [S.l.: s. n.], 2014.
- ARATO JUNIOR, A. **Manutenção preditiva usando análise de vibrações**. Barueri: Manole, 2004. 190 p.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE MANUTENÇÃO. **DN 2013**: documento nacional 2013: a situação da manutenção no Brasil. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE MANUTENÇÃO, 28., 2013, Salvador. **Congresso brasileiro de manutenção**, Salvador: [s.n.], 2013.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS- ABNT. **NBR 5462**: confiabilidade e manutenibilidade. Rio de Janeiro, 1994. 37 p.
- BEYLKIN, G.; COIFMAN, R.; ROKHLIN, V. Fast wavelet transforms and numerical algorithms I. **Communications On Pure And Applied Mathematics**, v. 44, n. 2, p. 141-183, mar. 1991. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1002/cpa.3160440202>>. Acesso em: 18 jan. 2018.
- BONNARDOT, F. et al. Use of the acceleration signal of a gearbox in order to perform angular resampling (with limited speed fluctuation). **Mechanical Systems And Signal Processing**, v. 19, n. 4, p. 766-785, jul. 2005. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.ymssp.2004.05.001>>. Acesso em: 18 jan. 2018.
- BRANDÃO, J. A. et al. Calculation of gear tooth flank surface wear during an FZG micropitting test. **Wear**, v. 311, n. 1-2, p. 31-39, mar. 2014. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.wear.2013.12.025>>. Acesso em: 18 jan. 2018.
- BRECHOT, P. et al. Micropitting resistant industrial gear oils with balanced performance. **Industrial Lubrication And Tribology**, v. 52, n. 3, p.125-136, jun. 2000. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1108/00368790010371762>>. Acesso em: 18 jan. 2018.
- BUDYNAS, R. G.; NISBETT, J. K. **Elementos de máquinas de shigley**: projeto de engenharia mecânica. 8. ed. Porto Alegre: Amgh, 2011. 1084 p.

CUNHA, R. C. **Análise do estado de conservação de um redutor de velocidade através da técnica de partículas de desgaste no óleo lubrificante auxiliada pela análise de vibrações**. 2005. 185 f. Dissertação (Mestrado)- Faculdade de Engenharia, Universidade Estadual Paulista- UNESP, Ilha Solteira, 2005.

DALPIAZ, G.; MENEGHETTI, U. Monitoring fatigue cracks in gears. **Ndt & e International**, v. 24, n. 6, p. 303-306, dez. 1991. Disponível em: <[http://dx.doi.org/10.1016/0963-8695\(91\)90003->](http://dx.doi.org/10.1016/0963-8695(91)90003->)l. Acesso em: 18 jan. 2018.

DOMINGUES, M.O. et al. Explorando a transformada wavelet contínua. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, v. 38, n. 3, p.1-19, set. 2016. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1590/1806-9126-rbef-2016-0019>>. Acesso em: 18 jan. 2018.

DRAGO, R. J.; CUNNINGHAM, R. J.; CYMBALA, S. The anatomy of a micropitting induced tooth fracture failure - causation, initiation, progression and prevention. **Gear Technology**, Indianapolis, v. 1, n. 1, p. 63-69, jun. 2010.

FORSTHOFFER, W. E. **Preventive and predictive maintenance best practices: forsthoffer's best practice handbook for rotating machinery**. [S.l.]: Elsevier, 2011. p. 563-576. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/b978-0-08-096676-2.10011-6>>. Acesso em: 18 jan. 2018.

GABOR, D. Theory of communication the analysis of information. **Journal of The Institution Of Electrical Engineers**, v. 93, n. 26, p. 429-441, nov. 1946. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1049/ji-3-2.1946.0074>>. Acesso em: 18 jan. 2018.

GOHAR, R., RAHNEJAT, H. **Fundamentals of tribology**. Londres: London Imperial College Press, 2008. 391 p.

JOST, H. P. Tribology; origin and future. **Wear**, v. 136, n. 1, p.1-17, fev. 1990. Disponível em: <[http://dx.doi.org/10.1016/0043-1648\(90\)90068-l](http://dx.doi.org/10.1016/0043-1648(90)90068-l)>. Acesso em: 18 jan. 2018.

KAHRAMAN, A.; BAJPAI, P.; ANDERSON, N. E. Influence of tooth profile deviations on helical gear wear. **Journal Of Mechanical Design**, v. 127, n. 4, p. 656-663, maio 2005. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1115/1.1899688>>. Acesso em: 18 jan. 2018.

KATTELUS, J.; MIETTINEN, J.; LEHTOVAARA, A. Detection of gear pitting failure progression with on-line particle monitoring. **Tribology International**, v. 118, p. 458-464, fev. 2018. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.triboint.2017.02.045>>. Acesso em: 26 fev. 2018.

KAUPPI, P. k; YLINEN, P. **Make maintenance meaningful**. Ppi: Pulp & Paper International, 2005. p. 17-20.

LAGO, D. F. **Manutenção de redutores de velocidade pela integração das técnicas preditivas de análise de vibrações e análise de óleo lubrificante**. 2007. 180 f. Dissertação (Mestrado)- Faculdade de Engenharia, Universidade Estadual Paulista- UNESP, Ilha Solteira, 2007.

LIN, D.C.; GOLNARAGHI, M. f.; ISMAIL, F. The dimension of the gearbox signal. **Journal Of Sound And Vibration**, v. 208, n. 4, p. 664-670, dez. 1997. Disponivel em: <<http://dx.doi.org/10.1006/jsvi.1997.1212>>. Acesso em: 18 jan. 2018.

LIN, S. T. ; MCFADDEN, P. D. Gear vibration analysis by b-spline wavelet-based linear wavelet transform. **Mechanical Systems And Signal Processing**, v. 11, n. 4, p. 603-609, jul. 1997. Disponivel em: <<http://dx.doi.org/10.1006/mssp.1997.0097>>. Acesso em: 18 jan. 2018.

MANG, T.; LINGG, G. Base Oils. **Lubricants And Lubrication**. [S.l.]: Wiley-VCH Verlag GmbH & Co, 2017. p. 51-82. Disponivel em: <<http://dx.doi.org/10.1002/9783527645565.ch4>>. Acesso em: 18 jan. 2018.

MCFADDEN, P. D. Detecting fatigue cracks in gears by amplitude and phase demodulation of the meshing vibration. **Journal Of Vibration Acoustics Stress And Reliability In Design**, v. 108, n. 2, p. 165-170, 01 abr. 1986. Disponivel em: <<http://dx.doi.org/10.1115/1.3269317>>. Acesso em: 18 jan. 2018.

MCFADDEN, P. D. A revised model for the extraction of periodic waveforms by time domain averaging. **Mechanical Systems And Signal Processing**, v. 1, n. 1, p. 83-95, jan. 1987. Disponivel em: <[http://dx.doi.org/10.1016/0888-3270\(87\)90085-9](http://dx.doi.org/10.1016/0888-3270(87)90085-9)>. Acesso em: 18 jan. 2018.

MCFADDEN, P. D.; TOOZHY, M. M. Application of synchronous averaging to vibration monitoring of rolling element bearings. **Mechanical Systems And Signal Processing**, v. 14, n. 6, p. 891-906, nov. 2000. Disponivel em: <<http://dx.doi.org/10.1006/mssp.2000.1290>>. Acesso em: 18 jan. 2018.

MOBLEY, R. K. Benefits of predictive maintenance. **An Introduction To Predictive Maintenance**, p. 60-73, 2002. Disponivel em: <<http://dx.doi.org/10.1016/b978-075067531-4/50004-x>>. Acesso em: 18 jan. 2018.

PARKER, M. Discrete and fast fourier transforms (DFT, FFT). **Digital Signal Processing**, , v. 101, , p. 99-115, 2017. Disponivel em: <<http://dx.doi.org/10.1016/b978-0-12-811453-7.00010-x>>. Acesso em: 18 jan. 2018.

PREDKI, W.; NAZIFI, K.; LÜTZIG, G. Micropitting of big gearboxes: influence of flank modification and surface roughness. **Gear Technology**, v. 1, n. 1, p. 42-46, maio 2011

PRUDHOM, A. et al. Time-frequency vibration analysis for the detection of motor damages caused by bearing currents. **Mechanical Systems And Signal Processing**, v. 84, p. 747-762, fev. 2017. Disponivel em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.ymssp.2015.12.008>>. Acesso em: 18 jan. 2018.

QU, Y. et al. A new acoustic emission sensor based gear fault detection approach. **International Journal Of Prognostics And Health Management**, Chicago, v. 4, n. 11, p. 1-14, 2013.

RABINOWICZ, E. **Friction and wear of materials**. 2. ed. [S.l.]: John Wiley & Sons, 2013. 336 p.

- ROESCH, W. J. Using a new bathtub curve to correlate quality and reliability. **Microelectronics Reliability**, v. 52, n. 12, p. 2864-2869, dez. 2012. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.microrel.2012.08.022>>. Acesso em: 18 jan. 2018.
- SHENG, S. Wind turbine micropitting workshop: a recap. **National Renewable Energy Lab.**, v. 1, n. 1, p. 1-52, 1 fev. 2010. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.2172/972512>>. Acesso em: 18 jan. 2018.
- SILVA, D. G. da. **Diagnóstico de falha em redutores de velocidade submetidos a variação de potência**. 2001. 294 f. Dissertação (Mestrado)- Faculdade de Engenharia, Universidade Estadual Paulista- UNESP, Ilha Solteira, 2001.
- SILVA, E. F. M. S. **Investigação de técnicas para o acompanhamento do desgaste de um par engrenado utilizando tribologia**. 2015. 136 f. Dissertação (Mestrado)- Faculdade de Engenharia, Universidade Estadual Paulista- UNESP, Ilha Solteira, 2015.
- SNIDLE, R. W. et al. Understanding scuffing and micropitting of gears. **The Control And Reduction Of Wear In Military Platforms**, Cardiff, v. 14, p. 1-18, jun. 2003.
- SNIDLE, R. W.; EVANS, H. P.; ALANOU, M. P. **Gearing tribology.**, [S.l.: s.n.], 2003. p. 575-588. (Tribology Series). Disponível em: <[http://dx.doi.org/10.1016/s0167-8922\(03\)80171-2](http://dx.doi.org/10.1016/s0167-8922(03)80171-2)>. Acesso em: 18 jan. 2018.
- SPANGENBERG, U.; FRÖHLING, R. D.; ELS, P. S. The effect of rolling contact fatigue mitigation measures on wheel wear and rail fatigue. **Wear**, v. 398-399, p. 56-68, mar. 2018.. <http://dx.doi.org/10.1016/j.wear.2017.11.012>.
- STOETERAU, R. L. **Apostila de tribologia**. Florianópolis: Centro Tecnológico Departamento de Engenharia Mecânica, 2004. 179 p.
- WANG, W. J.; MCFADDEN, P. D. Application of orthogonal wavelets to early gear damage detection. **Mechanical Systems And Signal Processing**, v. 9, n. 5, p. 497-507, set. 1995. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1006/mssp.1995.0038>>. Acesso em: 18 jan. 2018.
- WOJCIECHOWSKI, L.; WIECZOROWSKI, M.; MATHIA, T. G. Transition from the boundary lubrication to scuffing: the role of metallic surfaces morphology. **Wear**, v. 392-393, p. 39-49, dez. 2017. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.wear.2017.09.011>>. Acesso em: 18 jan. 2018.
- WOLFF, J. Heisenberg's observability principle: studies in history and philosophy of science part b. **Studies in History and Philosophy of Modern Physics**, v. 45, p. 19-26, fev. 2014. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.shpsb.2013.11.006>>. Acesso em: 18 jan. 2018.
- ZENG, H.; LAN, T.; CHEN, Q. Five and four-parameter lifetime distributions for bathtub-shaped failure rate using perks mortality equation. **Reliability Engineering & System Safety**, v. 152, p. 307-315, ago. 2016. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.ress.2016.03.014>>. Acesso em: 18 jan. 2018.

ANEXOS

PROJETO DA ENGRENAGEM

A equação para a tensão flexional para unidades SI está abaixo:

$$\sigma = F_t K_o K_v K_s \frac{1}{b.m_t} \frac{K_H K_B}{Y_J} \quad [\text{N/mm}^2] \quad (11)$$

Pela norma 2101-D04 da ANSI/AGMA (2016), a força tangencial transmitida é dada pela equação (12), P é a potência transmitida em kW e v_t é a velocidade de engrenamento expressa na equação (13):

$$F_t = \frac{1000 \cdot P}{v_t} \quad [\text{N}] \quad (12)$$

$$v_t = \frac{\pi \cdot \omega_p \cdot d_p}{60000} \quad [\text{m/s}] \quad (13)$$

Sendo a potência transmitida de 1,55 kW, d_p o diâmetro primitivo do pinhão de 44 mm e ω_p a velocidade de rotação do pinhão de 1800 rpm temos que a força tangencial transmitida (F_t) é de 373,7 N.

K_o é o fator de sobrecarga e para rotações constantes seu valor é 1. O fator dinâmico corrige imprecisões na fabricação e no acoplamento do conjunto, e sua equação em m/s é dada por:

$$K_v = \left(\frac{A + \sqrt{200 \cdot v_t}}{A} \right)^B \quad (14)$$

Em que:

$$A = 50 + 56 \cdot (1 - B) \quad (15)$$

$$B = 0,25 \cdot (12 - Q_v)^{2/3} \quad (16)$$

E Q_v é o número de controle de qualidade definida pela norma 390.03 (AGMA, 1980), esse número tem a relação com a tolerância das engrenagens. A maioria das engrenagens comerciais possuem números de qualidade entre 3 e 7, a partir de 8 estão as engrenagens de precisão. Neste trabalho será utilizado Q_v igual a 5.

Resolvendo as equações (14), (15) e (16) foi calculado o fator dinâmico (K_v) com o valor de 1,38 m/s.

O fator de tamanho K_s reflete a não uniformidades das propriedades do material, como a engrenagem é padronizada seu fator de tamanho é igual a 1.

A largura da face (L) é de 11 mm e o módulo métrico (m_t) da engrenagem é 1 mm.

Segundo a 2101-D04 (AGMA, 2016) para refletir a não uniformidade da distribuição de carga no contato dos dentes, utiliza-se o fator de distribuição de carga que modifica as equações de tensão e é dado pela eq. (17):

$$K_H = 1 + C_{mc} \cdot (C_{pf} \cdot C_{pm} + C_{ma} \cdot C_e) \quad (17)$$

Para dentes sem coroamento o fator de correção de carga (C_{mc}) é igual a 1 e para pequenos intervalos entre mancais (C_{pm}) é 1.

O fator de proporção do pinhão (C_{pf}) para a largura de face (L) menor que 25 mm é calculado pela equação (18), como o calculado foi menor que 0,05 a norma pede para utilizar o fator de proporção do pinhão igual a 0,05:

$$C_{pf} = \frac{L}{10d_p} - 0,0375 + 0,000492L \quad (18)$$

O fator de alinhamento de engrenamento (C_{ma}):

$$C_{ma} = A + B.b + C.b^2 \quad (19)$$

Cujas constantes empíricas A , B e C conforme a norma 2101-D04 (AGMA, 2016) para unidades fechadas comerciais no SI é, $A=0,127$, $B=0,000622$ e $C=-1,69 \cdot 10^{-7}$ e valor do fator de alinhamento de engrenamento (C_{ma}) é 0,133.

E o fator de correção do alinhamento de engrenamento (C_e) para engrenamento não ajustado na montagem é igual a 1, com isso é possível calcular o fator de distribuição de carga (K_H) da equação (17) e seu valor é de 1,184.

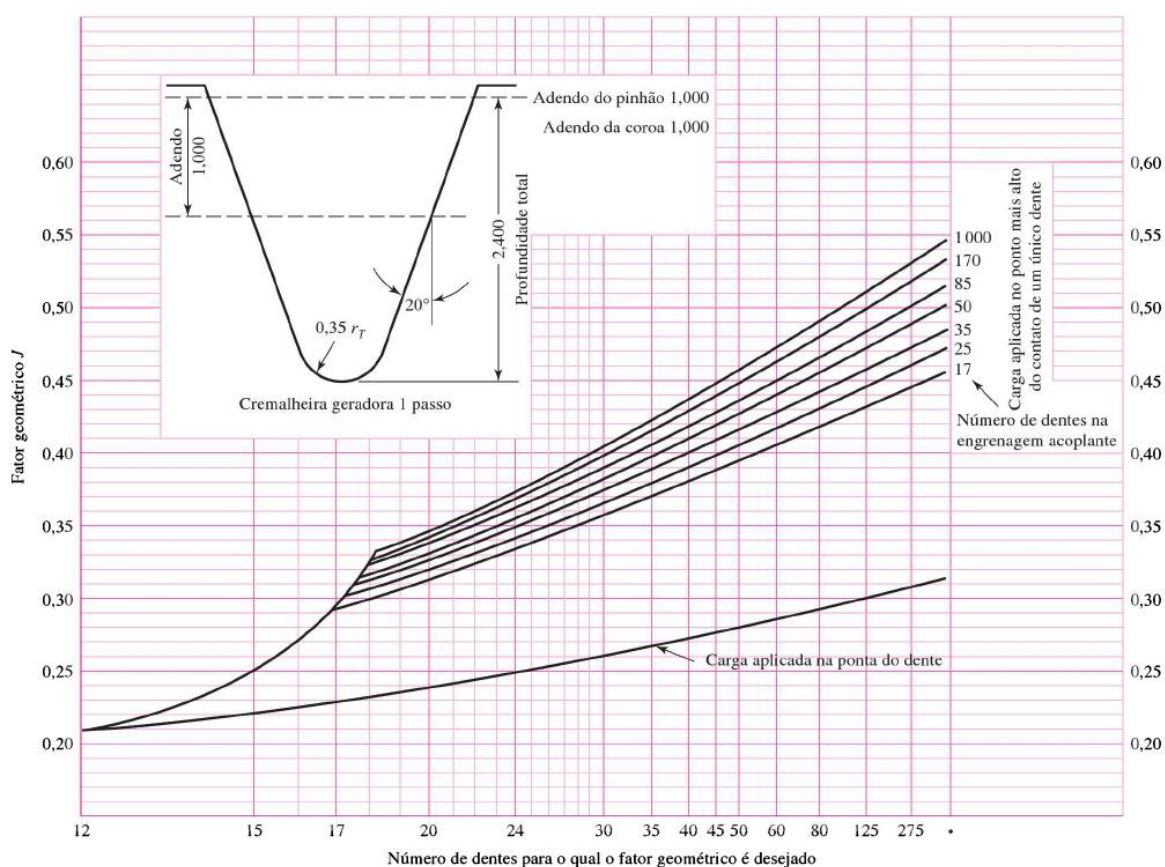
O fator de espessura de borda K_B ajusta a tensão para engrenagens de borda fina, para seu cálculo é preciso determinar a razão de reforço m_B disponível na equação (20), na qual t_R é a espessura da borda do dente e h_t é a altura do dente:

$$m_B = \frac{t_R}{h_t} \quad (20)$$

Como a borda da engrenagem não é fina e $m_B > 1$ o fator de espessura de borda K_B é 1.

Pela norma 908-B89 da (AGMA, 2015) será calculado o fator geométrico da resistência à flexão (Y_J) que é uma razão de compartilhamento de carga no dente e seu valor para cada engrenagem é dado pela análise de um gráfico da norma 2101-D04 (AGMA, 2016), que está representado na Figura 84:

Figura 84 - Gráfico para cálculo do fator geométrico da resistência à flexão



Fonte: Budynas e Nisbett (2011)

Para o pinhão com 44 dentes, o valor do fator geométrico da resistência à flexão (J_p) é de 0,28 e para coroa com 95 dentes (J_c) é de 0,29.

Com o apresentado acima é possível calcular a tensão flexional da equação (11) cujo valor é de 198,76 N/mm² para o pinhão e 191,91 N/mm² para a coroa.

Fator de segurança Flexional

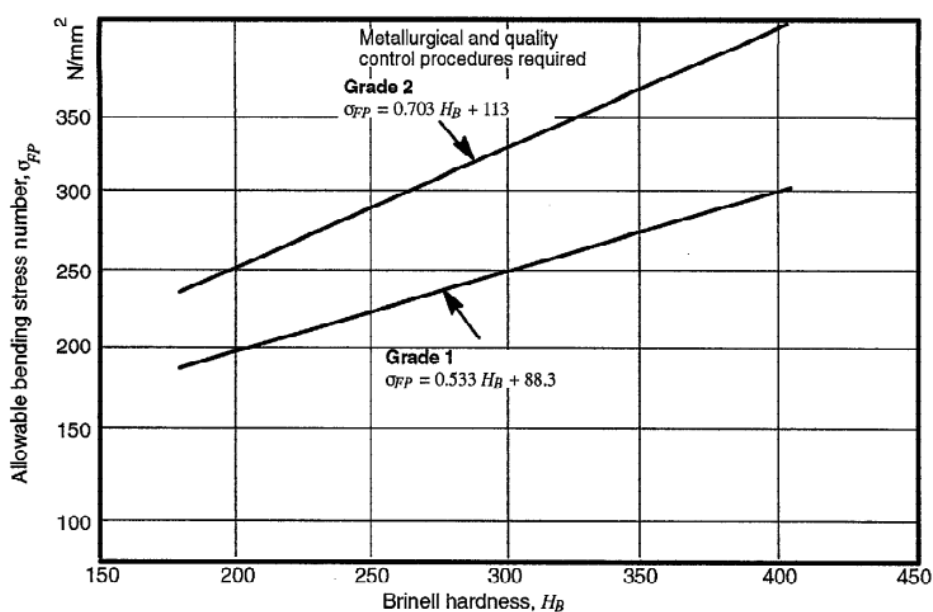
O fator de segurança de resguardo contra a falha por fadiga flexional (S_F) e o foram definidos pela norma AGMA 2101-D04 e estão representados nas equações (21) e (22):

$$S_F = \frac{S_t Y_N}{K_T K_R \sigma} \quad (21)$$

$$S_H = \left(\frac{S_C Z_N C_H}{K_T K_R \sigma_c} \right)^2 \quad (22)$$

O material da engrenagem é um aço 1045 com dureza Brinell de 220 H_B , a equação (23) representa seu número de tensão admissível (S_t) e é determinado pela norma AGMA 2101-D04 e pelas características do material, pela análise gráfica da Figura 85 temos a equação (23) e seu valor de 205,56 N/mm².

Figura 85 - Gráfico para cálculo do número de tensão admissível

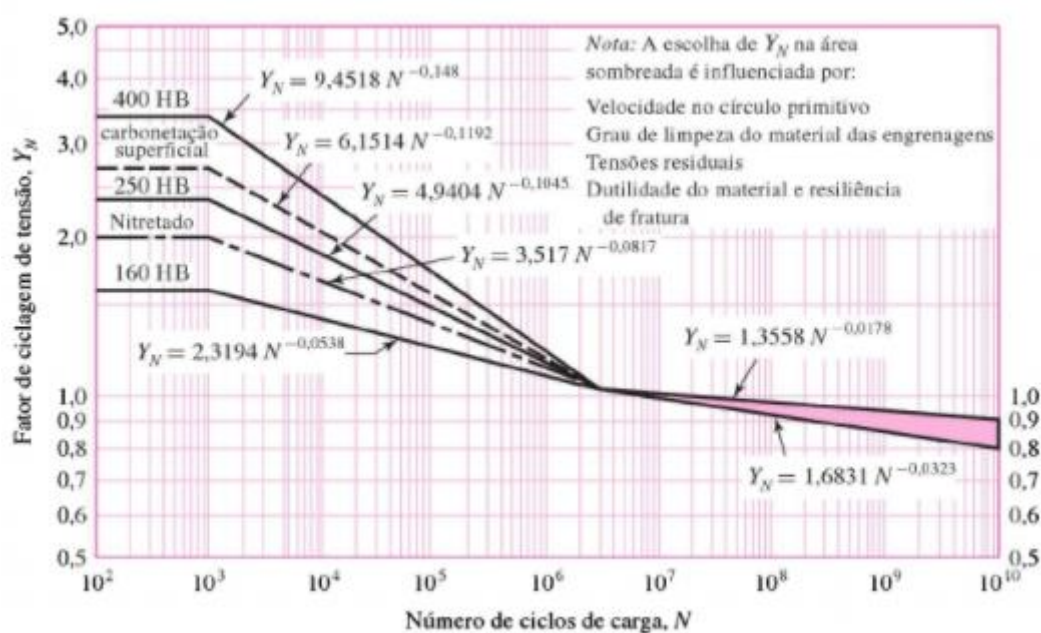


Fonte: Agma 2101 (2016).

$$S_t = 2,22.H_b + 200 \quad (23)$$

Conforme a AGMA 2101-D04, para determinar o fator de ciclagem de tensão Y_N para a resistência de flexão sob carregamento repetido, pela análise gráfica da Figura 86 para um número de ciclos de 10^7 temos a equação (24) e o valor de Y_N de 0,98:

Figura 86 - Fator de ciclagem de tensão



Fonte: Budynas e Nisbett (2011).

$$Y_N = 1,3558 \cdot N^{-0,0178} \quad (24)$$

O fator de temperatura K_T para engrenagens com temperatura menores que 120°C é igual 1 e o fator de confiabilidade K_R é determinado conforme a AGMA 2101-D04 e para uma confiabilidade de 99 %, seu valor é determinado pela equação (25) e seu valor é de 1,01.

$$K_R = 0,50 - 0,109 \cdot \ln(1 - R) \quad (25)$$

Com o calculado acima é possível determinar o fator de segurança de resguardo contra a falha por fadiga flexional (S_F) da equação (21) e o valor encontrado foi de 0,96 para o

pinhão e 0,98 para a coroa, não atendendo o critério de segurança como desejado para estimar a vida útil.