

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

“MANUTENÇÃO DE REDUTORES DE VELOCIDADE PELA INTEGRAÇÃO DAS TÉCNICAS PREDITIVAS DE ANÁLISE DE VIBRAÇÕES E ANÁLISE DE ÓLEO LUBRIFICANTE”

Daniel Fabiano Lago

Orientador: Prof. Dr. Aparecido Carlos Gonçalves

Dissertação apresentada à Faculdade de Engenharia - UNESP – Campus de Ilha Solteira, para obtenção do título de Mestre em Engenharia Mecânica.
Área de Conhecimento: Mecânica dos Sólidos

Ilha Solteira – SP

Novembro/2007

FICHA CATALOGRÁFICA

Elaborada pela Seção Técnica de Aquisição e Tratamento da Informação
Serviço Técnico de Biblioteca e Documentação da UNESP - Ilha Solteira.

L177m	<p>Lago, Daniel Fabiano</p> <p>Manutenção de redutores de velocidade pela integração das técnicas preditivas de análise de vibrações e análise de óleo lubrificante / Daniel Fabiano Lago. -- Ilha Solteira : [s.n.], 2007</p> <p>179 f. : il., fots. (algumas color.)</p> <p>Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual Paulista. Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira. Área de conhecimento: Mecânica dos Sólidos, 2007</p> <p>Orientador: Aparecido Carlos Gonçalves</p> <p>Bibliografia: p. 175-179</p> <p>1. Tribologia. 2. Óleos lubrificantes. 3. Mecânica dos sólidos. 4. Desgaste mecânico.</p>
-------	--

CERTIFICADO DE APROVAÇÃO

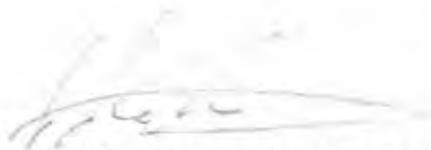
TÍTULO: Manutenção de Redutores de Velocidade pela Integração das Técnicas Preditivas de Análise de Vibrações e Análise de Óleo Lubrificante

AUTOR: DANIEL FABLANO LAGO

ORIENTADOR: Prof. Dr. APARECIDO CARLOS GONÇALVES

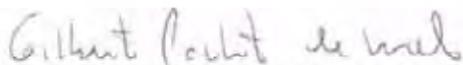
DATA DA REALIZAÇÃO: 13 DE NOVEMBRO DE 2007

Aprovada com parte das exigências para obtenção do Título de MESTRE em ENGENHARIA MECÂNICA pela Comissão Examinadora:



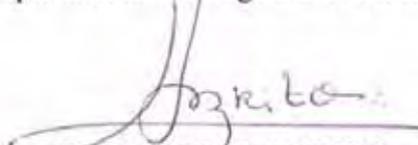
Prof. Dr. APARECIDO CARLOS GONCALVES

Departamento de Engenharia Mecânica / Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira



Prof. Dr. GILBERTO PECHOTO DE MELO

Departamento de Engenharia Mecânica / Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira



Prof. Dr. JORGE NEI BRITO

Departamento de Engenharia Mecânica / Universidade Federal de São João Del Rei

AGRADECIMENTOS

Ao Prof. Dr. Aparecido Carlos Gonçalves, pelos valiosos ensinamentos, dedicação, amizade e postura profissional mostrados nesses anos de orientação, desde os tempos de iniciação científica.

Aos meus pais, Gentil e Ivete, os maiores responsáveis por minhas realizações e pelo meu caráter. Ao meu irmão Maciel pelo convívio e afeto.

A todos os professores e funcionários do departamento que de forma direta ou indireta foram envolvidos na realização deste trabalho, em especial a Carlos José Santana pelo apoio técnico dado na realização dos ensaios e demais formas de colaboração.

Aos amigos Fernando Vitoriano Fernandes, Ademir Jacometo de Oliveira, Maria Adriana Tavares e Eduardo Augusto Florêncio Mega que sempre estiveram ao meu lado durante esta caminhada.

A CAPES pelo fomento dado a esta pesquisa.

Muito Obrigado.
Daniel Fabiano Lago

RESUMO

LAGO, D. F. Manutenção de redutores de velocidade pela integração das técnicas preditivas de análise de vibrações e análise de óleo lubrificante, Ilha Solteira, Departamento de Engenharia Mecânica, Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira, Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho” – Unesp. 154p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica).

Todo sistema ou equipamento mecânico está sujeito a processos de deterioração. Esta deterioração leva ao aparecimento de defeitos que podem atrapalhar a continuidade e qualidade do serviço (produção). Uma quebra não prevista traduz-se por uma parada brusca, levando geralmente a grandes prejuízos e a perda de tempo de produção. Para evitar paradas inesperadas eficientemente e reduzir os custos de manutenção são utilizadas técnicas de manutenção preditiva. Entre todas as técnicas existentes, as mais importantes na manutenção de redutores são a análise de vibrações e a análise de partículas de desgaste. A determinação da severidade, modos e tipos de desgaste em máquinas pode ser feita pela identificação da morfologia, acabamento superficial, coloração, natureza, quantidade e tamanho das partículas encontradas em amostras de óleo ou graxas. Pela análise do sinal vibratório é possível tomar decisões de intervir ou não na operação da máquina, aumentando a disponibilidade e confiabilidade da mesma. A integração destas técnicas tem o potencial para revolucionar práticas industriais e proporcionar para as companhias um significativo alívio econômico. Para estudo destas duas técnicas, neste trabalho foi construída uma bancada experimental com o propósito de se realizar a manutenção preditiva em um redutor de velocidades. O Sistema foi posto para funcionar até o limite de utilização. Foram utilizados lubrificantes recomendados pelo fabricante do redutor, lubrificantes com contaminação líquida em várias porcentagens e lubrificantes com contaminação sólida em duas porcentagens. Foram observadas que para baixas rotações a análise de partículas foi vantajosa em relação à análise de vibrações e que a contaminação por água, embora tenha ocasionado uma maior oxidação do sistema, proporcionou menor desgaste do que o lubrificante sem contaminação.

Palavras Chaves: Manutenção preditiva, análise de vibrações, partículas de desgaste, ferrografia, óleo lubrificante, redutor de velocidades.

ABSTRACT

LAGO, D. F. Maintenance of Reducers integrating vibration and oil analysis predictive techniques, Ilha Solteira, Departamento de Engenharia Mecânica, Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira, Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho” – Unesp. 154p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica).

Every system or mechanical equipment is subject to deterioration processes. This deterioration takes to the apparition of defects that can disturb the continuity and quality of the service (production). One break not foreseen translates for an abrupt stop, usually taking to great damages and waste of time of production. For avoid unexpected stops efficiently and reduce the cost, predictive maintenance techniques are used. Among all the existent techniques, the most important in the maintenance of reducers are vibration analysis and wear particle analysis. The determination of the severity, wear modes and types in machines can be done through the identification of the morphology, surface finishing, coloration, nature, quantity and size of the particles found in oil samples or lubricating greases. Vibration Analysis is one of the oldest techniques in the maintenance. By vibration sign analysis it is possible to make decisions of intervening or not in the machine operation, improving its availability and reliability. The integration of these techniques has the potential to revolutionize industry practices and provide a significant industrial economic relief. For the study of these two techniques, in this work, an experimental bench was built with the purpose of doing the predictive maintenance in a reducer. The System was put to work until the limit. It was observed that for low rotations the wear particle analysis were advantageous in relation to the vibration analysis and for oil with water contamination, although causing a larger oxidation in the system, a smaller wear than the lubricant without contamination was provided.

Keywords: Predictive maintenance, vibration analysis, wear particle, Ferrography, lubricating oil, spur gear

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1 – Fases da Manutenção Preditiva (ARATO, 2004).	21
Figura 1.2 – Porcentagem de detecção de falhas de rolamentos (MAXWELL e JOHNSON, 1995 citado por GREEN, 2003).	22
Figura 2.1 – Determinação do índice de viscosidade, (BARNES, 2002).	30
Figura 2.2 – Modos de desgaste (KATO e ADASHI, 2001).	32
Figura 2.3 – “Pontos de contato” entre duas superfícies.	33
Figura 2.4 – Desgaste adesivo por <i>scuffing</i> nos dentes da engrenagem (GREEN, 2003).	34
Figura 2.5 – Compatibilidade baseado no diagrama de fases binárias, (RABINOWICZ, 1980).	35
Figura 2.6 – Modos de desgaste abrasivo de 2 e 3 corpos (STACHOWIAK e BATCHELOR, 2005).	37
Figura 2.7 – Desgaste abrasivo de material dúctil (KATO e ADASHI, 2001).	37
Figura 2.8 – Micrografia do desgaste abrasivo por deformação plástica (JOSEPH, 1992).	38
Figura 2.9 – Desgaste corrosivo x Tempo: como formação de filme na superfície (RABINOWICZ, 1980).	39
Figura 2.10 – Desgaste corrosivo x Tempo: sem formação de filme na superfície (RABINOWICZ, 1980).	39
Figura 2.11 – Formação e escamação da camada de óxido (RABINOWICZ, 1980).	39
Figura 2.12 – Diagrama esquemático da Espectrografia de Absorção Atômica.	46
Figura 2.13 – Exemplo de um Código ISO obtido, (PARKER, 2000).	48
Figura 2.14 – Fotografia de plugues magnéticos utilizados na contagem de partículas.	50
Figura 2.15 – Gráficos da concentração de partículas de desgaste (WPC) pelo tempo (BARONI e GOMES, 2004).	52
Figura 2.16 – Evolução do desgaste dos elementos de uma máquina (BIBVIRT, 2004).	52
Figura 2.17 – Faixas limítrofes dos tamanhos das partículas,(BIBVIRT, 2004).	53
Figura 2.18 – Obtenção de ferrograma.	54
Figura 2.19 – Distribuição esquemática das partículas sobre a lâmina do RPD.	54
Figura 2.20 – Partículas benignas típicas do desgaste por atrito vistas no microscópio ótico (KITTIWAKE, 2004).	57
Figura 2.21 – Partículas típicas do desgaste por atrito vistas no microscópio eletrônico de varredura (KITTIWAKE, 2004).	57
Figura 2.22 – Partículas típicas do desgaste severo por deslizamento. As partículas exibem estrias na superfície (KITTIWAKE, 2004).	58

Figura 2.23 – Partículas típicas do desgaste por corte (KITTIWAKE, 2004).	58
Figura 2.24 – Partículas de fadiga por engrenamento (KITTIWAKE, 2004).	59
Figura 2.25 – Partículas típicas de fadiga de rolamento (KITTIWAKE, 2004).	60
Figura 2.26 – Partículas laminar causadas por fadiga de rolamento vista em microscópio ótico (KITTIWAKE, 2004).	61
Figura 2.27 – Partículas de cobre vista em microscópio ótico (KITTIWAKE, 2004).	62
Figura 2.28 – Partícula de bronze vista em microscópio ótico (KITTIWAKE, 2004).	62
Figura 2.29 – Partícula de cromo vista em microscópio ótico (KITTIWAKE, 2004).	63
Figura 2.30 – Partícula de níquel vista em microscópio ótico (KITTIWAKE, 2004).	63
Figura 2.31 – Partícula de alumínio vista em microscópio ótico (KITTIWAKE, 2004).	64
Figura 2.32 – Partículas de desgaste de óxido vermelho formadas por deslizamento, visualizadas em luz bi cromática (LOCKWOOD e DALLEY , 1992).	64
Figura 2.33 – Partículas de óxido de ferro vermelho (LOCKWOOD e DALLEY , 1992).	65
Figura 2.34 – Partículas de óxido-metálico escuro (LOCKWOOD e DALLEY , 1992).	65
Figura 2.35 – Partículas de óxido preto (LOCKWOOD e DALLEY , 1992).	66
Figura 2.36 – Partículas não metálicas (KITTIWAKE, 2004).	66
Figura 2.37 – Sinal Vibratório no domínio do tempo (GREEN, 2003).	70
Figura 2.38 – Valores globais de medida de vibração para um sinal complexo (ARATO, 2004).	71
Figura 2.39 – Condições de engrenagens utilizando TSA (GOLDMAN, 1991 citado por GREEN, 2003)	73
Figura 2.40 – Sinal vibratório no domínio da frequência (GREEN, 2003).	73
Figura 2.41 – Obtenção da transformada rápida de fourier.	75
Figura 2.42 – Espectro de frequência de uma engrenagem de dentes retos em operação normal.	76
Figura 2.43 – Espectro de frequência de uma engrenagem com dente desgastado.	77
Figura 2.44 – Espectro de frequência de uma engrenagem desalinhada.	77
Figura 2.45 – Espectro de frequência de uma engrenagem com dentre trincado ou fraturado.	77
Figura 2.46 – Planos de medidas.	78
Figura 2.47 – Cadeia de medição utilizada para aquisição do sinal vibratório.	79
Figura 2.48 – Acelerômetro.	79
Figura 2.49 – Gráficos mostrando situação de ressonância.	86
Figura 3.1 – Bancada de ensaio para verificação das técnicas estudadas.	91
Figura 3.2 – Mancal utilizado na montagem da bancada.	92
Figura 3.3 – Pontos de coletas dos sinais de vibrações.	94

Figura 3.4 – <i>Worksheet</i> utilizado na obtenção do sinal temporal e do valor eficaz da velocidade de vibração.	95
Figura 3.5 – <i>Worksheet</i> utilizado no processamento do sinal temporal.	95
Figura 3.6 – <i>Worksheet</i> utilizado na medida da severidade de vibração (um filtro de 10Hz e outro de 1000Hz).	96
Figura 4.1 – Amostras do óleo ISO 320 utilizando luz transmitida.	100
Figura 4.2 – Partículas de desgaste presentes no óleo após a terceira semana do óleo ISO 320. Luz Refletida. (I) anel interno, e (M) anel intermediário.	101
Figura 4.3 – Amostras do óleo ISO 68 visualizadas com luz refletida após a última semana de teste.	102
Figura 4.4 – Amostras do óleo ISO 320 acrescido de 0,4 gramas de pó de ferro, visualizadas com luz refletida.	102
Figura 4.5 – Amostras do óleo ISO 320 acrescido de 0,8 gramas de pó de ferro, visualizadas com luz refletida.	103
Figura 4.6 – Espectro do ponto 3 para diferentes frequências e diferentes filtros.	104
Figura 4.7 – Evolução da severidade de vibração medida pela NBR 10082.	104
Figura 4.8 – Foto mostrando o desgaste na coroa após o segundo teste (com óleo ISO 68).	104
Figura 4.9 – Elementos internos do redutor de velocidades.	105
Figura 4.10 – Partícula de desgaste gerada no ensaio A. Foto do anel interno do RPD.	106
Figura 4.11 – Partículas de desgaste geradas no ensaio A. Fotos do anel interno do RPD.	106
Figura 4.12 – Partículas de desgaste gerada no ensaio A. Fotos do anel médio do RPD.	107
Figura 4.13 – Partículas de desgaste geradas no ensaio A. Fotos do anel externo do RPD.	107
Figura 4.14 – Partículas de desgaste geradas no ensaio A. Fotos do anel interno do RPD.	108
Figura 4.15 – Partícula de desgaste gerada no ensaio A. Foto do anel interno do RPD.	108
Figura 4.16 – Partículas de desgaste geradas no ensaio A. Fotos do anel médio do RPD.	109
Figura 4.17 – Partículas de desgaste geradas no ensaio A. Fotos do anel externo do RPD.	109
Figura 4.18 – Partículas de desgaste geradas no ensaio A. Fotos do anel interno do RPD.	110
Figura 4.19 – Partículas de desgaste geradas no ensaio A. Fotos do anel interno do RPD.	111
Figura 4.20 – Partículas de desgaste geradas no ensaio A. Fotos do anel interno do RPD.	111
Figura 4.21 – Partículas de desgaste geradas na quarta semana do ensaio A. Fotos do anel interno do RPD.	112
Figura 4.22 – Partículas de desgaste geradas na quarta semana do ensaio A. Fotos do anel médio do RPD.	113
Figura 4.23 – Partículas de desgaste geradas na quarta semana do ensaio A. Fotos do anel médio do RPD.	113
Figura 4.24 – Partículas de desgaste geradas na quarta semana do ensaio A. Fotos do anel externo do RPD.	114
Figura 4.25 – Elementos internos do redutor de velocidades após o primeiro ensaio.	115

Figura 4.26 – Partículas de desgaste geradas na primeira semana do ensaio B. Fotos do anel interno do RPD.	116
Figura 4.27 – Partículas de desgaste geradas na primeira semana do ensaio B. Fotos do anel médio do RPD.	117
Figura 4.28 – Partículas de desgaste geradas na primeira semana do ensaio B. Fotos do anel externo do RPD.	118
Figura 4.29 – Partículas de desgaste geradas na segunda semana do ensaio B. Fotos do anel interno do RPD.	119
Figura 4.30 – Partículas de desgaste geradas na segunda semana do ensaio B. Fotos do anel interno do RPD.	120
Figura 4.31 – Partículas de desgaste geradas na segunda semana do ensaio B. Fotos do anel interno do RPD.	120
Figura 4.32 – Partículas de desgaste geradas na segunda semana do ensaio B. Fotos do anel médio do RPD.	121
Figura 4.33 – Partículas de desgaste geradas na segunda semana do ensaio B. Fotos do anel externo do RPD.	122
Figura 4.34 – Partículas de desgaste geradas na terceira semana do ensaio B. Fotos do anel interno do RPD.	123
Figura 4.35 – Partículas de desgaste geradas na terceira semana do ensaio B. Fotos do anel médio do RPD.	124
Figura 4.36 – Partículas de desgaste geradas na terceira semana do ensaio B. Fotos do anel externo do RPD.	125
Figura 4.37 – Partículas de desgaste geradas na quarta semana do ensaio B. Fotos do anel interno do RPD.	126
Figura 4.38 – Partículas de desgaste geradas na quarta semana do ensaio B. Fotos do anel médio do RPD.	127
Figura 4.39 – Partículas de desgaste geradas na quarta semana do ensaio B. Fotos do anel externo do RPD.	127
Figura 4.40 – Elementos internos do redutor de velocidades após o segundo ensaio.	128
Figura 4.41 – Oxidação dos parafusos e da caixa do redutor.	128
Figura 4.42 – Partículas de desgaste geradas na primeira semana do ensaio C.	129
Figura 4.43 – Partículas de desgaste geradas na primeira semana do ensaio C.	130
Figura 4.44 – Partículas de desgaste geradas na primeira semana do ensaio C.	131
Figura 4.45 – Partículas de desgaste geradas na segunda semana do ensaio C.	132
Figura 4.46 – Partículas de desgaste geradas na segunda semana do ensaio C.	133
Figura 4.47 – Elementos internos do redutor de velocidades após o terceiro ensaio.	134
Figura 4.48 – Aspecto visual dos óleos dos três ensaios.	135
Figura 4.49 – Rolamento do redutor desmontado para verificar possível falha.	135
Figura 4.50 – Espectros de vibração obtidos no ponto 2 na primeira semana do Ensaio A.	136

Figura 4.51 – Espectros de vibração obtidos no ponto 3 na primeira semana do Ensaio A.	137
Figura 4.52 – Espectros de vibração obtidos no ponto 5 na primeira semana do Ensaio A.	137
Figura 4.53 – Espectros de vibração obtidos no ponto 7 na primeira semana do Ensaio A.	138
Figura 4.54 – Espectros de vibração obtidos no ponto 2 na segunda semana do Ensaio A.	139
Figura 4.55 – Espectros de vibração obtidos no ponto 3 na segunda semana do Ensaio A.	140
Figura 4.56 – Espectros de vibração obtidos no ponto 5 na segunda semana do Ensaio A.	140
Figura 4.57 – Espectros de vibração obtidos no ponto 7 na segunda semana do Ensaio A.	141
Figura 4.58 – Espectros de vibração obtidos no ponto 2 na terceira semana do Ensaio A.	142
Figura 4.59 – Espectros de vibração obtidos no ponto 3 na terceira semana do Ensaio A.	143
Figura 4.60 – Espectros de vibração obtidos no ponto 5 na terceira semana do Ensaio A.	143
Figura 4.61 – Espectros de vibração obtidos no ponto 7 na terceira semana do Ensaio A.	144
Figura 4.62 – Espectros de vibração obtidos no ponto 2 na quarta semana do Ensaio A.	145
Figura 4.63 – Espectros de vibração obtidos no ponto 3 na quarta semana do Ensaio A.	146
Figura 4.64 – Espectros de vibração obtidos no ponto 5 na quarta semana do Ensaio A.	146
Figura 4.65 – Espectros de vibração obtidos no ponto 7 na quarta semana do Ensaio A.	147
Figura 4.66 – Espectros de vibração obtidos no ponto 2 na primeira semana do Ensaio B.	148
Figura 4.67 – Espectros de vibração obtidos no ponto 3 na primeira semana do Ensaio B.	149
Figura 4.68 – Espectros de vibração obtidos no ponto 5 na primeira semana do Ensaio B.	149
Figura 4.69 – Espectros de vibração obtidos no ponto 7 na primeira semana do Ensaio B.	150
Figura 4.70 – Espectros de vibração obtidos no ponto 2 na segunda semana do Ensaio B.	151
Figura 4.71 – Espectros de vibração obtidos no ponto 3 na segunda semana do Ensaio B.	152
Figura 4.72 – Espectros de vibração obtidos no ponto 5 na segunda semana do Ensaio B.	152
Figura 4.73 – Espectros de vibração obtidos no ponto 7 na segunda semana do Ensaio B.	153
Figura 4.74 – Espectros de vibração obtidos no ponto 2 na terceira semana do Ensaio B.	154
Figura 4.75 – Espectros de vibração obtidos no ponto 3 na terceira semana do Ensaio B.	155
Figura 4.76 – Espectros de vibração obtidos no ponto 5 na terceira semana do Ensaio B.	155
Figura 4.77 – Espectros de vibração obtidos no ponto 7 na terceira semana do Ensaio B.	156
Figura 4.78 – Espectros de vibração obtidos no ponto 2 na quarta semana do Ensaio B.	157
Figura 4.79 – Espectros de vibração obtidos no ponto 3 na quarta semana do Ensaio B.	158
Figura 4.80 – Espectros de vibração obtidos no ponto 5 na quarta semana do Ensaio B.	158
Figura 4.81 – Espectros de vibração obtidos no ponto 7 na quarta semana do Ensaio B.	159
Figura 4.82 – Espectros de vibração obtidos no ponto 2 na primeira semana do Ensaio C.	160
Figura 4.83 – Espectros de vibração obtidos no ponto 3 na primeira semana do Ensaio C.	161
Figura 4.84 – Espectros de vibração obtidos no ponto 5 na primeira semana do Ensaio C.	161
Figura 4.85 – Espectros de vibração obtidos no ponto 7 na primeira semana do Ensaio C.	162

Figura 4.86 – Espectros de vibração obtidos no ponto 2 na segunda semana do Ensaio C.	163
Figura 4.87 – Espectros de vibração obtidos no ponto 3 na segunda semana do Ensaio C.	164
Figura 4.88 – Espectros de vibração obtidos no ponto 5 na segunda semana do Ensaio C.	164
Figura 4.89 – Espectros de vibração obtidos no ponto 7 na segunda semana do Ensaio C.	165
Figura 4.90 – Evolução da severidade de vibração.	166
Figura 4.91 – Espectro do sinal demodulado.	167
Figura 4.92 – Espectro do sinal demodulado.	168
Figura 4.93 – Espectro do sinal demodulado.	169

LISTA DE TABELAS

Tabela 1.1 – Vantagens e desvantagens dos tipos de manutenção.	20
Tabela 1.2 – Convivência dos métodos de análise para várias condições de máquinas (TROYER, 1999 citado por GREEN, 2003).	23
Tabela 2.1 – Taxa de desgaste do material de maior dureza, (BOOSE, 1984).	36
Tabela 2.2 – Intervalos recomendados entre inspeções (LOCKWOOD e DALLEY, 1992).	42
Tabela 2.3 – Indicadores típicos do lubrificante: severidades e recomendações (LOCKWOOD e DALLEY, 1992).	43
Tabela 2.4 – Efeitos da mudança da viscosidade.	44
Tabela 2.5 – Classificação e definição pela ISO, (PARKER, 2000).	48
Tabela 2.6 – Tabela referente a ISO 4406, de 1999, (PARKER, 2000).	49
Tabela 2.7 – Classificação das partículas de desgaste, (BIBVIRT 2004).	56
Tabela 2.8 – Indicação de como são identificados algumas partículas, (KITTIWAKE, 2004).	67
Tabela 2.9 – Classificação e avaliação das máquinas por níveis de severidade de vibração.	82
Tabela 2.10 – Faixas de severidade de vibrações conforme NBR 10082 (Banda de 10 a 1000Hz).	83
Tabela 3.1 – Especificação do motor NBR 7094.	91
Tabela 3.2 – Especificação do redutor para uma rotação de 1720rpm na entrada.	92
Tabela 3.3 – Frequências de determinísticas dos rolamentos do motor (SKF, 2004).	92
Tabela 3.4 – Frequências determinísticas do redutor.	92
Tabela 3.5 – Especificação do óleo lubrificante ISO 320, (SCHAEFFOIL, 2004).	93
Tabela 3.6 – Propriedade do óleo lubrificante IRL hidráulico 68.	93
Tabela 3.7 – Equipamentos utilizados na cadeia de medição do sinal vibratório.	97
Tabela 3.8 – Instrumentos utilizados na análise do óleo lubrificante.	98
Tabela 4.1 – Alguns testes realizados no óleo ISO 320 depois de 4 semanas.	101
Tabela 4.2 – Alguns testes realizados no óleo ISO 68 depois de 4 semanas.	102
Tabela 4.3 – Características do pó de ferro.	102
Tabela 4.4 – Demais ensaios realizados no experimento C.	102
Tabela 4.5 – Demais ensaios realizados no experimento com óleo ISO 320 acrescido de 0,8 gramas de pó de ferro.	103
Tabela 4.6 – Ensaios realizados no óleo ao término do ensaio A.	115

Tabela 4.7 – Absorção Atômica realizada no óleo ao término do ensaio A.	115
Tabela 4.8 – Índice PQ obtido no monitor de partículas.	115
Tabela 4.9 – Ensaios realizados no óleo ao término do ensaio B.	127
Tabela 4.10 – Absorção Atômica realizada no óleo ao término do ensaio B.	128
Tabela 4.11 – Índice PQ obtido no monitor de partículas.	128
Tabela 4.12 – Ensaios realizados no óleo ao término do ensaio C.	134
Tabela 4.13 – Absorção Atômica realizada no óleo ao término do ensaio C.	134
Tabela 4.14 – Índice PQ obtido no monitor de partículas.	134
Tabela 4.15 – Valor eficaz das velocidades de vibração e valores da severidade de vibração para a primeira semana do Ensaio A.	138
Tabela 4.16 – Valor eficaz das velocidades de vibração e valores da severidade de vibração para a segunda semana do Ensaio A.	141
Tabela 4.17 – Valor eficaz das velocidades de vibração e valores da severidade de vibração para a terceira semana do Ensaio A.	144
Tabela 4.18 – Valor eficaz das velocidades de vibração e valores da severidade de vibração para a quarta semana do Ensaio A.	147
Tabela 4.19 – Valor eficaz das velocidades de vibração e valores da severidade de vibração para a primeira semana do Ensaio B.	150
Tabela 4.20 – Valor eficaz das velocidades de vibração e valores da severidade de vibração para a segunda semana do Ensaio B.	153
Tabela 4.21 – Valor eficaz das velocidades de vibração e valores da severidade de vibração para a terceira semana do Ensaio B.	156
Tabela 4.22 – Valor eficaz das velocidades de vibração e valores da severidade de vibração para a quarta semana do Ensaio B.	159
Tabela 4.23 – Valor eficaz das velocidades de vibração e valores da severidade de vibração para a primeira semana do Ensaio C.	162
Tabela 4.24 – Valor eficaz das velocidades de vibração e valores da severidade de vibração para a segunda semana do Ensaio C.	165

LISTA DE SÍMBOLOS E ABREVIATURAS

τ	Tensão de cisalhamento [Pa]
η	Viscosidade dinâmica [Pa.s]
$\frac{\partial\gamma}{\partial t}$	Taxa de deformação por cisalhamento
Z	Viscosidade [cSt ou mm ² /s]
ρ	Massa específica
Q	Volume desgastado do material mais dúctil, por unidade de distância percorrida [mm ³ /m]
K	Coefficiente adimensional de desgaste
k	Coefficiente de desgaste [mm ³ /Nm]
W	Carga normal [N]
H	Dureza do corpo mais dúctil [N.m ⁻²]
β	Beta Ratio
y	Eficiência
L	Número de partículas grandes
S	Número de partículas pequenas
PLP	Porcentagem de partículas grandes
χ_m	Valor médio [mm/s]
χ_{RMS}	Valor eficaz ou valor RMS [mm/s]
F_f	Fator de forma
F_C	Fator de crista
T	Período [s]
X(t)	Sinal Temporal
f_r	Frequência de giro do eixo [rps]
N	Número de dentes
f_e	Frequência de engrenamento [rps]
X(f)	Sinal espectral
z(t)	Sinal analítico
A(t)	Envelope

- $\phi(t)$ Fase instantânea
- PQ** Quantidade adimensional de partículas magnéticas
- RPD** Depositador rotativo de partículas
- DEMODO** Rotina computacional sobre plataforma Matlab para demodulação do sinal vibratório.

SUMÁRIO

CAPÍTULO 1 - INTRODUÇÃO	19
1.1 - JUSTIFICATIVA	22
1.2 – OBJETIVOS	24
CAPÍTULO 2 – REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	25
2.1 – ALGUNS TRABALHOS RELACIONADOS.	25
2.2 ÓLEO LUBRIFICANTE	28
2.2.1 Viscosidade	29
2.2.2 Índice de Viscosidade	30
2.3 DESGASTE	31
2.3.1 - Desgaste Adesivo	33
2.3.2 - Desgaste Abrasivo	36
2.3.3 - Desgaste Corrosivo	38
2.3.4 - Desgaste por Fadiga	40
2.4 TESTES FÍSICOS	42
2.4.1 – Monitoramento da Viscosidade	44
2.5 ANÁLISE ESPECTROGRÁFICA DOS METAIS	46
2.6 CONTAGEM DE PARTÍCULAS	48
2.6.1 - Detecção magnética por plug/chip (MCD)	50
2.7 – FERROGRAFIA	50
2.7.1 – Ferrografia Quantitativa	51
2.7.2 – Ferrografia Analítica	53
2.7.2.1 - Construção dos Ferrogramas	53
2.7.2.2 - Visualização dos Ferrogramas	55
2.7.3 - Tipos de Partículas de Desgaste	55
2.7.3.1 - Partículas de Desgaste por Atrito	56
2.7.3.2 - Partículas de Desgaste Severo por Deslizamento	57
2.7.3.3 - Partículas de Desgaste por Corte	58
2.7.3.4 - Partículas de Fadiga	59
2.7.3.5 - Partículas Metálicas não Ferrosas	61
2.7.3.6 - Partículas de Cobre	61
2.7.3.7 - Partículas de Bronze ou Latão	62

2.7.3.8 -Partículas de Cromo	62
2.7.3.9 - Partículas de Níquel	63
2.7.3.10 - Partículas de Alumínio	63
2.7.3.11 Óxidos	64
2.7.3.12 Partículas Misturadas	66
2.8 ANÁLISE DE VIBRAÇÕES	68
2.8.1- Descrição no Domínio do Tempo	70
2.8.1.1 - Média Temporal Síncrona	72
2.8.2 – Descrição no Domínio da Frequência	73
2.8.2.1 - Obtenção do Espectro de frequência	74
2.8.2.2 - Acompanhamento dos espectros de vibração	76
2.8.3 - Coleta dos Dados	77
2.8.4 - Instrumentos de medida	79
2.8.5 - Análise pelo Nível Global de Vibrações	81
2.8.6 - Demodulação	84
2.8.7 - Fontes Vibratórias de uma Máquina	85
2.8.7.1 - Desbalanceamento	86
2.8.7.2 - Desalinhamento	87
2.8.7.3 - Eixo Torto	87
2.8.7.4 - Rolamentos danificados ou inadequados;	87
2.8.7.5 - Vibrações em redutores	88
2.8.7.6 - Vibrações de origem elétricas	90
CAPÍTULO 3 – MATERIAS E MÉTODOS	91
3.1 – ENSAIOS ANTERIORES REALIZADOS NO MESMO REDUTOR	93
3.2 - ENSAIOS REALIZADOS NESTE TRABALHO	94
3.3 - MEDIDAS DE VIBRAÇÕES	94
3.4 - ANÁLISE DOS ÓLEOS	98
CAPÍTULO 4 – RESULTADOS EXPERIMENTAIS	100
4.1 - EXPERIMENTO ANTERIOR	100
4.1.1 - Análise de óleo Lubrificante	100
4.1.2 - Análise de Vibrações	103
4.2 - ENSAIOS REALIZADOS NESTE TRABALHO	105
4.2.1 – Análise de Óleo Lubrificante	105
Ensaio A – Primeira Coleta	106
Ensaio A – Segunda Coleta	108

Ensaio A – Terceira Coleta	110
Ensaio A – Quarta Coleta	112
Ensaio B – Primeira Coleta	116
Ensaio B – Segunda Coleta	119
Ensaio B – Terceira Coleta	123
Ensaio B – Quarta Coleta	126
Ensaio C – Primeira Coleta	129
Ensaio C – Segunda Coleta	132
4.2.2 - Análise de Vibração	136
Ensaio A – primeira semana	136
Ensaio A – segunda semana	139
Ensaio A – terceira semana	142
Ensaio A – quarta semana	145
Ensaio B – primeira semana	148
Ensaio B – segunda semana	151
Ensaio B – terceira semana	154
Ensaio B – quarta semana	157
Ensaio C – primeira semana	160
Ensaio C – segunda semana	163
Frequências Ressonantes e Demodulação	167
CAPÍTULO 5 – ANÁLISE DOS RESULTADOS	170
5.1. Análise dos Óleos	170
5.2. Análise de Vibrações	172
CAPÍTULO 6 – CONCLUSÕES E SUGESTÕES	173
6.1. Conclusões	173
6.2. Sugestões para Trabalhos Futuros	174
CAPÍTULO 7 – REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	175

Capítulo 1

INTRODUÇÃO

Todo sistema ou equipamento mecânico está sujeito a processos de deterioração. Esta deterioração leva ao aparecimento de defeitos que podem atrapalhar a continuidade e qualidade do serviço (produção). Uma quebra não prevista traduz-se por uma parada brusca, geralmente levando a grandes prejuízos e a perda de tempo de produção.

Para que a produtividade de uma indústria, constituída por uma diversidade enorme de máquinas e equipamentos, tenha resultados positivos, é necessário que todos eles sejam mantidos nas melhores condições de funcionamento. Assim, todos esses equipamentos deverão sofrer, ao longo de suas vidas úteis, reparos, inspeções programadas, rotinas preventivas programadas e adequadas, substituição de peças, mudanças de óleo, lubrificações, limpezas, pinturas e correções de defeitos.

O conjunto de todas estas ações constitui aquilo a que se chama manutenção.

Na literatura encontramos algumas divisões da manutenção. A divisão mais utilizada é aquela em dois tipos principais: a **Manutenção Preventiva** e a **Manutenção Corretiva**.

Na **Manutenção Corretiva** efetuam-se reparos e melhorias após a falha do equipamento, esta é uma medida curativa.

Já na **Manutenção Preventiva** tenta-se evitar a falha ao máximo, através de informações do equipamento (dados estatísticos, conhecimentos práticos e informações do fabricante) ou pelo monitoramento deste (utilizando informações de captosres ou fazendo medidas de desgaste).

Dentro da **Manutenção Preventiva** existem duas sub-classes: A **Manutenção Preventiva Sistemática** e a **Manutenção Preventiva Preditiva**. A primeira é baseada no tempo, são utilizados critérios estatísticos (independente do equipamento precisar ou não), esta é mais utilizada, devido sua simplicidade e custos envolvidos. A segunda é baseada na condição, esta é mais complexa e exige além de conhecimento técnico, instrumentação específica para coleta e análise de dados.

Na Tabela 1.1 têm-se as vantagens e desvantagens de se aplicar esses tipos de manutenção.

Tabela 1.1 – Vantagens e desvantagens dos tipos de manutenção.

	Vantagens	Desvantagens
Manutenção Corretiva	<ul style="list-style-type: none"> • não é necessário grande investimento em mão de obra especializada. 	<ul style="list-style-type: none"> • exige grande estoque de peças de reserva; • provoca prejuízo técnico e financeiro; • acarreta perda de produção.
Manutenção Sistemática	<ul style="list-style-type: none"> • aumento da produtividade; • o custo de cada operação de manutenção é predeterminado; • as operações e paradas são programadas de acordo com a produção; • a gestão financeira é simplificada. 	<ul style="list-style-type: none"> • o custo de cada operação é elevado, devido à periodicidade; • existe maior possibilidade de erro humano, dada a frequência de intervenção; • o custo da mão-de-obra é elevado, pois, de um modo geral, estas intervenções são realizadas aos finais de semana; • a desmontagem, ainda que superficial, incita à substituição de peças provocadas pela síndrome de precaução; • o grande número de intervenções aumenta o risco de introdução de novas avarias.
Manutenção Preditiva ou Condicional	<ul style="list-style-type: none"> • aumento da longevidade dos equipamentos; • controle mais eficaz de peças de reserva e sua limitação; • custo menor de reparação; • aumento de produtividade. 	<ul style="list-style-type: none"> • alto investimento inicial em mão de obra especializada; • requer investimento inicial em equipamentos.

Segundo Arato (2004) a prática da manutenção preditiva envolve três fases: detecção do defeito, estabelecimento de um diagnóstico e análise de tendência.

A **detecção do defeito** consiste na observação de que os valores medidos dos parâmetros de controle indicam uma evolução mais acelerada que a decorrente da degradação normal do equipamento.

O **estabelecimento do diagnóstico** é o resultado da análise dos valores dos parâmetros de acompanhamento estabelecido, com base em modelos de desgaste e informações anteriores sobre o equipamento, a origem e a gravidade de seus possíveis defeitos.

A **análise de tendência** consiste em se ampliar o diagnóstico e se prever, na medida do possível, quanto tempo se dispõe antes da parada forçada pela quebra propriamente dita.

Nessa fase, o equipamento é submetido a uma vigilância estrita e se faz a programação do reparo. Na Figura 1.1 tem-se o diagrama evolutivo do processo envolvendo as três fases da manutenção preditiva.

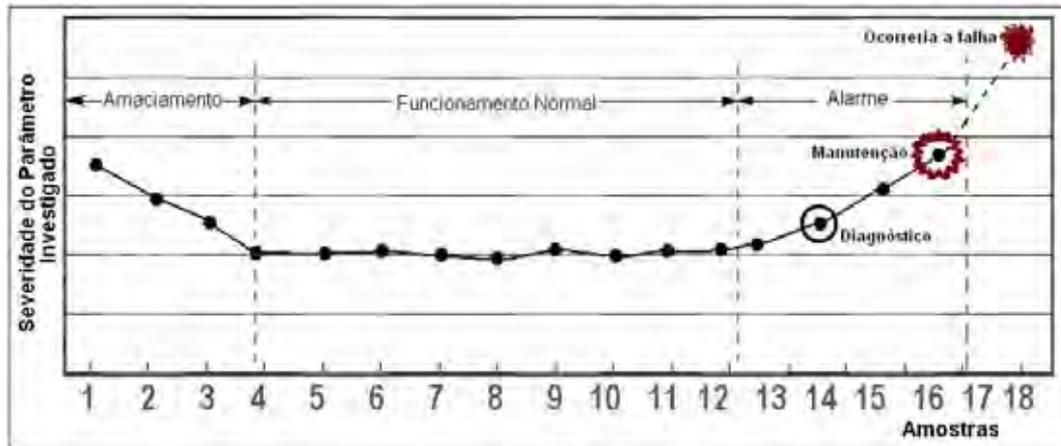


Figura 1.1- Fases da Manutenção Preditiva (ARATO, 2004).

Nestas etapas são utilizadas técnicas e procedimentos que consistem em monitorar os diversos parâmetros que indiquem o estado de conservação dos equipamentos. As principais técnicas para monitoramento são:

- Análise de Vibrações;
- Análise de Óleos;
- Sistemas especialistas;
- Métodos de Observação (exame visual, ultra-som, radiografia, termografia, etc).

Entre essas técnicas as mais importantes na manutenção de redutores são: análise de vibrações e análise de óleo lubrificante.

O princípio de análise das vibrações baseia-se na idéia de que as estruturas das máquinas excitadas pelos esforços dinâmicos (ação de forças) dão sinais vibratórios, cuja frequência é igual à frequência dos agentes excitadores. Um desbalanceamento em um componente de máquina irá causar aumento da vibração, uma vez que provoca um desequilíbrio no sistema e conseqüente aumento da força. Desta forma, observando a evolução do nível de vibrações, é possível obter informações sobre estado da máquina (CUNHA, 2005).

A análise dos óleos permite identificar os primeiros sintomas de desgaste de um componente. A identificação é feita a partir do estudo da quantidade de partículas, tamanho, forma e composição, que fornecem informações precisas sobre as condições das superfícies que estão em movimento sem a necessidade de se desmontar o conjunto. As partículas são

sólidas e geradas pelo atrito dinâmico entre peças as em contato. De acordo com o estudo destas partículas pode-se relacionar as situações de desgastes do conjunto e atribuí-las a condições físicas e químicas (BARRACLOUGH et al.; ANDERSON et al., 1999, 1999). A análise dos óleos é feita por meio de técnicas laboratoriais que envolvem reagentes, instrumentos e equipamentos.

1.1 - JUSTIFICATIVA

Em 1995, um estudo realizado por Maxwell e Johnson discutiu a interação entre os programas de análise de vibrações e análise de óleo lubrificante, neste estudo eles verificaram a capacidade das técnicas em identificar quinze significantes problemas em rolamentos. A Figura 1.2 mostra o percentual de detecção de defeitos para cada técnica de monitoração (GREEN, 2003).

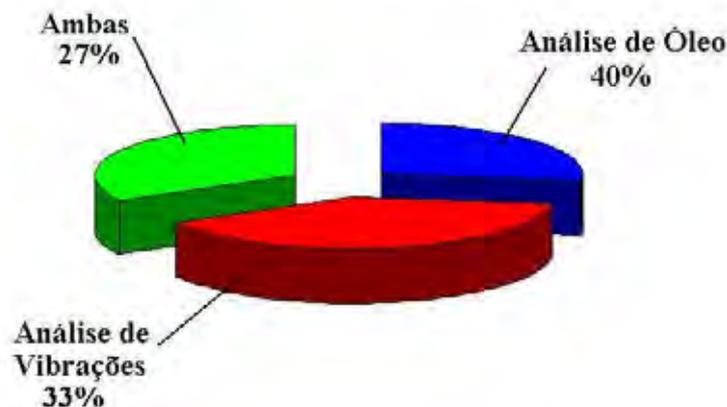


Figura 1.2- Porcentagem de detecção de falhas de rolamentos (MAXWELL; JOHNSON, 1995 citado por GREEN, 2003).

Atualmente, a correlação entre essas técnicas é mais expressiva do que a mostrada na Figura 1.2. Isto porque a análise de vibração é utilizada em rolamentos blindados, onde não é possível retirar amostras de óleo. Para rolamentos lubrificadas a óleo, a análise de óleo detecta falhas nos rolamentos antes do que a análise de vibrações.

Maxwell e Johnson (1995) concluíram que o programa de análise de óleo é mais seguro que o programa de vibração na detecção de um precoce estágio de falha em rolamentos. Eles também mostraram que a indicação do problema é mais segura quando a análise de óleo e a presença de baixas frequências de falhas nos rolamento confirmam um problema de rolamento (MAXWELL; JOHNSON, 1995 citado por GREEN, 2003).

Troyer (1999) citado por Green (2003), fez um estudo sobre a integração dessas duas técnicas apresentou as seguintes conclusões:

1. Ambas técnicas são usadas para o controle da origem das causas de falhas nas máquinas.
2. Às vezes uma técnica serve como um guia de indicação de falha da máquina e a outra técnica serve para confirmar esta indicação.
3. A análise de óleo é geralmente forte na detecção de falhas em caixa de engrenagens e sistemas hidráulicos.
4. A análise de vibrações é geralmente forte na detecção de falhas em sistemas de rolamento e de alta rotação.
5. A análise de vibração é às vezes melhor para a detecção de um ponto de falha.
6. A análise de óleo é às vezes melhor na detecção de qual mecanismo está induzido a falhar.
7. Ambas as técnicas são requeridas com eficiência na determinação da raiz da causa do problema.
8. A correlação entre a análise de vibração e a análise de óleo é muito boa, mas há exemplos contrários.

Troyer (1999) citado por Green (2003), concluiu que a correlação entre análise de vibração e a análise de óleo é muito forte em muitas aplicações e ruim em outras áreas como pode ser visto na Tabela 1.2.

Tabela 1.2 – Convivência dos métodos de análise para várias condições de máquinas(TROYER, 1999 citado por GREEN, 2003).

Condição	Análise de óleo	Análise de Vibração
Óleo lubrificante em rolamentos	Eficaz	Eficaz
Motores desbalanceados	Não aplicado	Eficaz
Água no óleo	Eficaz	Não aplicado
Rolamentos engraxados	Razoável	Eficaz
Motor engraxado	Razoável	Ruim
Câmbio	Eficaz	Eficaz
Alinhamento	Não aplicado	Eficaz
Análise da raiz da causa	Eficaz	Eficaz
Monitoramento da condição de lubrificação	Eficaz	Razoável
Ressonância	Não aplicado	Eficaz

Para se verificar a integração das técnicas de análise de óleo com a análise de vibrações foi proposta a construção de uma bancada de ensaio para verificar o funcionamento em conjunto dessas duas técnicas de manutenção preditiva. Nesta bancada foi feita a monitoração de um redutor de velocidades do tipo coroa sem-fim acoplado a um motor elétrico em seu eixo de entrada e a uma carga desbalanceada no eixo de saída. Além do óleo recomendado

pelo fabricante do redutor (1° Ensaio) utilizou-se o mesmo óleo contaminado por água (2° Ensaio) e por abrasivo (areia) (3° Ensaio).

1.2 – OBJETIVOS

Este trabalho tem como objetivos:

- a) Levantamento Bibliográfico sobre lubrificantes, desgaste, testes físicos em lubrificantes, espectrografia, contagem de partículas, ferrografia e microscopia ótica em análise de óleo e os domínios de análise (tempo ou frequência), média temporal síncrona, acompanhamento dos espectros de vibrações, coletas das medidas de vibrações, instrumentação, análise pelo nível global, ressonância, demodulação e as fontes vibratórias de uma máquina em análise de vibrações;
- b) Construção de uma bancada de ensaio composta de um motor acoplado a um redutor de velocidade, com uma carga desbalanceada, para verificar a eficiência da integração da Análise de Vibrações com a Análise de Partículas de Desgaste até a condição limite;
- c) Verificação do efeito da contaminação líquida e sólida no desgaste dos componentes de máquinas representados por um redutor de velocidade;
- d) Análise de amostras de óleos e vibrações para auxiliar os estudos.

Capítulo 2

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 – ALGUNS TRABALHOS RELACIONADOS.

Os temas: atrito, desgaste e lubrificação têm sido tratados bem antes do nosso século. O uso do lubrificante como um meio de diminuir o trabalho no transporte de objetos pesados é conhecido a mais de 4.000 anos. Por outro lado, como tema na sociedade tecnológica, a tribologia vem sendo considerada de maneira premente desde meados de 1940 e ainda mais intensamente na década de 1960.

O termo “tribologia”, definido como “ciência e tecnologia das superfícies que interagem entre si mediante um movimento relativo”, surgiu em meados da década de 1960, inicialmente no Reino Unido e em seguida propagado por todo o mundo (DOWSON, 1997 citado por MARU, 2003). A maioria dos tópicos cobertos por essa palavra é antiga e bem conhecida, como o estudo de lubrificantes, lubrificação, atrito, desgaste e mancais. As interações superficiais ditam e controlam o funcionamento de praticamente todos os dispositivos mecânicos construídos pelo homem, fato com o qual se observa uma importância central da tribologia em termos de desenvolvimento tecnológico. Entretanto, ainda hoje, isso nem sempre é reconhecido (PERSON, 1999 citado por MARU, 2003).

Myshkin, et al. (2001), pesquisaram um método para classificar partículas metálicas geradas em motores de combustão interna através das cores. As partículas foram extraídas através do RPD e colocadas em um microscópio ótico com câmara CCD. Eles concluíram que as partículas analisadas ocupavam diferentes domínios no plano de classificação, que o modelo HSI (Hue, Saturation, Intensity = cor, saturação e intensidade) é o mais apropriado para o processamento das cores e que se pode distinguir partículas baseadas nas ligas de cobre, óxidos vermelhos e escuros e partículas de aço.

Silva (2001), abordou o problema da severidade do defeito no diagnóstico e monitoramento de redutores de velocidade submetidos à variação de potência. Investigou as potencialidades, aplicadas a este problema, através de treze técnicas usuais de monitoramento.

Três no domínio do tempo: *time synchronous average*, sinal residual e demodulação. Cinco no domínio da amplitude: variância, RMS, *skewness*, *kurtosis* e fator de crista. Uma no domínio da frequência: espectro de amplitude. Quatro no domínio tempo-frequência: *short time Fourier transform*, *wavelet*, distribuição de Wigner-Ville e distribuição pseudo Wigner-Ville. Conclui que, através de sinais simulados, todas as treze técnicas são susceptíveis à variação de potência e portanto são impróprias para a resolução do problema. Propôs três procedimentos de análise baseados no quarto momento estatístico em relação à origem da função densidade de probabilidade Beta: (i) Análise Histórica Global; (ii) Análise Individual Histórica e (iii) Análise Individual Independente. Submeteu os três procedimentos a ensaios experimentais com variações unívocas de torque ou velocidade e para duas condições de defeitos: (a) sem malha; (b) com um dente quebrado. Verificou experimentalmente que os três procedimentos sinalizam fortemente a presença do dente quebrado e, além disso, tanto (ii) quanto (iii) são capazes de indicar precisamente qual é o dente quebrado.

Lantos (2002) descreveu um método parecido com o princípio do método do insolúvel ASTM D 893 “Insolubles in Used Lubricating Oils” em motores de combustão interna. Neste método ele utilizou n-heptano e tolueno e manteve em arquivo as tiras de papel absorvente utilizadas para futuras comparações com novas amostras.

Green (2003) estudou a integração das técnicas de análise de vibrações e análise de óleo lubrificante objetivando-se os modos de falhas associados a engrenagens de um redutor de velocidades.

Borin (2003) propôs metodologias qualitativas para avaliar o grau de degradação e o tipo de lubrificante utilizado e duas metodologias quantitativas para a determinação de contaminantes e parâmetros de qualidade como viscosidade e número de base total (TBN). Afirmou que estas metodologias, baseadas na espectrometria no infravermelho por reflectância total e quimioterapia, podem ser aplicadas no controle de lubrificantes com o objetivo de tornar as análises mais rápidas, práticas, econômicas, seguras e eficientes. Para a determinação qualitativa das condições dos lubrificantes em motores de ônibus foram empregadas as cartas de controle multivariadas, onde foi possível detectar lubrificantes que ainda estavam em condições de uso e que não necessitavam ser trocados, evitando assim desperdícios. Para a determinação do tipo de lubrificante automotivo utilizado foi proposta a utilização da Análise de Componentes Principais onde foi possível separar nitidamente quatro tipos de lubrificantes. Para a quantificação dos contaminantes: água, etileno glicol e gasolina, presentes em lubrificantes automotivos foi empregado o Infravermelho.

Raadnuis (2005) descreveu análises simples “Low-Tech” para monitoramento de máquinas. Utilizou técnicas simples e de baixo custo para aplicações específicas. Utilizou a análise de partículas presentes nos lubrificantes. Estas foram separadas de filtros através da submersão destes em um solvente com posterior aplicação de limpeza ultrasônica por quinze minutos. Após este procedimento as partículas foram capturadas através de membranas de policarbonatos com auxílio de vácuo. Através do estudo da morfologia das partículas concluiu-se sobre o tipo de desgaste que ocorreu no interior do motor.

Mousa (2006) estudou a morfologia dos contaminantes sólidos e partículas de desgaste retidas nos filtros de óleos após a troca dos mesmos. Sua intenção era a obter de informações sobre a performance e monitoramento do motor. E concluiu-se que os filtros contêm informações significantes sobre partículas de desgastes e sobre contaminantes sólidos e que o método adotado é viável, porém há a necessidade da troca do filtro.

Vahaoja (2006) descreveu teoricamente vários tipos de ensaios realizados em máquinas e equipamentos através da manutenção preditiva.

Santos (2006), em trabalho realizado na UNESP Campus de Guaratinguetá o estudou as técnicas de análise de óleos e graxas visando a busca de ferramentas que estabelecessem um diagnóstico da condição de sistemas aeronáuticos, mais especificamente nos motores.

Almeida (2006), fez uma investigação sobre as relações entre vibração (assinatura mecânica) e lubrificação de máquinas rotativas e assim, como ponto de partida deste estudo, procurou avaliar o efeito da variação da viscosidade do lubrificante no sinal de vibração de caixas de engrenagens. O trabalho apresentou um grande banco de dados experimental, discutiu diversos métodos de processamento de sinais e apresentou uma característica do sinal de vibração que foi capaz de identificar alterações na viscosidade do óleo lubrificante no caso apresentado.

Maru et al. (2007), realizaram testes experimentais com mancais de rolamentos lubrificadas em banho de óleo. Colocaram pó de quartzo em três concentrações como contaminante neste óleo e analisaram o valor RMS do sinal vibratório. Os resultados mostraram que mudanças nos valores RMS do sinal em altas frequências, de 600 a 10.000 Hz, estavam associados a mudanças na lubrificação do óleo nos contatos dos mancais devido a contaminação e aos danos devido as próprias partículas de desgastes geradas.

2.2 ÓLEO LUBRIFICANTE

Lubrificação consiste em introduzir entre dois sólidos deslizantes um lubrificante de forma a reduzir o atrito e o desgaste, retirar calor e partículas geradas pelo contato.

A lubrificação pode ser feita de muitas formas diferentes, dependendo da geometria dos corpos em contato, da aspereza e textura das superfícies deslizantes, da carga, da pressão e da temperatura, das velocidades de rolamento e escorregamento, das condições ambientais, das propriedades físicas e químicas do lubrificante, da composição material, e das propriedades da camada superficial das peças. Duas outras funções importantes dos lubrificantes são proteção contra corrosão e auxílio a vedação.

Os lubrificantes são normalmente líquidos, mas podem também ser sólidos, pastosos, e gasosos, conforme de seu estado físico, (CPM, 1997). Lubrificantes líquidos são caracterizados pela viscosidade, mas outras propriedades também são importantes. Óleos lubrificantes têm nomes que designam estas propriedades. Este tipo de lubrificante pode ser subdividido em: óleos minerais, óleos graxos, óleos compostos, óleos aditivados e óleos sintéticos.

Minerais: São óleos obtidos a partir da destilação do petróleo. Suas propriedades dependem da natureza do óleo cru, cuja composição, muito variada, é formada por grande número de hidrocarbonetos, pertencentes a três classes: parafínicos, naftênicos e aromáticos. Os óleos minerais são os mais utilizados e importantes em lubrificação (PETROBRÁS, 1999).

Graxos: São óleos de origem vegetal ou animal. Foram os primeiros lubrificantes a serem utilizados, e satisfaziam as modestas necessidades da época em que predominava a tração animal. Atualmente são pouco recomendados, principalmente por não suportarem temperaturas elevadas, oxidando-se facilmente, tornando-se rançosos e formando ácidos. (PETROBRÁS, 1999).

Compostos: São misturas de óleos minerais e graxos. Certas aplicações especiais requerem muitas vezes o uso de óleos compostos, que conferem ao produto obtido maior oleosidade e maior facilidade de emulsão na presença de vapor. Utilizados em equipamentos como perfuratrizes e cilindros a vapor (PETROBRÁS, 1999).

Aditivados: Os óleos aditivados são óleos minerais puros ou sintéticos, aos quais foram adicionados substâncias comumente chamadas de aditivos, com o fim de reforçar ou acrescentar determinadas propriedades (CUNHA, 2004).

Sintéticos: São lubrificantes “criados” em laboratório por processo de polimerização, especialmente para oferecer características especiais de viscosidade e resistência a

temperaturas elevadas ou muito baixas, de forma a atender aplicações especiais em algumas indústrias. Esses lubrificantes são de custo elevado, devendo, portanto, ser empregados apenas em casos específicos que não possam ser atendidos pelos lubrificantes minerais (PETROBRÁS, 1999).

2.2.1 Viscosidade

É a propriedade mais importante dos óleos lubrificantes, podendo ser basicamente definida como a resistência ao escoamento que os fluidos apresentam. Esta pode ser definida como a tensão de cisalhamento em um plano no fluido por unidade de gradiente de velocidade normal ao plano. A viscosidade pode ser expressa em termos de viscosidade cinemática (mm^2/s ou cSt) ou viscosidade absoluta (dinâmica) cuja unidade é o Pa.s.

Hutchings (1992) define a viscosidade de fluidos newtonianos, em termos da deformação por cisalhamento γ :

$$\tau = \eta \cdot \frac{\partial \gamma}{\partial t} \quad (2.1)$$

Onde:

τ = tensão de cisalhamento [Pa],

η = viscosidade dinâmica [Pa.s],

$\frac{\partial \gamma}{\partial t}$ = taxa de deformação por cisalhamento

A viscosidade cinemática Z é definida conforme Equação 2.2

$$Z = \frac{\eta}{\rho} \quad (2.2)$$

Onde:

Z = viscosidade em cSt ou mm^2/s ;

ρ = massa específica;

2.2.2 Índice de Viscosidade

Normalmente a viscosidade dos fluidos diminui com a temperatura. Assim é definida outra importante propriedade do óleo que é o índice de viscosidade (VI). O índice de viscosidade é um número adimensional, usado para indicar que a viscosidade cinemática depende da temperatura do óleo. Ela é baseada na comparação da viscosidade cinemática do óleo testado a 40 °C, com a viscosidade cinemática de dois óleos de referências (um VI = 0, e o outro VI = 100) cada um tendo a mesma viscosidade em 100 °C como o óleo testado. As Tabelas para o cálculo do VI de uma viscosidade cinemática medida de um óleo a 40 °C e 100 °C são referenciadas na ASTM D2270.

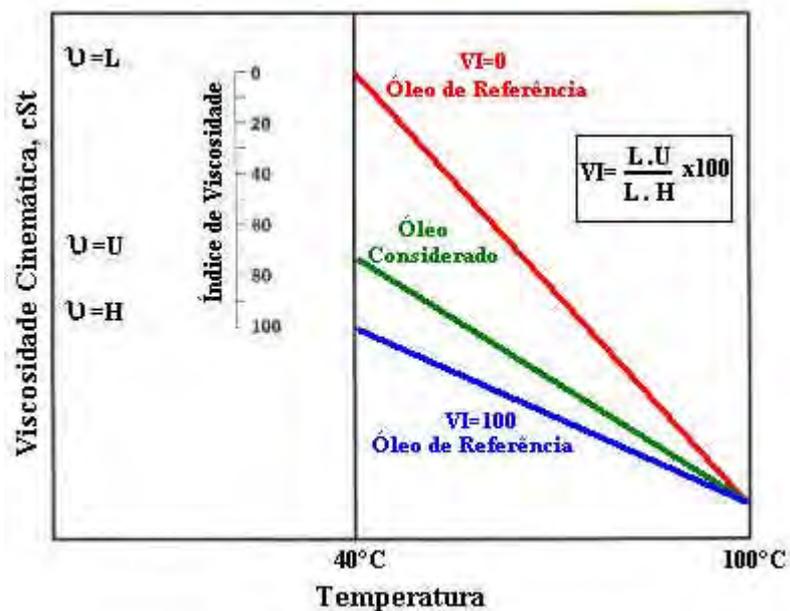


Figura 2.1 - Determinação do índice de viscosidade, (BARNES, 2002).

Segundo a Figura 2.1 um óleo com menor mudança na viscosidade cinemática com a temperatura terá um VI mais alto que um óleo com maior mudança de viscosidade para a mesma variação de temperatura.

A maioria das parafinas, solventes-refinados, minerais-baseados em óleos industriais, possuem VIs típicos no intervalo de 90 a 105. Entretanto, muitos óleos minerais altamente refinados, sintéticos e óleos com VI melhorado possuem VIs que excedem 100. Óleos sintéticos do tipo PAO (Poli Alfa Olefin) possuem VIs na faixa de 130 a 150, (BARNES, 2002).

2.3 DESGASTE

O desgaste pode ser definido como a perda progressiva de material, resultado este da interação mecânica entre duas superfícies em contato lubrificadas ou não. Em geral estas superfícies estão em movimento relativo (deslizamento ou escorregamento) e com cargas aplicadas.

Na literatura pode-se encontrar diversas formas de caracterizar os mecanismos de desgaste. Ludema (1996) relaciona 34 termos diferentes ao discutir a nomenclatura para descrever o desgaste. Entre as nomenclaturas propostas por Ludema (1996), pode-se encontrar varias, como desgaste abrasivo, desgaste por polimento, erosão de partículas sólidas, erosão por cavitação, desgaste adesivo, Fretting, desgaste por impacto, desgaste corrosivo, entre outros.

Outros autores preferem ser mais concisos e classificam o desgaste em menos categorias, é o caso de Neale (1995) e Green (2003) que o caracterizam em três categorias: desgaste por adesão, abrasão e fadiga superficial. Rabinowicz (1995) e o Kato e Adashi (2001) identificam quatro formas principais de desgaste: adesivo, abrasivo, corrosivo e por fadiga, além de uns processos marginais que são freqüentemente classificados como formas de desgaste. Oxidação, erosão, erosão por cavitação e impacto, são às vezes classificados como tipos de desgaste, embora Rabinowicz (1995) considere que na realidade nenhum deles seja uma forma de desgaste.

Cada processo de desgaste obedece as suas próprias leis e, em muitas ocasiões, um dos modos de desgaste atua de tal modo que influencia os outros. Desta forma, na análise de uma situação complexa, é crucial encontrar a causa primária do desgaste.

Em transmissões do tipo rosca sem fim, ou engrenagens hipóides, existe deslizamento que facilita o surgimento de trincas superficiais; desgaste por adesão, por abrasão, por corrosão ou por fadiga superficial são modos potenciais de falha. Portanto, resultados satisfatórios de operação em elementos potencialmente sujeitos a fadiga superficial somente podem ser obtidos com um projeto adequado, com uma manufatura cuidadosa e com o uso do lubrificante próprio para as condições de trabalho (CUNHA, 2004).

Desgaste adesivo e desgaste abrasivo são modos de desgaste gerados sobre um contato plástico. No caso de contato plástico entre materiais semelhantes, a interface de contato tem uma força de união adesiva. Quando é suposto que a fratura é provocada essencialmente como o resultado da forte adesão à interface de contato, o desgaste resultante é chamado **desgaste adesivo**, sem particularizar sobre o modo de fratura.

No caso do contato plástico entre um material duro e afiado e outro relativamente macio, o material mais duro penetra no mais macio. Quando é suposto que a fratura é provocada da maneira que ocorre um micro-corte, o desgaste resultante é chamado **desgaste abrasivo**, enquanto reconhecendo a configuração do contato necessário para o corte, novamente sem particularizar sobre forças adesivas e modos de fratura (KATO; ADASHI, 2001).

No caso do contato no estado de amaciamento, fratura de fadiga é gerada depois de repetidos ciclos de “atritagem”. Quando uma falha superficial é gerada através da fadiga, o desgaste resultante é chamado **desgaste por fadiga** (KATO; ADASHI, 2001).

No caso de contato em meio corrosivo, a reação triboquímica na interface de contato é acelerada. Quando a reação triboquímica em um meio corrosivo é supostamente provocada através da remoção de material, o desgaste resultante é chamado **desgaste corrosivo**. No ar, o meio corrosivo dominante é o oxigênio, e o desgaste triboquímico de metais no ar geralmente é chamado desgaste oxidativo (KATO; ADASHI, 2001).

Esses quatro modos de desgaste são mostrados na Figura 2.2, e os mecanismos de desgaste baseados nesses modos de desgaste são explicados detalhadamente a seguir.

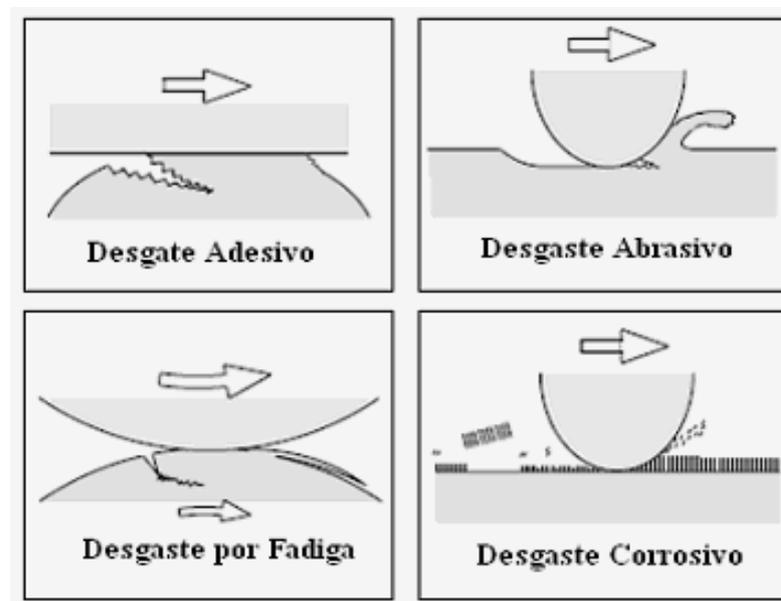


Figura 2.2 - Modos de desgaste (KATO; ADASHI, 2001).

2.3.1 - Desgaste Adesivo

A adesão se refere a habilidade das estruturas atômicas se unirem e formar laços superficiais com outros átomos ou superfícies que elas estão em contato. Microscopicamente as superfícies não são lisas, existem picos e vales (asperezas) e quando duas superfícies estão em contato existem então “pontos de contato” que concentram a pressão de contato e o aquecimento por atrito, estes pontos de contato podem ser vistos na Figura 2.3.

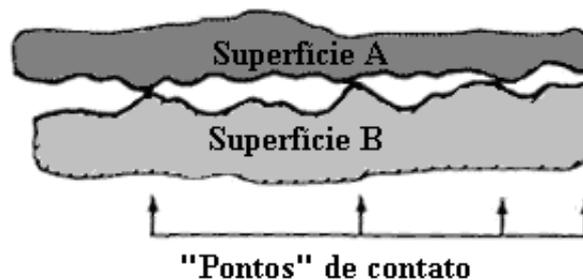


Figura 2.3 - “Pontos de contato” entre duas superfícies.

Nos pontos de contato as condições são favoráveis para “micro-soldagem” destes pontos. As temperaturas locais instantâneas podem alcançar o ponto de fusão do metal, mas com gradientes de temperaturas tão íngremes que as partes permanecem frescas ao toque. O estabelecimento desta junta, ou solda fria como às vezes é chamada, é só a primeira fase de um mecanismo de desgaste e não conduz diretamente a perda de material do sistema. Essa região soldada pode então quebrar em um dos corpos quando é aplicada uma força de cisalhamento, assim permitindo a transferência de material de uma superfície para outra.

Se o resultado de uma fratura de solda for a transferência de material, então nenhum desgaste acontece até que algum mecanismo secundário faça esta partícula se desprender. Frequentemente o material transferido reside na superfície e pode se transferir até mesmo para a superfície original. Frequentemente são formados grupos de partículas e eles fogem como uma única entidade (NEALE, 1995). Novas soldagens (adesões) e correspondentes fraturas continuam ocorrendo, resultando no que é apropriadamente chamado de desgaste por adesão.

Scuffing e *scoring* são formas moderadas de desgaste adesivo caracterizadas por arranhões macroscópicos ou deformação de superfície alinhadas com a direção do movimento. Quando ocorre *scoring*, a superfície é encrespada. *Scoring* leva a taxas de desgaste altas inaceitáveis. É causado frequentemente por quebra do filme de lubrificante por superaquecimento, desalinhamento, deflexão, temperaturas desiguais ou cargas altas e pode ser visto facilmente

nas engrenagens (BUDINSKI, 2002 citado por GREEN, 2003). Este tipo de desgaste deve ser evitado.

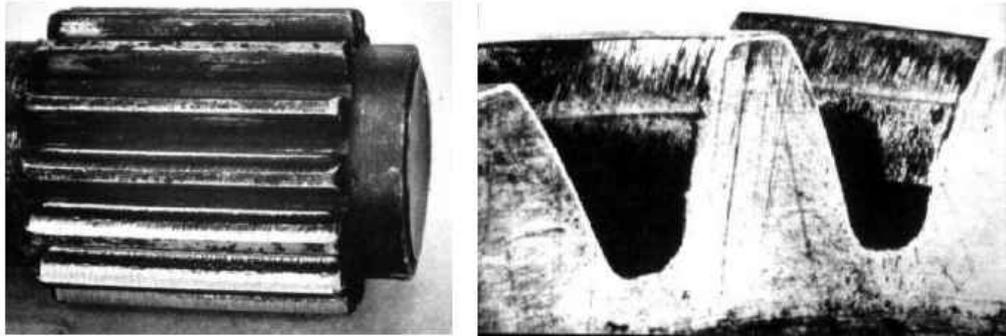


Figura 2.4 - Desgaste adesivo por *scuffing* nos dentes da engrenagem (GREEN, 2003).

Visando aumentar a resistência ao desgaste por adesão, deve-se tomar precauções na seleção do par de materiais para que, em condições de contato deslizante ou com lubrificação limite, haja resistência ao desgaste por adesão Lipson (1963) citado por Stoeterau (2004), apresenta dois critérios. O par deslizante deve: (1) ser composto por metais mutuamente insolúveis e (2) que ao menos um dos metais pertença ao sub-grupo B da tabela periódica.

A resistência da junção formada, seja na superfície, por adesão natural, seja no interior do metal devido à difusão, dependerá das características de junção dos metais envolvidos. Metais do sub-grupo **B** da tabela periódica são caracterizados por junções fracas e frágeis chamadas junções covalentes. Metais como os do sub-grupo **A** formam junções chamadas iônicas, que se apresentam dúcteis e fortes, (STOETERAU, 2004).

O número de junções por soldagem a frio dependerá da solubilidade mútua dos metais. Normalmente metais iguais ou metalurgicamente similares não devem ser usados juntos. Metais metalurgicamente similares são chamados “compatíveis”. Metais compatíveis são definidos como tendo completa miscibilidade líquida e pelo menos 1% de solubilidade sólida de um metal no outro na temperatura ambiente. Na Figura 2.5 tem-se o grau de compatibilidade das várias combinações de metais, baseado no diagrama de fases binárias, segundo Rabinowicz (1980).

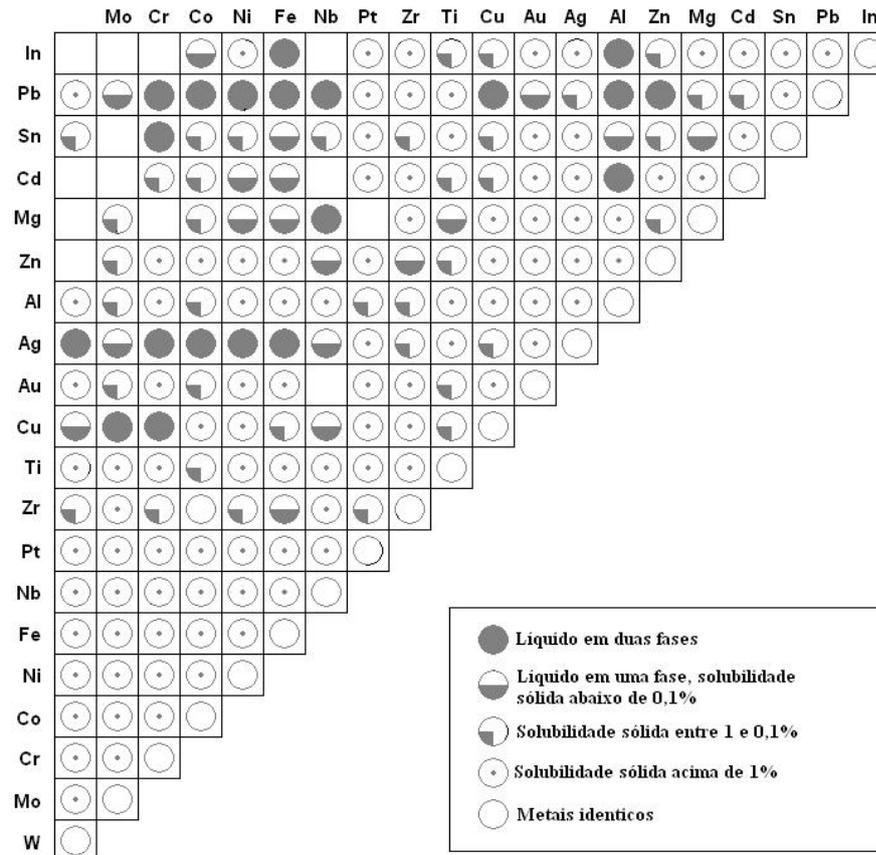


Figura 2.5 - Compatibilidade baseado no diagrama de fases binárias, (RABINOWICZ, 1980).

O desgaste por adesão é normalmente modelado pela equação de Archard:

$$Q = \frac{K \cdot W}{H} \quad [\text{mm}^3/\text{m}] \quad (2.3)$$

Onde:

Q: volume desgastado do material menos duro, por unidade de distância percorrida.

K: coeficiente adimensional de desgaste [0..1];

W: carga normal [N];

H: dureza do corpo mais mole [$\text{N} \cdot \text{m}^{-2}$].

A equação de Archard é largamente utilizada pela sua simplicidade e também por permitir quantificar a severidade do desgaste, em diferentes sistemas, através do coeficiente K.

Hutchings (1992) analisa as relações embutidas na equação de Archard:

- Para determinação da constante K cada sistema deve ser estudado separadamente, uma vez que ele é uma característica do sistema tribológico. Tem-se que a constante K é proporcional ao desgaste.
- O desgaste aumenta com a carga. Embora isso seja verdadeiro, a linearidade implícita na equação vale em intervalos relativamente pequenos.

A equação de Archard possui algumas limitações, entre elas a de não fornecer a taxa de desgaste do material mais duro. A única citação encontrada foi a de (BOOSE, 1984), conforme mostrada na Tabela 2.1.

Tabela 2.1 - Taxa de desgaste do material de maior dureza, (BOOSE, 1984).

(Hd / Hm)	desgaste do mais duro / desgaste do mais dúctil (em volume)
< 3	$(Hm / Hd)^2$
> 3	$3 * (Hm / Hd)$

2.3.2 - Desgaste Abrasivo

Desgaste abrasivo acontece sempre que um objeto sólido é pressionado (carregado) contra partículas de um material que tem dureza igual ou superior. Um exemplo comum deste problema é o desgaste de pás em retro-escavadeiras (partículas de sílica “arando” o metal das pás). Qualquer material, até mesmo se este for muito dúctil, pode causar desgaste abrasivo se partículas duras estiverem presentes.

O desgaste abrasivo é denominado de *2 corpos* quando uma superfície dura e rugosa, ou uma superfície macia contendo partículas duras, desliza sobre uma superfície de menor dureza, produzindo nela diversas ranhuras, e de *3 corpos* quando as partículas duras são livres para rolar e deslizar entre as 2 superfícies. A taxa de desgaste no caso de *3 corpos* é geralmente menor.

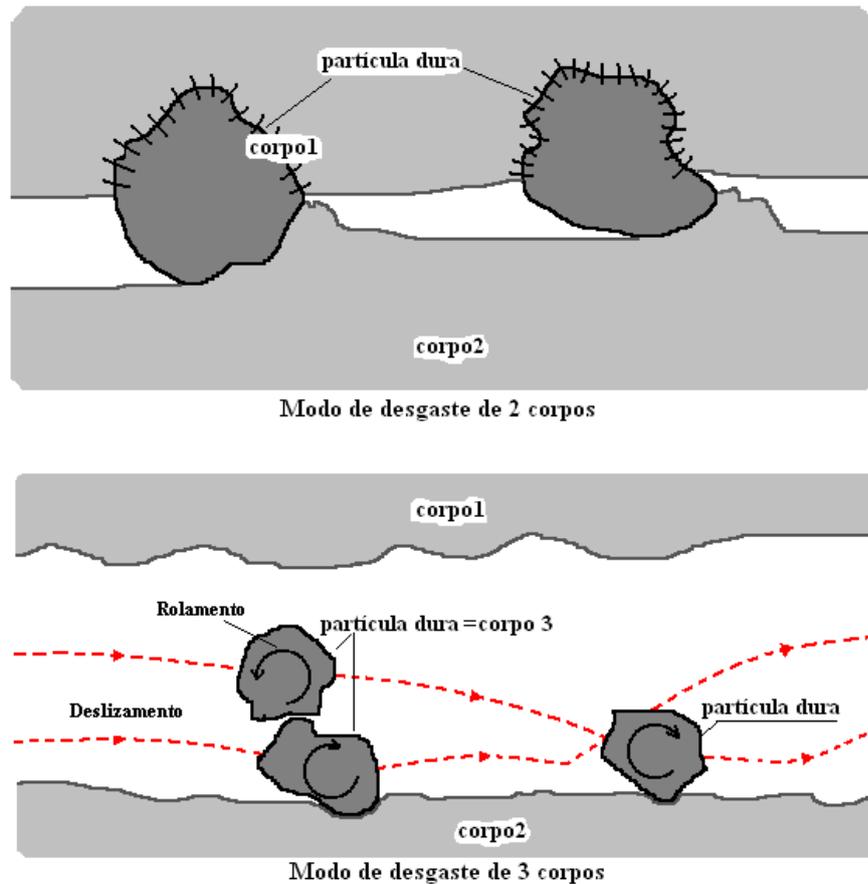


Figura 2.6 – Modos de desgaste abrasivo de 2 e 3 corpos (STACHOWIAK; BATCHELOR, 2005).

Assume-se um modelo de ponto de contato simples onde um abrasivo duro e afiado é pressionado contra a superfície plana e forma uma ranhura por aragem. Quando o material desgastado tem uma propriedade dúctil, uma tira longa (partícula de desgaste) é gerada pelo mecanismo de microcorte. No caso de material frágil, porém, uma partícula de desgaste é gerada por propagação da trinca (EVANS; MARSHALL, 1981 citado por KATO; ADASHI, 2001). Essas diferenças são mostradas nas Figura 2.7.

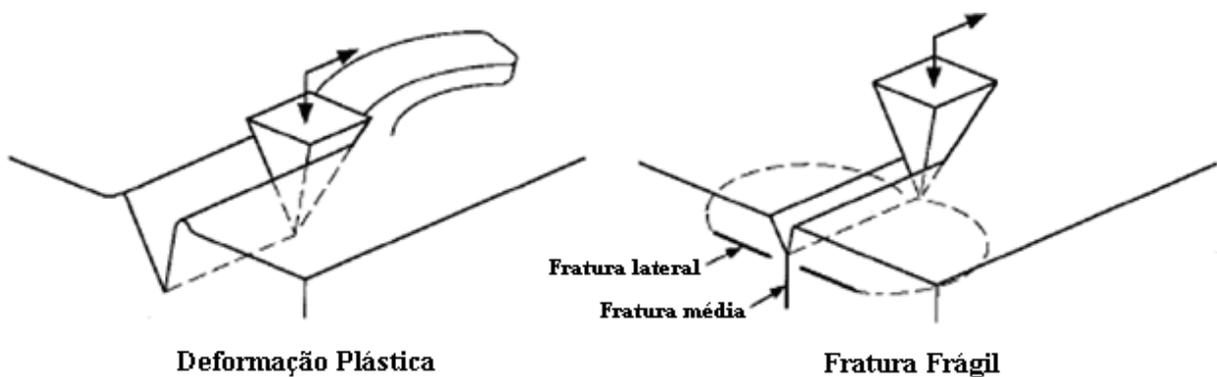


Figura 2.7 – Desgaste abrasivo de material dúctil (KATO; ADASHI, 2001).

Na Figura 2.8, tem-se uma microfotografia do desgaste abrasivo por deformação plástica.

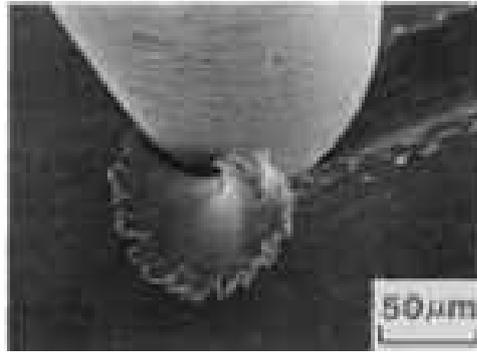


Figura 2.8 – Micrografia do desgaste abrasivo por deformação plástica (TYLCZAK; OREGON, 1992).

O desgaste abrasivo pode ser reduzido com a adição de partículas duras na matriz, de modo a interromper os riscos (microcorte, microsulcamento), dependendo da distribuição e tamanho relativos dessas em relação ao abrasivo. Às vezes, visando a redução dos custos com manutenção, um dos componentes de atrito é feito relativamente com menor dureza e é projetado para ser fácil e economicamente substituído. Por exemplo, superfícies duras de hastes giratórias são protegidas pelo uso de partes mais dúcteis, mancais facilmente substituíveis e buchas. Às vezes é desejável que o mancal seja suficientemente suave para permitir que as partículas abrasivas duras fiquem completamente engastadas de forma que elas não formem saliência sobre a superfície atuando como partículas abrasivas (CUNHA, 2005).

2.3.3 - Desgaste Corrosivo

Desgaste corrosivo é definido como a degradação de materiais nos quais corrosão e outros mecanismos de desgaste estão envolvidos. Ocorre devido à interação da superfície de deslizamento com o ambiente que a envolve, formando produtos de reação na superfície, principalmente por interações químicas ou eletroquímicas, que podem ser removidos por outros mecanismos de desgaste.

O primeiro estágio do desgaste corrosivo é o ataque corrosivo da superfície. Este estágio é idêntico ao que acontece na corrosão comum. Quando uma superfície nua é exposta a um ambiente ao qual ela pode reagir, há uma reação inicial rápida, mas a velocidade dessa reação reduz-se com o passar do tempo conforme mostrado na Figura 2.9. Associado com o processo lento, existe a formação de um filme na superfície que a protege.



Figura 2.9 – Desgaste corrosivo x Tempo: como formação de filme na superfície (RABINOWICZ, 1980).

Em alguns casos, a reação química continua indefinidamente na sua taxa inicial, conforme mostrado na Figura 2.10. Isto acontece porque nenhum filme protetor é formado, uma vez o filme é poroso, frágil, ou perdeu fragmentos.

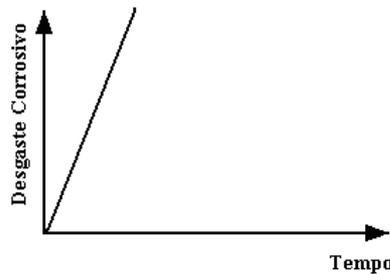


Figura 2.10 – Desgaste corrosivo x Tempo: sem formação de filme na superfície (RABINOWICZ, 1980).

O segundo passo do processo de desgaste corrosivo consiste no desgaste fora do filme dos produtos de reação, como resultado do deslizamento ocorrido neste lugar. Quando isto acontece, a superfície nua é exposta e o ataque corrosivo continua.

Em muitos casos os produtos de corrosão são mais duros e mais frágeis do que as superfícies na qual eles se formam. Há uma tendência para a camada ser razoavelmente resistente ao desgaste contanto que esta seja fina. Para o desgaste ser possível assim que uma certa espessura de óxido é alcançada e dependendo das condições de deslizamento, esta camada pode descamar completamente. Assim tem-se a superfície desprotegida e o processo repete-se conforme mostrado na Figura 2.11.

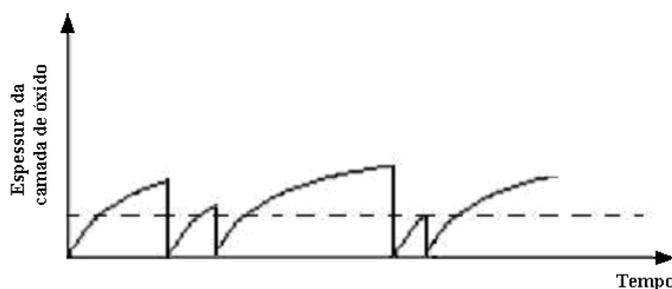


Figura 2.11 – Formação e escamação da camada de óxido (RABINOWICZ, 1980).

O desgaste corrosivo pode ser controlado pela presença de detergentes alcalinos no lubrificante. A alcalinidade dos lubrificantes é designada pelo TBN (“Total Base Number”= Número de Basecidade Total) (TOMANIK, 2000). Pode-se obter também a acidez dos lubrificantes, que é designada pelo TAN (“Total Acidity Number” = Numero de Acidez Total). O índice de acidez ou alcalinidade de um óleo novo para redutores está normalmente na faixa de 0,02 à 0,10.

Em contrapartida, produtos corrosivos como fosfato, sulfetos e cloretos são utilizados em sistemas onde o processo dominante é o desgaste por adesão. O desgaste corrosivo desejado neste sistema é devido à formação de um filme macio proveniente da ação corrosiva, com baixos volumes de desgaste e com boas características lubrificantes.

Nos dias atuais não se tem um modelo quantitativo bom para previsões da profundidade de desgaste sob condições de desgaste corrosivo. Stoeterau (2004) sugere, para os casos em que um filme protetor se forma, o valor de $k = 10^{-4}$ a 10^{-5} como possível de ser usado.

2.3.4 - Desgaste por Fadiga

Para que haja geração de partículas nos desgastes dos tipos adesivo, abrasivo ou corrosivo não é necessário a presença de tensões cíclicas. Com o movimento de rolamento, a zona de contato desloca-se, de modo que a tensão de cisalhamento varia de zero a um valor máximo e volta a zero, produzindo tensões cíclicas que podem levar a uma falha por fadiga do material. Desgaste gerado após tais ciclos de contato é chamado desgaste por fadiga.

Embora mecanismos de fadiga possam operar sobre condições de desgaste por deslizamento, eles tendem a ocupar uma posição muito maior nas condições onde existe contato por rolamento, onde as tensões são altas e o deslizamento é pequeno. Tais contatos também podem ocorrer quando existe lubrificação elastohidrodinâmica efetiva e conseqüentemente a interação adesiva é reduzida ou ausente. Rolamentos de esferas e de roletes, como também engrenagens e cames, são exemplos onde um mecanismo de desgaste por fadiga geralmente é observado.

Abaixo da superfície pode se formar uma trinca que se propaga devido ao carregamento cíclico podendo chegar à superfície lascando-a e fazendo surgir uma partícula superficial macroscópica com a correspondente formação de covas (*pitting*) ou lascamento (*spalling*). *Pitting* origina-se com trincas superficiais, e cada um tem, relativamente, uma pequena área superficial. *Spalling* origina-se com trincas sub-superficiais, que são lascas finas de material de superfície. Estes tipos de falhas ocorrem comumente em mancais de rolamento, dentes de

engrenagens, cames e em partes de máquinas que envolvem superfícies em contato com rolamento.

O crescimento da trinca de fadiga superficial está relacionado com a ação do óleo lubrificante existente entre as superfícies. A teoria aceita é que o óleo que entra na trinca que surgiu na superfície é aprisionado pela superfície rolante, que fecha a entrada da pista e fica submetido a altas pressões enquanto o elemento rolante avança. Este óleo aprisionado sob alta pressão age como uma cunha que aprofunda a trinca. Esta teoria é consistente com a observação da inclinação da trinca e da existência de uma viscosidade crítica de óleo. Para um dado material, acabamento e carga, existe uma viscosidade crítica de óleo abaixo da qual, na temperatura de operação, o óleo promoverá a formação de crateras (*pitting*). Óleos com viscosidade maior não causarão fadiga superficial pois não entram na trinca e não formam cunha, (STOETERAU, 2004).

A tendência da superfície para falha por fadiga pode ser obviamente reduzida pelo decréscimo da carga e do deslizamento. Melhores lubrificantes ajudam, pelo menos, de três formas: (1) menor atrito reduz a tensão cisalhante tangencial na superfície e também a tensão interna resistente à tração; (2) menor atrito melhora a transferência de calor reduzindo as tensões térmicas e (3) a presença de um bom filme lubrificante usualmente permite uma favorável distribuição da pressão em cima da área em contato.

Geralmente, o aumento da dureza superficial aumenta a resistência à fadiga superficial. Entretanto, a resistência aumentada associada reduz a habilidade das pequenas imperfeições de superfície para se ajustar com o desgaste ou com o fluxo de superfície, e assim reduz pressões de contato localizadas. Esta é parte da razão atrás da prática comum de fabricação de um do par de engrenagens acopladas muito duro, com o outro um pouco mais brando para permitir o amaciamento (“run-in”) da superfície (CUNHA, 2005).

A precisão na geometria da superfície e superfícies extremamente lisas são altamente benéficas. Exceções ocorrem quando significativo deslizamento está presente. Então, porosidade superficial, ou um padrão de pequenas depressões em uma das superfícies em contato, pode ajudar a prover reservatórios minúsculos para segurar lubrificante.

2.4 TESTES FÍSICOS

A análise de lubrificantes começa com o procedimento de amostragem. Assim, cuidados devem ser tomados desde a amostragem para que haja sucesso na análise.

Para estabelecer diretrizes exatas para a condição do óleo, amostras regulares são retiradas de posições cuidadosamente selecionadas nos equipamentos. Os pontos de coletas devem ser escolhidos de maneira que as amostras contenham o lubrificante que está em “ação”. Dessa forma deve-se tomar cuidado para não escolher pontos de fluido estagnado.

Uma vez no laboratório, todas as amostras devem ser trazidas a uma mesma condição de temperatura e agitação antes de realizar os testes. Isto é particularmente importante ao estudar as partículas de desgaste em lubrificantes, que podem estratificar (dispor em camadas).

A frequência de amostragem é um outro fator importante. Ela depende do tipo de equipamento, das condições de serviço, e da natureza crítica do serviço.

Os registros da manutenção do equipamento devem sugerir uma frequência de amostragem apropriada. Caso contrário, sugere-se uma frequência, por exemplo, semanal, até que um registro esteja construído. Essa frequência de amostragem deve ser reavaliada e ser for necessário diminuída. Uma vez que um problema possível é detectado, a frequência de amostragem deve ser aumentada até que uma determinação positiva esteja feita na condição do equipamento e na ação a ser feita. Na Tabela 2.2, tem-se os intervalos recomendados para alguns sistemas.

Tabela 2.2 – Intervalos recomendados entre inspeções (LOCKWOOD e DALLEY, 1992).

Sistemas	Intervalo entre as inspeções (em horas)
Turbina a gás de avião	50
Sistemas hidráulicos	50
Derivados de turbina a gás de aviões	50
Motores diesel	200
Transmissões / engrenagens pesadas	200
Sistemas hidráulicos superficiais	200
Turbina pesadas a gás	200-500
Turbina a vapor	250-500
Motores alternativos pesados	250-500

Para cada parâmetro do lubrificante que é medido, um registro de controle é gerado. Após um período de tempo, este registro revela diretrizes para operação normal de um determinado tipo de equipamento/lubrificante. Para parâmetros tais como a viscosidade, a comparação direta com especificações do fabricante do lubrificante e do equipamento fornecem também

informações na escala de operação aceitável. Para ajustar um programa de amostragem e de análise, o mesmo deve fornecer informações para ajustar essas diretrizes estatísticas.

Uma simples inspeção física, particularmente no caso da análise de falha, pode apressar o diagnóstico sobre as condições de operação do equipamento e do desgaste. Os indicadores típicos do lubrificante que são observados freqüentemente são listados na Tabela 2.3.

Tabela 2.3 – Indicadores típicos do lubrificante: severidades e recomendações (LOCKWOOD; DALLEY, 1992).

Aparência do lubrificante	Verificação da deterioração do lubrificante		Ação Corretiva
	Teste Objetivo	Método de detecção	
Visualmente fino ou menos viscoso do que o lubrificante novo.	Verifique para ver se há diluição de combustível.	Cromatografia a gás.	Substitua ou filtre a vácuo o lubrificante contaminado com combustível.
Visivelmente grosso ou mais viscoso do que o lubrificante novo; existe odor oxidado e a cor do lubrificante é muito mais escura do que a o lubrificante novo (a oxidação severa é evidência de períodos excessivos de dreno, de condições de funcionamento anormalmente quentes, ou de exposição aos tipos e aos níveis anormais de pré-oxidação).	Confirme o nível da oxidação do lubrificante.	Espectografia infravermelha.	Substitua o lubrificante, elimine os fatores que aceleram a oxidação.
Lubrificante leitoso (indica tipicamente a formação de emulsão da água).	Confirme a presença da água.	Espectografia infravermelha, titulação em Karl Fischer, placa-quente.	Substitua ou filtre a Vácuo, elimine a fonte da água se possível.
Os precipitados ou o gel incomum presente no lubrificante (devido à contaminação ou à presença de outros lubrificantes).	Identifique contaminadores após o filtragem.	Espectografia infravermelha.	Substitua o lubrificante, identifique e elimine a fonte de contaminação.

Os testes físicos mais comuns utilizados com programas espectrográficos e programas de análise de metais do desgaste são: a viscosidade, o número de ácido total (TAN), e a determinação do índice de água.

O método ASTM D445 é utilizado para se determinar a viscosidade. O método ASTM D 974 ou D 664 para se determinar o número de ácidos totais. O método ASTM D 1744 para se determinar a concentração de água por titulação. A presença de glicol oriundo de líquidos refrigerantes também pode ser detectada através do método D 2982-85 da ASTM. Nos casos onde a água está em níveis acima de 0.05 vol%, a espectrografia infravermelha é geralmente usada. Embora os limites de controle para cada um destes parâmetros necessitem ser ajustados dependendo do tipo de lubrificante e equipamento, variações de viscosidade de $\pm 10\%$, TAN maior que 3 mg/g, e água excedendo 100 a 500 ppm normalmente são suficientes para uma intervenção ou pelo menos uma investigação adicional. A presença de refrigerante é sempre uma causa de alerta, porque implica que este está escapando e se misturando no lubrificante.

2.4.1 – Monitoramento da Viscosidade

Monitoramento da viscosidade é um importante componente de muitos programas de análise de óleo. Até mesmo pequenas mudanças na viscosidade podem causar grandes prejuízos a lubrificação. Os Limites de óleos industriais típicos são fixados em $\pm 5\%$ para precaução, e $\pm 10\%$ para situação crítica, embora aplicações em altas cargas e sistemas extremamente críticos deverão ter igualmente um sistema de alarme, (BARNES, 2002).

Na Tabela 2.4, tem-se os efeitos do uso de um lubrificante com viscosidade inapropriada.

Tabela 2.4 - Efeitos da mudança da viscosidade.

Redução significativa na viscosidade	Aumento significativo da viscosidade
<ul style="list-style-type: none"> • Perda do filme de óleo causando desgaste excessivo; • Aumento do atrito mecânico causando consumo excessivo de energia; • Geração de calor devido ao atrito mecânico; • Vazamento interno ou externo; • Aumento da sensibilidade para contaminação de partícula devido à redução do filme de óleo; • Falha do filme de óleo para altas temperaturas, altos carregamentos ou durante partidas e paradas. 	<ul style="list-style-type: none"> • Excessiva geração de calor resultando na oxidação do óleo, lodo e desenvolvimento de verniz; • Cavitação gasosa devido ao fluxo inadequado de óleo para bombas e mancais; • Falta de lubrificação devido ao fluxo inadequado de óleo; • Chicoteamento de óleo no mancal radial; • Consumo excessivo de energia para superar o atrito do fluido; • Fraca demulsibilidade; • Bombeamento fraco durante partidas a frio.

Sempre que uma mudança significativa na viscosidade é observada, a origem da causa do problema deverá sempre ser investigada e corrigida. Mudanças na viscosidade podem ser

resultado de uma mudança na base química do óleo (uma mudança na estrutura molecular do óleo), ou devido ao ingresso de contaminantes.

Mudança na viscosidade requer testes adicionais, tais como: número de ácidos (AN) e espectroscopia infravermelho com a transformada de Fourier (FTIR), para confirmar a incipiente oxidação; teste de contaminantes para identificar a presença de água, fuligem ou ingresso de glicol; ou outro teste menos comumente usado, tal como o teste de ultracentrífuga ou cromatografia a gás (GC), para identificar uma mudança na base química do óleo.

A viscosidade é uma propriedade física importante que deve ser monitorada e controlada cuidadosamente, devido ao seu impacto no óleo e o impacto do óleo na vida útil dos equipamentos. Medindo-se a viscosidade diretamente no local usando um de muitos instrumentos de análise de óleo capazes de determinar a mudança de viscosidade com precisão, ou se enviando amostras habitualmente para um laboratório, é importante para aprender como a viscosidade é determinada, e como mudanças podem incidir na confiabilidade do equipamento. Uma medida proativa deve ser tomada para determinar a condição de “alma” do equipamento – o óleo! (CUNHA, 2005).

2.5 ANÁLISE ESPECTROGRÁFICA DOS METAIS

É chamado de espectroscopia o método utilizado para análise de elementos simples, da estrutura química de compostos inorgânicos ou grupos funcionais de uma substância orgânica utilizando radiação electromagnética.

Os Programas de Análise de Óleo por Espectrografia (Spectrometric Oil Analysis Program – SOAP) começaram a ser utilizados nos anos 40 pela indústria da estrada de ferro para teste de desgaste a partir de amostras de lubrificante. Com o advento do espectrômetro de emissão atômica os métodos SOAP passaram a ser utilizados em aviões militares e veículos militares com motores diesel. Os métodos incluem a absorção atômica (AA), espectrografia de emissão atômica (AES), plasma induzido por emissão (ICPE), Raio X por fluorescência (XRF). Destes métodos, AES e ICPE, que baseiam-se na detecção da luz emitida pelos elementos, são os mais populares por causa do custo, da velocidade, e de outros fatores (LOCKWOOD; DALLEY, 1992).

Sempre quando se excita uma substância com uma fonte de energia, esta pode emitir ou absorver radiação em determinado comprimento de onda. Assim, analisando estas radiações pode-se determinar a composição da substância. No caso da espectrografia por absorção atômica (AA) o princípio básico consiste em submeter uma amostra de lubrificante a uma fonte de voltagem (15 kV) a qual esquenta e libera energia. Radiações com diferentes comprimentos de onda são geradas, e são identificadas como sendo elementos constituintes do lubrificante. A intensidade de radiação a uma frequência específica é proporcional à concentração de seu respectivo elemento. Na Figura 2.12, tem-se um esquema ilustrativo desse fenômeno.

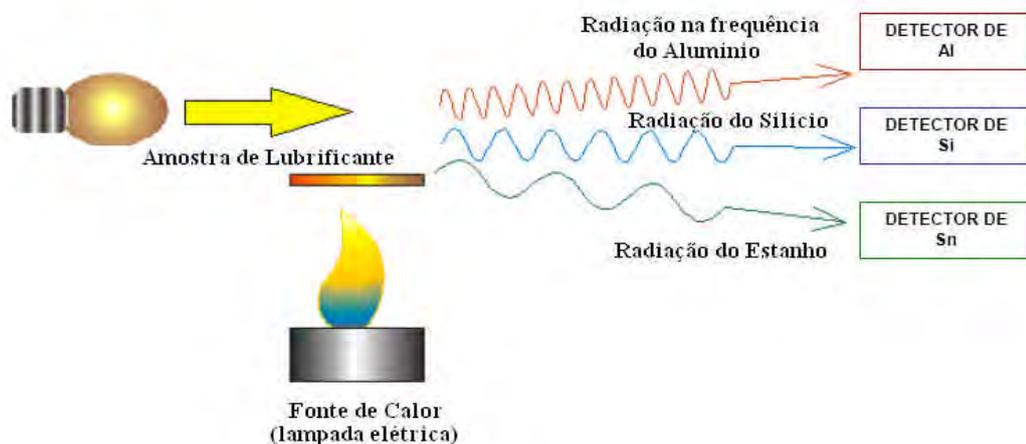


Figura 2.12 - Diagrama esquemático da Espectrografia de Absorção Atômica.

A análise espectrográfica dos metais determina a concentração de metais e de partículas de até 10 microns de tamanho, tais como, desgaste moderado (deslizamento benigno) e os estágios adiantados da fadiga, uma vez que nestas modalidades de desgaste a distribuição predominante de partículas está dentro da escala detectável ($<10\mu$).

Entretanto, em situações anormais do desgaste, tais como deslizamento severo, fadiga de rolamento, corte, desgaste abrasivo, e escoriações (*scuffing*), as partículas são geralmente maiores que 10 microns. Em tais situações, a ferrografia e a contagem de partículas são úteis.

A ferrografia opera em uma escala mais ampla de tamanho de partículas, determinando concentrações relativas com tamanho médio de 1 a 250 microns. As partículas maiores de 100 microns podem ser determinadas por analisadores de partícula. A combinação destas técnicas é desejada, para uma maior eficiência, porém a análise espectrográfica é a mais popular por causa de seu custo relativamente baixo. Uma vantagem adicional é que um grande número de laboratórios oferece este tipo de análise com tempo de análise muito rápido. Em um futuro próximo, a faixa de tamanho de partículas na espectrografia poderá certamente ser aumentada, tornando-a a mais competitiva perante a ferrografia (LOCKWOOD; DALLEY, 1992).

Ferro, cobre, ligas, cromo e alumínio são metais do componente principal analisados. Latão, prata, níquel, molibdênio, titânio e vanádio são geralmente de pouco significado mas estão às vezes presentes, geralmente como elementos de liga ou revestimentos.

A presença de silicone ou a combinação de silício, alumínio, e titânio é vista freqüentemente como a evidência de contaminação de sujeira. Contaminantes dos refrigerantes do motor incluem o boro, o potássio, e o sódio. Os elementos aditivos do lubrificante analisados são zinco, cálcio, sódio, cobre, magnésio, cloro, fósforo, antimônio, molibdênio, enxofre, e boro. Desde que alguns destes elementos cabem em mais de uma categoria (por exemplo, o zinco pode ser um metal do desgaste e um metal aditivo do lubrificante), é desejável a comparação do lubrificante usado com o lubrificante novo equivalente. A Comparação permite a identificação fácil de tendências do desgaste assim como mudanças na concentração entre o lubrificante usado e o novo.

Espectrografia infravermelha (IR) é usada extensamente para determinar a contaminação do lubrificante por água e por refrigerante, assim como para identificar e para monitorar a deterioração dos aditivos e do acúmulo de produtos da oxidação. A disponibilidade de espectrografia infravermelha por transformada de Fourier (FTIR) permite a detecção de mudanças pequenas no espectro IR do lubrificante usado. Um espectro diferencial pode ser obtido subtraindo o espectro do lubrificante novo do espectro do lubrificante usado para revelar claramente as áreas de mudança.

2.6 CONTAGEM DE PARTÍCULAS

A Contagem de partícula consiste em monitorar o número das partículas de um dado tamanho por volume de fluido. É usada como uma ferramenta de monitoração preliminar em combinação com outros métodos analíticos. A contagem de partículas e a ferrografia de leitura direta detectam o início do desgaste severo com um aumento rápido na quantidade e no tamanho das partículas. A contagem de partículas detecta todas as partículas, visto que a ferrografia de leitura direta indica só partículas ferrosas do desgaste.

Muitos instrumentos ópticos sensíveis são usados na contagem do número de partículas em diferentes faixas de tamanho. Esta contagem informa o número de partículas maiores que um certo tamanho encontrado em um volume especificado de fluido.

A nova ISO 11171 (Organização Internacional de Normas Técnicas) substituiu a ISO 4406 em aceitação da ISO MTD (“Medium Test Dust”) como uma substituição da ACFTD (“Air Cleaner Fire Test Dust”). A maioria das versões extensamente usadas desta norma técnica, referem ao número de partículas maiores que 4, 6, e 14 microns em 1 mililitro de fluido. O numero de partículas 4+ e 6+ são usados como um ponto de referencia de partículas. O tamanho 14+ indica a quantidade de partículas grandes presentes, as quais contribuem grandemente para a possível falha catastrófica da máquina.

A Figura 2.13 e Tabela 2.5 representam um exemplo de medida, onde o resultado é obtido através de um código ISO. A Tabela 2.6 mostra os vários números do código ISO 4406.

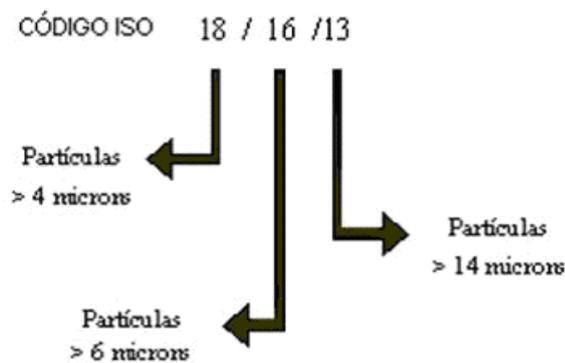


Figura 2.13 - Exemplo de um Código ISO obtido, (PARKER, 2000).

Tabela 2.5 - Classificação e definição pela ISO, (PARKER, 2000).

Número	Mícron	Partícula Real Intervalo de Contagem(por ml)
18	4+	1,300 – 2,500
16	6+	320 – 640
13	14+	40 - 80

Tabela 2.6 - Tabela referente a ISO 4406, de 1999, (PARKER, 2000).

Número	Número de partículas por ml	
	mais que	até e incluindo
24	80,000	160,000
23	40,000	80,000
22	20,000	40,000
21	10,000	20,000
20	5,000	10,000
19	2,500	5,000
18	1,300	2,500
17	640	1,300
16	320	640
15	160	320
14	80	160
13	40	80
12	20	40
11	10	20
10	5	10
9	2.5	5
8	1.3	2.5
7	.64	1.3
6	.32	.64

Os equipamentos de detecção de partículas são do tipo interrupção de luz ou do tipo exploração a laser. Os problemas com este método incluem a dificuldade de obter amostras consistentes e as contagens incorretas causadas por artefatos tais como bolhas de ar. Uma alternativa mais trabalhosa, porém aceitável, é a contagem de partículas coletadas por um filtro com posterior contagem e medição ao microscópio. Esta técnica é conhecida com Patch Test.

A contagem de partícula é usada extensamente para monitorar os sistemas hidráulicos, onde as partículas de desgaste são maiores que 10 microns (além dos limites da espectrografia normal). Muitas indústrias publicam níveis recomendados de contagem de partículas. A contagem de partícula é mais apropriada quando os mecanismos de fadiga são meios preliminares da falha ou quando as partículas de contaminantes causam abrasão. A fadiga sub-superficial ocorre em condições de lubrificação fluídica (full-fluid-film), conduzindo a partículas maiores à distribuição inicial, que pode prosseguir rapidamente. Este cenário, onde λ (relação da espessura de película do óleo pela aspereza pela superfície) excede aproximadamente 1, é tratável ao monitoramento pela contagem de partícula ou pela detecção por plugue magnético.

2.6.1 - Detecção magnética por plug/chip (MCD)

É uma variação do método de filtragem/contagem para a contagem de partículas. Uma peça magnética é introduzida no fluxo do óleo em uma parte da máquina para coletar continuamente o material ferroso. As partículas são vistas tipicamente em microscópio. Este método de coleta capta partículas grandes e é, conseqüentemente apropriado para os sistemas que funcionam na condição de lubrificação fluídica, por exemplo, a maioria dos sistemas hidráulicos. Na Figura 2.14, tem-se uma fotografia de plugues magnéticos utilizados na contagem de partículas.

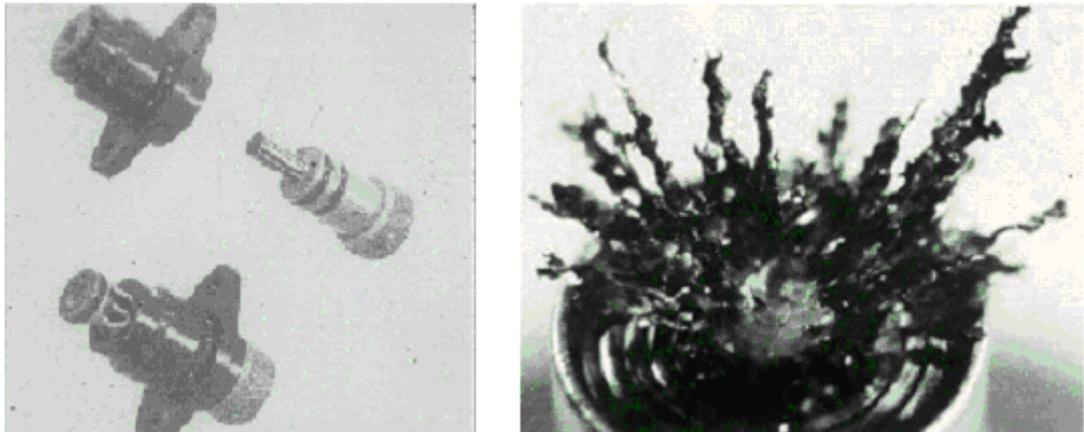


Figura 2.14 – Fotografia de plugues magnéticos utilizados na contagem de partículas.

2.7 – FERROGRAFIA

Para o estudo das partículas sólidas misturadas nos óleos, a ferrografia é a técnica laboratorial mais importante. Esta consiste na determinação da severidade, modos e tipos de desgaste em máquinas por meio da identificação da morfologia, acabamento superficial, coloração, natureza e tamanho das partículas encontradas em amostras de óleos ou graxas lubrificantes de qualquer viscosidade, consistência e opacidade.

A ferrografia é a única que permite a determinação potencial da quantidade e do tipo de desgaste assim como a fonte do desgaste. Os avanços progressivos em instrumentação ferrográfica permitiram o estudo e a classificação ampla das partículas do desgaste produzidas por muitos metais e substâncias diferentes, magnéticas e não-magnéticas (LOCKWOOD; DALLEY, 1992).

Descoberta em 1971 por Vernon C. Westcott, um tribologista de Massachusetts, Estados Unidos, a ferrografia foi desenvolvida durante os anos subseqüentes com a colaboração do Roderic Bowen e patrocínio do Centro de Engenharia Aeronaval Americano e outras entidades, (BIBVIRT, 2004). Em 1982 esta foi liberada para uso civil e trazida para o Brasil em 1988 (BARONI; GOMES, 2000).

As técnicas ferrográficas se dividem em dois níveis de análise. Uma quantitativa, que consiste numa técnica de avaliação das condições de desgaste dos componentes de uma máquina por meio da quantificação das partículas em suspensão no lubrificante e uma analítica, que utiliza a observação das partículas em suspensão no lubrificante.

2.7.1 – Ferrografia Quantitativa

Também conhecida como ferrografia de leitura direta, consiste de uma medição da concentração das partículas ferrosas em uma amostra de fluido. Através desta técnica, pode-se obter informações sobre o grau de severidade do desgaste presente na máquina em análise.

Para estabelecer diretrizes exatas para a condição do óleo, amostras regulares são retiradas de posições cuidadosamente selecionadas no sistema da máquina, preferivelmente durante a operação normal (LOCKWOOD; DALLEY, 1992). Na examinação ferrográfica de leitura direta, usa-se a densidade ótica para medir quantitativamente a concentração das partículas de desgaste em um óleo lubrificante ou em um líquido hidráulico. As partículas são qualificadas segundo seus tamanhos em DL (large particles), partículas grandes, maiores que 5 mm, e DS (small particles), partículas pequenas, menores que 5mm. Os valores da concentração de partículas de desgaste (WPC), Equação 2.4, e a porcentagem de partículas grandes (PLP), Equação 2.5, são derivados desse modo.

$$WPC = DL + DS \quad (2.4)$$

$$PLP = [(DL - DS) / (DL + DS)].100 \quad (2.5)$$

Na Figura 2.15, tem-se alguns gráficos da evolução da concentração de partículas de desgaste (WPC) de compressores. No gráfico (a), as paradas de um compressor foram adiadas de forma segura com intervenções pequenas e baratas. No gráfico (b), o desgaste de um redutor foi diminuído sistematicamente devido ao aprimoramento dos procedimentos de manutenção, melhores materiais e lubrificantes. No gráfico (c), não tendo sido acatadas as recomendações, um compressor acabou parando em emergência (BARONI; GOMES, 2004).

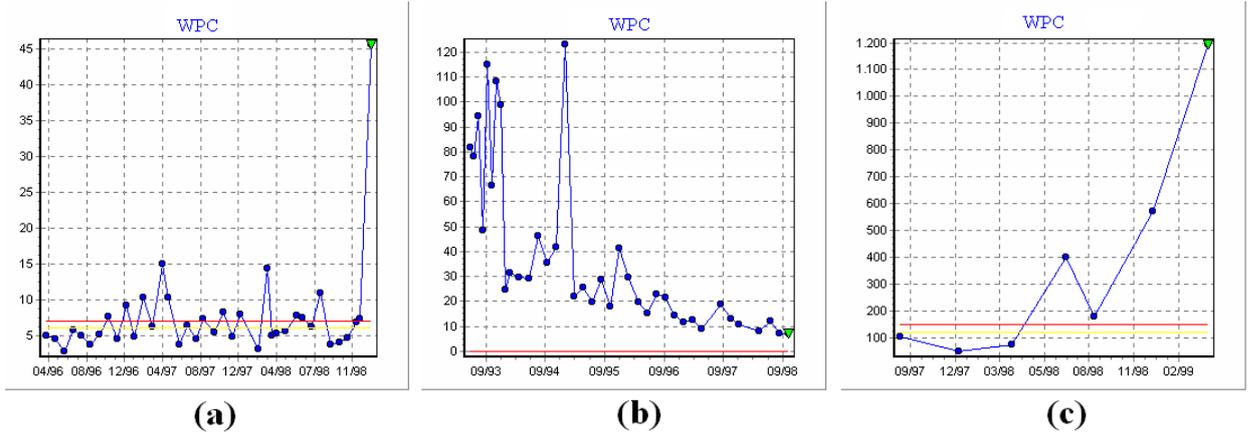


Figura 2.15 – Gráficos da concentração de partículas de desgaste (WPC) pelo tempo (BARONI; GOMES, 2004).

A Figura 2.16 representa um gráfico, chamado “curva de asa” que mostra a evolução do desgaste dos elementos de uma máquina. O tamanho das partículas provenientes de desgaste normal varia de 0,1 μm até aproximadamente 5 μm . A presença de partículas maiores que 10 μm praticamente garantirá a falha indesejável do componente.

A Figura 2.16 mostra as faixas limítrofes dos tamanhos das partículas.

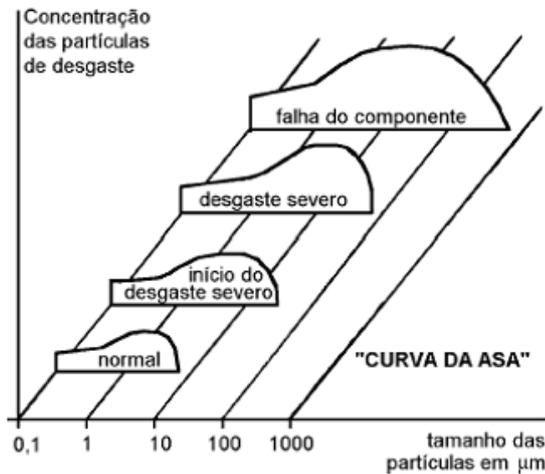


Figura 2.16 - Evolução do desgaste dos elementos de uma máquina (BIBVIRT, 2004).

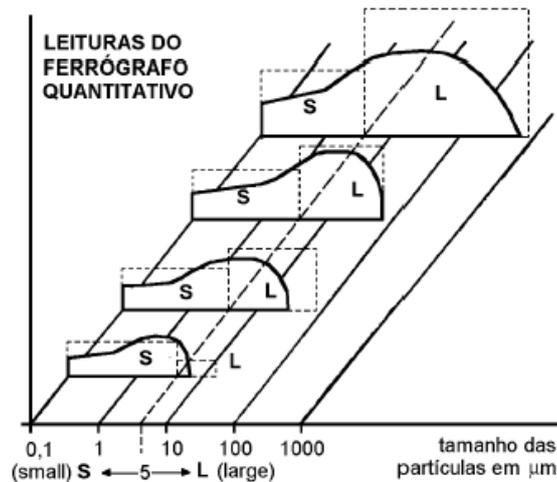


Figura 2.17 - Faixas limítrofes dos tamanhos das partículas, (BIBVIRT, 2004).

2.7.2 – Ferrografia Analítica

Enquanto a ferrografia quantitativa indica uma tendência anormal de desgaste, as técnicas ferrográficas analíticas podem ser utilizadas para identificar especificamente a natureza dos problemas potenciais da máquina, permitindo um estudo profundo das partículas cujo tamanho esteja entre 1 e 250 μm (ARATO, 2004). Para tal constrói-se um ferrograma e então faz-se a análise com o auxílio de microscopia ótica e eletrônica o que possibilita a identificação da morfologia das partículas e, conseqüentemente a possível anomalia.

2.7.2.1 - Construção dos Ferrogramas

Os ferrogramas consistem de lâminas transparentes onde são depositadas as partículas magnéticas separadas em tamanhos por meio de um campo magnético. Outras partículas depositam-se aleatoriamente nas “barreiras” formadas pelas partículas magnéticas.

Um primeiro tipo de ferrograma é obtido passando um fluxo de lubrificante diluído sobre uma plaqueta por gravidade (a plaqueta posiciona-se inclinadamente). A plaqueta é posicionada sobre um magneto que atrai as partículas ferrosas e permite sua aderência sobre a plaqueta, conforme Figura 2.18.

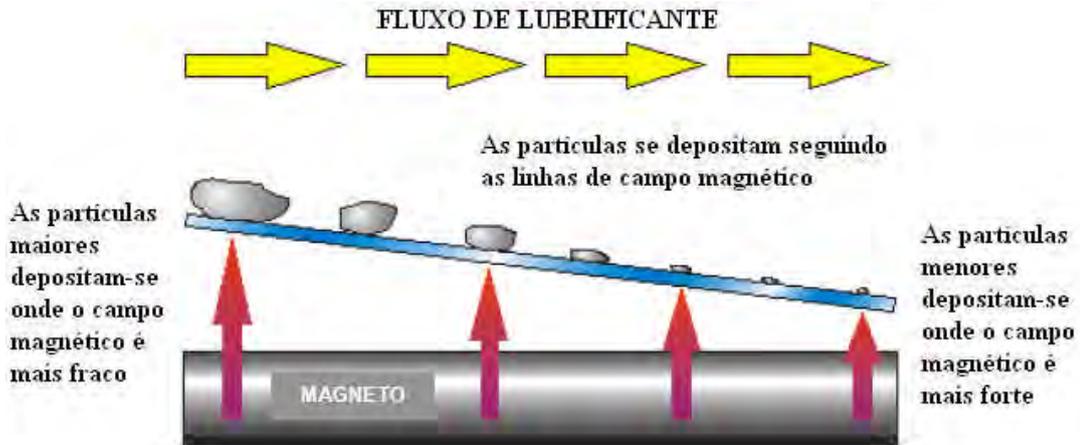


Figura 2.18 – Obtenção de ferrograma.

Devido ao campo magnético, as partículas se alinham em cadeias horizontais ao longo da plaqueta. As partículas maiores se depositam primeiro e existe um decréscimo de tamanho ao longo da plaqueta. As partículas não ferrosas se depositam aleatoriamente em toda plaqueta. A ausência de partículas ferrosas reduz efetivamente a eficiência da análise das partículas não ferrosas.

Um outro tipo de ferrograma pode ser obtido utilizando-se um separador rotativo de partículas (Rotary Particle Depositor – RPD). O RPD extrai partículas presentes numa amostra de óleo pela ação de forças magnéticas, centrífugas e gravitacionais que atuam sobre as mesmas. As partículas são depositadas sobre uma lâmina de vidro formando três anéis concêntricos, Conforme mostrado na Figura 2.19. Durante esta deposição, ocorre uma separação das partículas em relação ao seu tamanho, na qual partículas maiores (1-200 μm) se depositarão no anel interno (I), médias (1-50 μm) no anel médio (M) e partículas pequenas (1-10 μm) no anel externo (E).

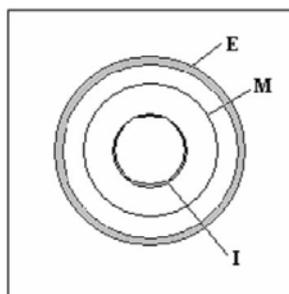


Figura 2.19 – Distribuição esquemática das partículas sobre a lâmina do RPD.

2.7.2.2 - Visualização dos ferrogramas

Após a construção dos ferrogramas, os mesmos deverão ser analisados em um microscópio metalúrgico para obter as informações metalúrgicas. Também são necessárias instalações apropriadas para reflexão e transmissão de luz, filtros, polarizadores, ampliações de até aproximadamente 600 vezes e uma ocular quadriculada.

O tamanho, forma e cor das partículas de desgaste são observadas quando se usa luz refletida. Partículas de aço podem variar da cor branca a azul, dependendo se os mecanismos em que estas foram produzidas causam aquecimento significativo. A coloração azul também indica a severidade do uso. As ligas à base de cobre têm uma coloração marrom avermelhado ou amarela, enquanto a maioria dos metais restantes como alumínio, cromo e níquel aparecem brancos prateados. Óxidos ferrosos aparecem pretos ou vermelhos / marrom de acordo com sua composição química.

O uso de luz transmitida indica se a partícula é transparente, translúcida ou opaca. Metais livres são opacos, entretanto aparecem pretos. As maiores partes dos outros elementos e todas combinações são translúcidas ou transparentes, e produzem cores características do material.

O uso de filtro vermelho no feixe de luz refletido junto com um filtro verde no feixe de luz transmitido produz uma maior discriminação das partículas analisadas. Partículas de metais livres refletirá a luz vermelha, enquanto bloqueia a verde, entretanto aparecerá vermelho claro. Compostos que transmitem luz apareceram verdes, amarelas e rosas dependendo de sua espessura. Óxidos opacos têm uma aparência de vermelho fosco.

Iluminação com luz transmitida branca através de prismas de polarizações, o polarizador e o analisador, produzem um campo escuro de visão devido à absorção da luz de fundo. Partículas de metal aparecem escuras, mas as extremidades permanecem visíveis devido à distorção do campo de luz polarizado na extremidade. Materiais amorfos de cristais translúcidos do sistema cúbico permaneceram escuros. Todos os outros sistemas de cristais e plásticos extruzados, tais como fibras de nylon, aparecem brilhantes exceto na orientação específica quando a luz pode ser extinta. Luz polarizada é útil na rápida identificação dos materiais das partículas tais como óxidos, plásticos e contaminantes.

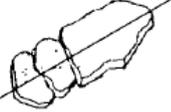
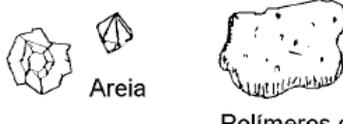
2.7.3 - Tipos de Partículas de Desgaste

As partículas presentes no óleo lubrificante possuem características distintas que correlacionam com as condições que foram formadas, fornecendo assim informações específicas relativas à condição das superfícies móveis que se originaram. Formas, tamanho, cor, textura e tipo de material (ferroso ou não ferroso) são as características exibidas pelas

partículas metálicas. As partículas não metálicas, tais como sílica, são freqüentemente encontradas depositadas juntamente com os detritos metálicos, e estes podem ser caracterizados por sua propriedade de atenuação da luz.

Pela ferrografia analítica, faz-se a classificação das partículas de desgaste em cinco grupos. A Tabela 2.7 mostra os seis grupos de partículas de desgaste e as causas que as originam.

Tabela 2.7 - Classificação das partículas de desgaste, (BARONI, 2004).

1	ESFOLIAÇÃO	2	CORTE POR ABRASÃO
 <ul style="list-style-type: none"> * Escamas * Superfície lisa * 0,5 ~ 5μm 		 <ul style="list-style-type: none"> * Cavacos * Existência de areia * 10 ~ 100μm 	
3	FADIGA (rolamento e engrenagem)	4	ARRASTAMENTO (engrenagens)
 <ul style="list-style-type: none"> * Esferas * ~ Regulares * ~ 3μm 		 <ul style="list-style-type: none"> * Superfície rugosa * Coloração por temperatura * >20μm 	
5	DESGASTE SEVERO POR DESLIZAMENTO	6	PARTÍCULAS DIVERSAS
 <ul style="list-style-type: none"> * Estrias * Corte reto * > 20μm 		 <p>Areia</p> <p>Polímeros de fricção</p>	

2.7.3.1 - Partículas de Desgaste por Atrito

Essas partículas têm formatos de plaquetas planas e lisas, originadas pelo deslizamento normal entre duas superfícies. O tamanho é geralmente pequeno, sua dimensão principal está na faixa de 0.5 μ m – 15 μ m e sua espessura varia de 0.15 μ m a 1 μ m.

Este desgaste tem natureza benigna e está fortemente presente no amaciamento de superfícies deslizantes.

Na figura 2.20 o tamanho médio de partícula está abaixo de 5 microns e o tamanho das partículas maiores aproximadamente 10 microns. Na figura 2.21 o tamanho de partículas é geralmente abaixo de 10 microns.

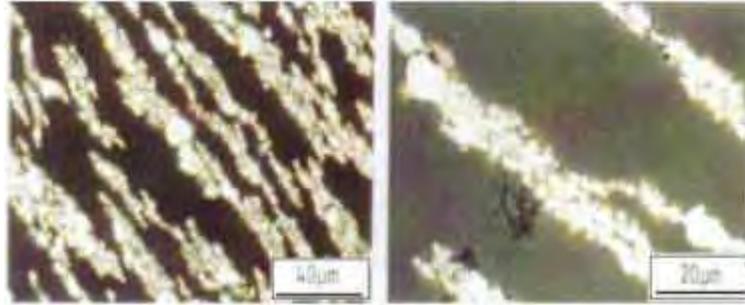


Figura 2.20 - Partículas benignas típicas do desgaste por atrito vistas no microscópio ótico (KITTIWAKE, 2004).

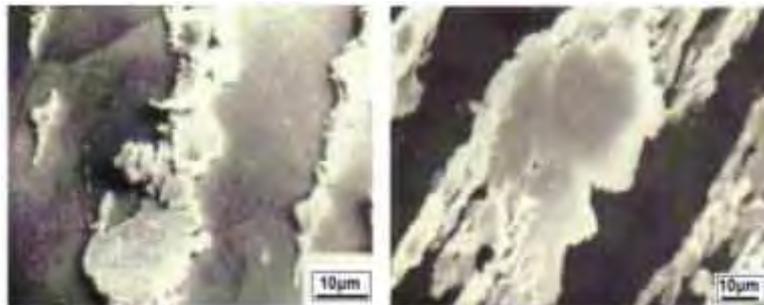


Figura 2.21 – Partículas típicas do desgaste por atrito vistas no microscópio eletrônico de varredura (KITTIWAKE, 2004).

Os contaminantes podem ter uma influência notável na produção de partículas de desgaste por atrito. A taxa de geração das partículas e sua concentração, aumentam rapidamente, o que é freqüentemente acompanhado por um aumento correspondente no tamanho das partículas, (algumas vezes maiores que $100\ \mu\text{m}$). Embora a falha catastrófica é improvável sob estas condições, uma alta taxa de desgaste causa um rápido desgaste do maquinário e muito cuidado deve ser tomado na avaliação do estado de uso.

2.7.3.2 - Partículas de Desgaste Severo por Deslizamento

São identificadas por estrias paralelas em sua superfície resultantes do deslizamento. São partículas normalmente bastante finas, enquanto que seu tamanho na dimensão principal é maior se comparado com as partículas de desgaste normal por atrito, alcançando aproximadamente $20\ \mu\text{m}$. Podem ser formadas sob condições de carregamento excessiva na superfície, alta velocidade de funcionamento ou por lubrificação imprópria. Na Figura 2.22, tem-se micrografias de partículas de desgaste severo por deslizamento.



Figura 2.22 – Partículas típicas do desgaste severo por deslizamento. As partículas exibem estrias na superfície (KITTIWAKE, 2004).

As partículas mostram às vezes a evidência das cores da têmpera, que resultam do aquecimento localizado, produzindo as cores do revenido associado com o aço. A severidade do desgaste e conseqüentemente a temperatura atingida são indicadas pela cor das partículas, as quais mudam da cor palha para marrom e então para azul com o aumento da temperatura.

2.7.3.3 - Partículas de Desgaste por Corte

Na Figura 2.23, tem-se microscopias de partículas típicas do desgaste por corte.

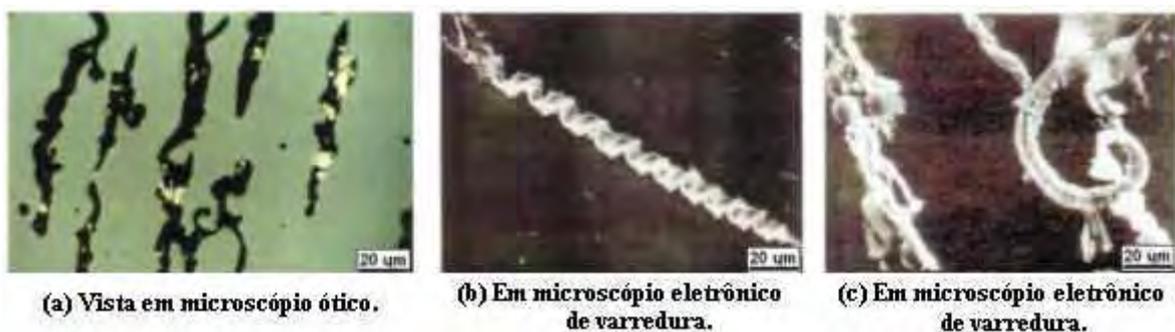


Figura 2.23 – Partículas típicas do desgaste por corte (KITTIWAKE, 2004).

Essas partículas são identificadas por sua grande semelhança com cavacos ou detritos de usinagem. Podem variar amplamente no comprimento, ou seja, de aproximadamente 5•m para maior que 100•m, com larguras médias de 2 – 15•m. Frequentemente exibem cores do revenido resultante do aquecimento durante sua formação.

Partículas de desgaste devido ao corte são produzidas por penetração, ranhura ou corte de uma superfície por outra. Isto é provocado pela diferença intrínseca no nível de dureza entre as superfícies em contato, ou por contaminantes duros embutidos na superfície de menor dureza, que causam penetração na superfície oposta.

A presença de partículas de desgaste devido ao corte é indicativo de uma situação anormal de funcionamento, e requer um monitoramento cuidadoso. Frequentemente, algumas pequenas partículas de desgaste devido ao corte são encontradas fortuitamente dispersadas entre detritos depositados, porém não indicam nenhum uso adverso ocorrido. Se, porém, a quantidade e/ou tamanho das partículas aumentarem com o tempo de trabalho, os indicativos apontam para uma iminente quebra de algum componente da máquina.

2.7.3.4 - Partículas de Fadiga

Partículas devido a fadiga são produzidas em engrenagens e em contatos de mancais de rolamentos.

A - Partículas de Fadiga por Engrenamento - Em sua formação inicial as partículas devido à fadiga geralmente têm superfície lisa, extremidades irregulares e uma dimensão principal com proporção de 10:1 em relação à espessura. Com o aumento do desgaste e das tensões superficiais, diminui notavelmente a proporção entre a dimensão principal e a espessura, produzindo partículas sem formas que são difíceis de focalizar completamente quando vistas através de microscópio óptico. É frequentemente necessário examinar partículas muito pequenas na ampliação de 800× para esclarecer estas características. Essas partículas originam nos pontos de contato das engrenagens.

Na Figura 2.24, tem-se as partículas de fadiga por engrenamento vistas em microscópio óptico e eletrônico de varredura. As bordas irregulares das partículas distinguem-se claramente das partículas do desgaste por atrito.

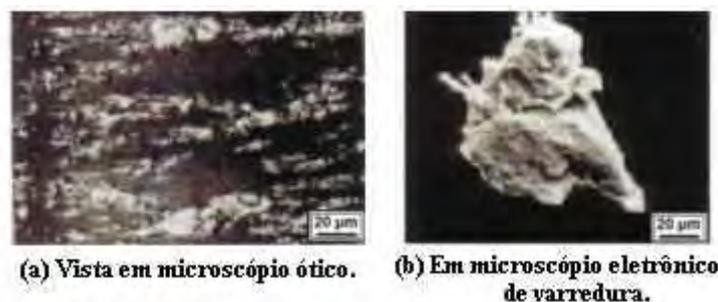


Figura 2.24 – Partículas de fadiga por engrenamento (KITTIWAKE, 2004).

B - Partículas de Fadiga de Rolamento - Existem três tipos distintos de partículas devido a fadiga de rolamento, isto é, partículas esféricas, partículas em formas de pequenos cavacos e partículas laminares.

As partículas esféricas produzidas por contato das partes rolantes, normalmente alcançam o tamanho de aproximadamente $1\ \mu\text{m}$ a $10\ \mu\text{m}$, e a quantidade apresentada é indicativo da severidade do processo usado. Partículas esféricas devido a fadiga de rolamento são produzidas no interior da trinca do mancal e, uma vez que elas são formadas antes que muitas partículas em forma de lascas, elas dão um alerta de uma provável falha.

Partículas esféricas podem surgir de diferentes fontes além da fadiga do contato rolante. Elas são produzidas através dos seguintes processos: cavitação erosiva, soldagem e retificação. As partículas produzidas por estes processos possuem geralmente um tamanho muito maior, variando de $1\ \mu\text{m}$ – $100\ \mu\text{m}$, deste modo pode-se distingui-las das produzidas pela fadiga do contato rolante. Óleos novos frequentemente contêm algumas partículas esféricas que são resultantes do recipiente no processo industrial.

Na Figura 2.25, tem-se as partículas de fadiga de rolamento vistas em microscópio ótico e eletrônico de varredura. Essas partículas são de difícil focalização em microscópio ótico

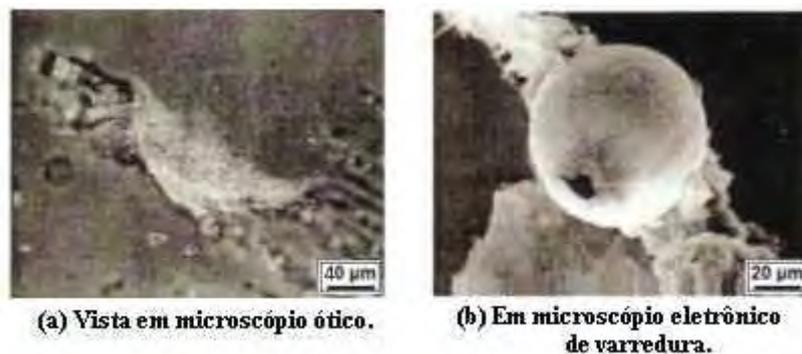


Figura 2.25 – Partículas típicas de fadiga de rolamento (KITTIWAKE, 2004).

Partículas de fadiga em forma de lascas são partículas formadas pelo material que é removido da superfície do contato rolante, quando uma cova ou lasca da superfície acontecem. As partículas podem ser bastante grandes na sua formação, até $100\ \mu\text{m}$ em tamanho, com um aumento adicional no tamanho que frequentemente acontece quando procede a falha da superfície.

Partículas laminares são encontradas por serem produto da passagem de uma partícula de desgaste através de uma cavidade do contato rolante. Este mecanismo produzirá uma formação da partícula bastante grande (até $70\ \mu\text{m}$ na dimensão principal), partículas muito finas com uma proporção na região de 40:1 entre a dimensão principal e a espessura. Uma propriedade frequentemente exibida por estas partículas é a presença de cavidades, arredondadas ou alongadas, as quais permitem a passagem de luz transmitida quando vista por

meio de um microscópio. Partículas laminares ocasionais achadas em um depósito de desgastes não são indicativas de uma situação de desgaste adversa. Porém, se a quantidade de partículas laminares presentes aumentar rapidamente, particularmente junto com um aumento no número de partículas esféricas presentes, a situação de uso está deteriorando e indicando a iminência da falha.

Na Figura 2.26, tem-se uma partícula laminar causada por fadiga de rolamento vista em microscópio ótico. Estas partículas são bastante finas.



Figura 2.26 – Partículas laminares causadas por fadiga de rolamento vista em microscópio ótico (KITTIWAKE, 2004).

2.7.3.5 - Partículas Metálicas não Ferrosas

Além das partículas ferrosas que são depositadas por ação de força magnética, partículas não metálicas também se depositarão nos ferrogramas. O depósito destas partículas é geralmente localizado no anel externo, por que são menos magneticamente atraídas quando comparados com os materiais ferrosos (níquel é a exceção). As partículas produzidas por metais não ferrosos freqüentemente têm características similares aquelas exibidas por partículas ferrosas; por exemplo, as características observadas nos desgaste por atrito, desgaste por corte e alta tensão no deslizamento estão sempre presentes. A característica distintiva principal dos metálicos não ferrosos é, porém, sua cor.

2.7.3.6 - Partículas de Cobre

Quando vistas na luz refletida, as partículas de cobre aparecem com a cor salmão rosa. O alcance do tamanho pode variar consideravelmente, tipicamente de $2 \cdot \mu\text{m}$ - $100 \cdot \mu\text{m}$ ou mais. A forma da partícula dependerá do mecanismo de desgaste. Ocasionalmente serão encontradas partículas de cobre soldadas com partículas metálicas, devido ao mecanismo de uso intrínseco que causa adesão entre os dois materiais.

Na Figura 2.27, tem-se partículas de cobre vista em microscópio ótico. Estas partículas variam até o tamanho de $40 \mu\text{m}$.



Figura 2.27 – Partículas de cobre vista em microscópio ótico (KITTIWAKE, 2004).

2.7.3.7 - Partículas de Bronze ou Latão

Quando vistas na luz refletida, as partículas de latão aparecem com uma cor amarelo ouro e as de bronze com uma cor amarelo/cor-de-rosa escuro. A característica topográfica exibida pela partícula dependerá novamente do mecanismo de desgaste.

Na Figura 2.28, tem-se uma partícula de bronze causada por desgaste severo por deslizamento.

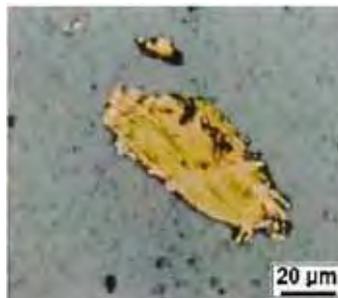


Figura 2.28 – Partícula de bronze vista em microscópio ótico (KITTIWAKE, 2004).

2.7.3.8 -Partículas de Cromo

As partículas de cromo aparecem com uma coloração prata brilhante quando são vistas por luz refletidas. Normalmente elas têm superfícies lisas as quais exibem micro trincas, e tem geralmente tamanho abaixo de $50 \mu\text{m}$. O chapeamento com cromo é uma fonte comum destas partículas.

Na Figura 2.29, tem-se uma partícula de cromo vista em microscópio ótico. Partícula com $40 \mu\text{m}$ na sua dimensão principal.

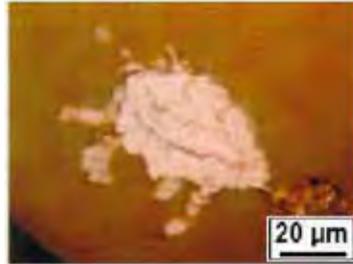


Figura 2.29 – Partícula de cromo vista em microscópio ótico (KITTIWAKE, 2004).

2.7.3.9 - Partículas de Níquel

Estas são muito similares as partículas de cromo, já que tem uma coloração prata brilhante com superfícies lisas, quando vistas por luz refletida. As superfícies são, contudo, normalmente sem traços característicos. Usualmente elas são produto da quebra da placa de níquel. Por causa da sua forte propriedade magnética elas são normalmente encontradas no anel interno de depósito, alcançando tamanhos de 5 - 50• m.

Na Figura 2.30, tem-se uma partícula de níquel vista em microscópio ótico. Partícula com 22• m no comprimento.



Figura 2.30 – Partícula de níquel vista em microscópio ótico (KITTIWAKE, 2004).

2.7.3.10 - Partículas de Alumínio

Estas aparecem prateado cinzento quando vistas por luz refletida. As partículas de alumínio normalmente têm uma superfície com topografia irregular dando-nas uma aparência rugosa. O tamanho das partículas pode variar consideravelmente, mas é normalmente bastante grandes, 25 - 500• m.

Na Figura 2.31, tem-se uma partícula de alumínio. Partícula com 70• m no comprimento.



Figura 2.31 – Partícula de alumínio vista em microscópio ótico (KITTIWAKE, 2004).

2.7.3.11 Óxidos

A - Partículas de “óxido vermelho”

Podem ser formadas por desgaste no deslizamento conforme mostradas na Figura 2.32 e assemelham-se a partículas de desgaste severo por deslizamento, exceto que são geralmente acinzentadas e, quando vistas na luz transmitida branca somente, parecem marrom translúcido e avermelhado. São formadas nas condições de lubrificação inadequada e são, de fato, as partículas deslizantes severas que oxidaram, o óxido é Fe_2O_3 . As partículas deste tipo são grossas e arredondadas e podem originar dos mecanismos de fretamento.

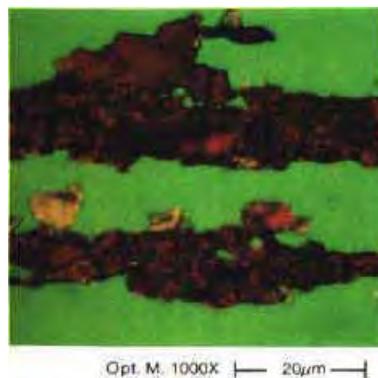


Figura 2.32 – Partículas de desgaste de óxido vermelho formadas por deslizamento, visualizadas em luz bi cromática (LOCKWOOD; DALLEY , 1992).

Podem também ter sido originadas do “enferrujamento” devido exposição a um mecanismo de secagem por calor ou por corrosão/oxidação. Resultam tipicamente da presença de água no óleo. Sua cor pode melhor ser avaliada sob a luz polarizada refletida. A Figura 2.33 ilustra este tipo de partícula. As partículas que são de cor marrom avermelhadas antes do tratamento térmico podem ter sido enferrujadas pela exposição a um mecanismo de secagem por calor, ou podem ter sido originadas por mecanismos de fretamento ou outros de corrosão/oxidação.

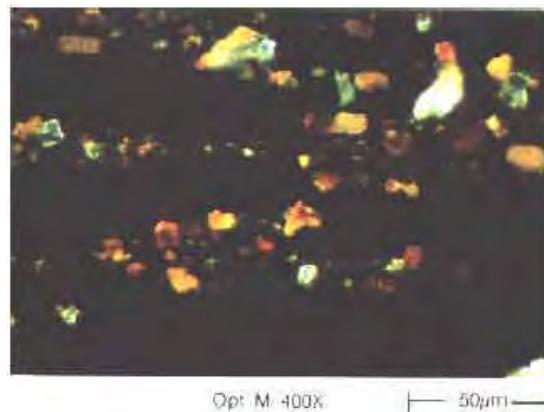


Figura 2.33 – Partículas de óxido de ferro vermelho (LOCKWOOD; DALLEY, 1992).

B - Partículas de óxido-metálico escuro.

Na Figura 2.34, tem-se partículas de óxido metálico escuro. Estas assemelham-se as partículas “óxido de ferro vermelho”, exceto que contêm um núcleo de metal livre e assim não são translúcidas. Também mostram frequentemente manchas do metal livre em suas superfícies. Estas partículas são causadas pelo calor e pela deterioração do lubrificante, e indicam um desgaste mais severo. As partículas grandes, parcialmente oxidadas indicam a falha catastrófica de superfície.

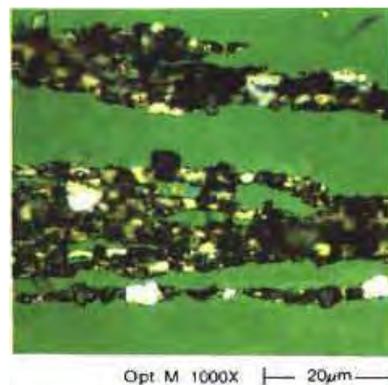


Figura 2.34 – Partículas de óxido-metálico escuro (LOCKWOOD; DALLEY, 1992).

C - Partículas de óxido de ferro preto.

Na Figura 2.35, tem-se partículas de óxido de ferro preto. São cinza escuro para preta e assemelham-se a seixos na forma. O óxido neste caso é Fe_3O_4 . Tais partículas resultam de uma condição mais severa do que as partículas de óxido vermelho, devido uma quantidade

proporcionalmente maior de ferro estar sendo consumida no processo de oxidação por causa da lubrificação inadequada.

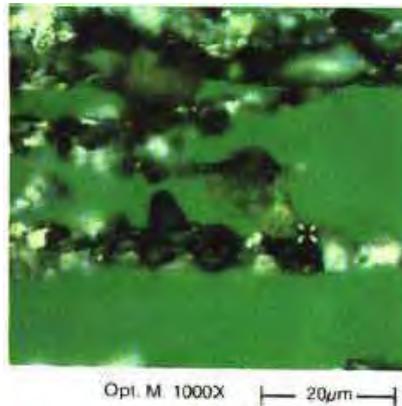


Figura 2.35 – Partículas de óxido preto (LOCKWOOD; DALLEY, 1992).

2.7.3.12 Partículas Misturadas

Além das partículas de metal depositadas pode-se encontrar as seguintes partículas: óxidos, cristais não metálicos e amorfos não metálicos. A identificação destas partículas é melhor realizado usando as facilidades de polarização do microscópio óptico.

Na Figura 2.36, tem-se alguns exemplos de partículas não metálicas vistas em microscópio óptico. Na Tabela 2.8, tem-se a indicação de como são identificadas algumas partículas segundo (KITIWAKE, 2004).

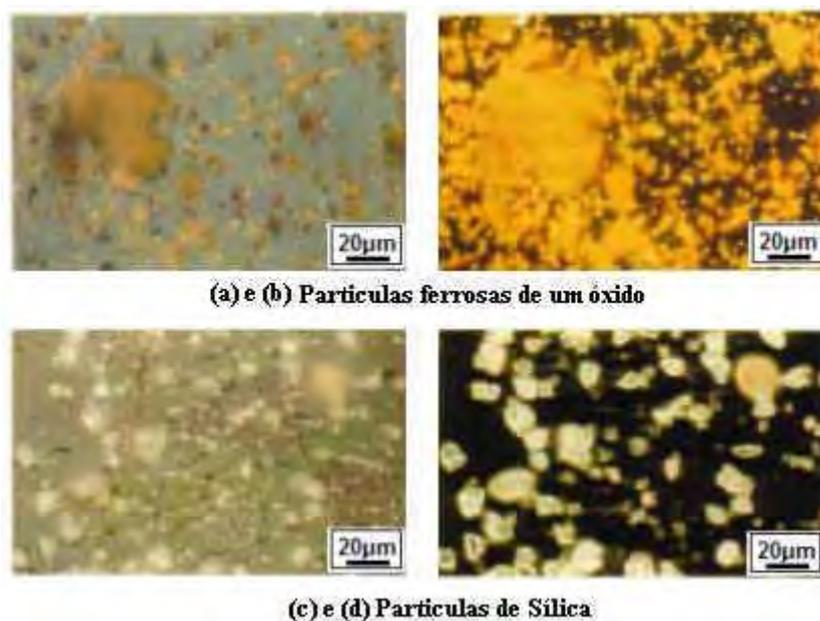


Figura 2.36 – Partículas não metálicas (KITIWAKE, 2004).

Tabela 2.8 - Indicação de como são identificados algumas partículas, (KITTIWAKE, 2004).

Tipo de Partícula	Luz Normal Refletida	Luz Polarizada Transmitida	Luz Polarizada Refletida
Óxido (Ferroso)	Cor marrom clara contra um fundo branco.	De marrom laranja claro a escuro de acordo com a densidade - fundo cinzento.	Laranja / marrom brilhante contra fundo preto.
Cristalino não metálico (Sílica)	Cor cinza transparente contra um fundo branco.	Branca prata brilhante contra um fundo cinzento.	Branca prata brilhante contra fundo preto.
Polímero	Creme / marrom fosco com aparência tipo de lã de algodão contra um fundo branco.	Cor bege brilhante contra um fundo cinzento.	Cor bege brilhante contra fundo preto.

2.8 ANÁLISE DE VIBRAÇÕES

A análise de vibrações é uma das técnicas mais antigas na manutenção. Desde que foi construída a primeira máquina, o homem percebeu que quando ela vibrava ou fazia muito barulho estes sinais eram indicativos de mau funcionamento (KARDEC, 2002).

O princípio da análise de vibrações está baseado na idéia de que as estruturas das máquinas, excitadas pelos esforços dinâmicos, provocam sinais vibratórios cuja frequência é idêntica àquelas dos esforços que os tenham provocado. A medida global tomada em algum ponto é a soma das respostas vibratórias da estrutura aos diferentes esforços excitadores, (WANG; WILLIANG, 1995 citado por CUNHA, 2005).

A partir da análise dos sinais vibratórios é possível tomar decisões de intervir ou não no funcionamento da máquina, fazendo com que esta esteja “disponível” o máximo possível, reduzindo custos com manutenção, tempo de parada da máquina, reduzindo o estoque e melhorando a segurança entre outras.

A seguir, tem-se alguns dos problemas típicos detectados com a análise de vibrações.

- Desbalanceamento.
- Desalinhamento (entre componentes).
- Eixos tortos.
- Defeitos de rolamentos.
- Excentricidades.
- Desgaste em engrenagens e mancais (aumento de folgas).
- Má fixação da máquina e/ou de seus componentes internos.
- Instabilidade do filme de óleo nos mancais.
- Roçamentos.
- Fenômenos aerodinâmicos e/ou hidráulicos (turbulência, cavitação).
- Problemas elétricos (quebra de barra de rotores, má fixação de bobinas, núcleos ou peças polares em motores, geradores, transformadores etc.).

É possível, a partir de tomadas de sinais de vibrações em pontos determinados do equipamento, identificar o aparecimento de novos esforços dinâmicos ou o aumento abrupto da amplitude da resposta, que são indicadores do surgimento de defeitos ou degradação do funcionamento.

A medida de uma vibração transmitida por uma estrutura sob o efeito de esforços dinâmicos será função de múltiplos parâmetros, conforme relação abaixo.

- i) Massa, rigidez e coeficiente de amortecimento da estrutura que veicula as vibrações.

ii) Características de fixação da máquina sobre o solo que opõe reações às vibrações e modifica a intensidade.

iii) Posicionamento da tomada de medida;

iv) Posição e fixação do sensor (captor) sobre a máquina.

v) Característica do sensor.

vi) Pré - amplificação e transmissão do sinal.

vii) Desempenho dos aparelhos analisados.

viii) Velocidade de rotação e potência absorvida.

ix) Estado das ligações da cadeia cinemática (alinhamento, balanceamento, engrenagens, rolamentos, etc.).

Os elementos i, ii e iii são geralmente reagrupados sob a denominação de "Função de Transferência", característica da estrutura.

Os parâmetros iv, v e vi concernentes às características da "cadeia de medida", precisam tornar-se invariáveis de uma medida para outra.

Os elementos viii e ix são aqueles, de fato, que estão diretamente ligados à intensidade dos esforços dinâmicos que fazem nascer à vibração, mas que é impossível de ser medida diretamente, sem passar pela inevitável amplificação dos outros parâmetros.

Na manutenção preditiva por análise de vibrações, é necessário utilizar técnicas de processamento do sinal vibratório com o objetivo de extrair as informações que permitam correlacionar algumas características do sinal com o estado do equipamento. Dentre as várias técnicas que podem ser aplicadas, as mais utilizadas, consideradas clássicas e de aceitação universal, são: análise por nível global de vibração, análise por espectro da vibração, média temporal síncrona, demodulação e diagramas de órbita, (ARATO, 2004).

Dados de vibração podem ser medidos com acelerômetros e processados utilizando um analisador de sinal. O sinal pode ser analisado em dois domínios:

- Tempo.

- Frequência.

Nos próximos tópicos serão apresentadas as descrições desses domínios assim como o tratamento desses sinais, os instrumentos de medições, as fontes de vibrações de uma máquina, entre outros.

2.8.1- Descrição no Domínio do Tempo

Um sinal vibratório pode ser apresentado pela construção de um gráfico para valores da amplitude do sinal em função do tempo, a partir de um dado instante considerado como tempo zero. A amplitude de vibração pode ser representada pela aceleração, velocidade ou movimento.

As formas de onda são analisadas por comparação com as formas de onda previamente coletadas, e observadas por impulsos repetitivos que possam relatar as frequências dos rolamentos, das engrenagens ou de outros componentes. Na Figura 2.37, o sinal vibratório causado pelo desbalanceamento é o sinal dominante. Ele tem elevada amplitude comparado com os defeitos de rolamento ou de engrenagens. Por esta razão, a menor amplitude de forma de onda mostra-se sobreposta nas ondas provocadas por desbalanceamento (GREEN, 2003).

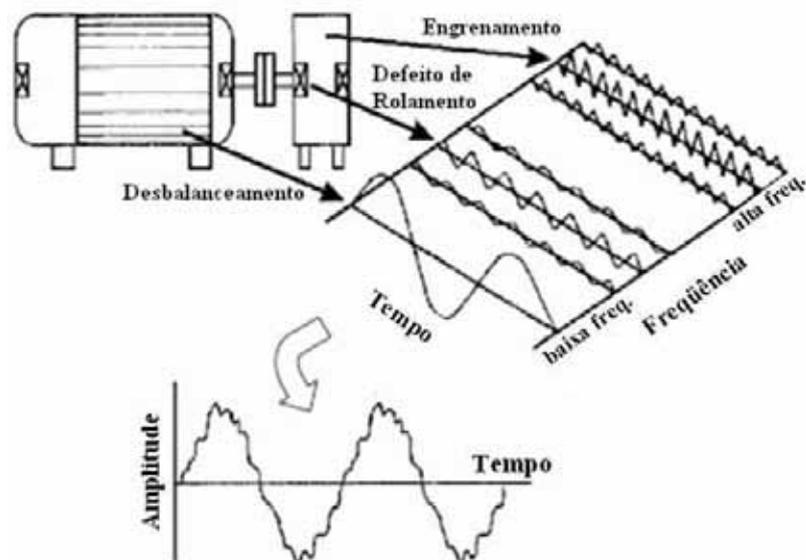


Figura 2.37 - Sinal Vibratório no domínio do tempo (GREEN, 2003).

Os elementos vibratórios podem ser divididos em função do período de repetição, finito ou infinitamente longo, em: vibrações periódicas, vibrações aleatórias e vibrações transitórias.

- **Vibrações Periódicas** - Vibrações que se repetem segundo um dado período de tempo.
- **Vibrações Aleatórias** - Vibrações que são imprevisíveis, quanto ao seu valor instantâneo, para qualquer instante de tempo futuro.
- **Vibrações Transitórias** - Vibrações que existem apenas num espaço limitado no tempo, sendo nula em qualquer outro tempo.

Os fenômenos vibratórios das máquinas raramente se apresentam como sinais senoidais, ou seja, periódicos, mas sim como fenômenos complexos contendo um número apreciável de componentes, tanto em frequência quanto em amplitude, devido aos vários componentes vibrando. Dessa forma, o problema de se analisar e estabelecer comparações entre diversos sinais de vibração não pode ser resolvido com base no simples conhecimento de valores de sua amplitude e frequência.

Uma forma de resolver este problema foi o estabelecimento de algumas medidas, cuja definição permite o cálculo de valores quantitativos globais para um movimento vibratório $x(t)$ qualquer, descrito no domínio do tempo. Estes valores são valor eficaz ou valor RMS (χ_{RMS}), valor médio (χ_m), fator de forma (F_f) e fator de crista (F_C), dados pelas Equações 2.6, 2.7, 2.8 e 2.9, respectivamente. Na Figura 2.38, tem-se os valores globais de vibração para um sinal de vibração complexo.

- Valor eficaz ou Valor RMS: $\chi_{RMS} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T \chi^2(t) dt}$ (2.6)

- Valor médio: $\chi_m = \frac{1}{T} \int_0^T |\chi(t)| dt$ (2.7)

- Fator de forma: $F_f = \frac{\chi_{RMS}}{\chi_m}$ (2.8)

- Fator de crista: $F_C = \frac{\chi_{pico}}{\chi_{RMS}}$ (2.9)

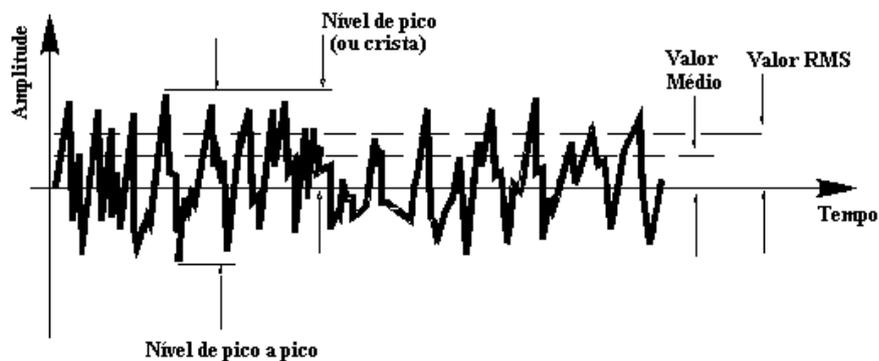


Figura 2.38 - Valores globais de medida de vibração para um sinal complexo (ARATO, 2004).

Deve-se observar que o fator de forma e o fator de crista dão uma idéia da forma de onda do fenômeno em estudo, ou seja, indicam se ele é mais ou menos homogêneo ao longo do período. Grandes valores para o fator de crista indicam a presença de algum pico destacado no período, resultante, provavelmente, de algum fenômeno repetitivo, com intervalos de tempo regulares. Valores de fator de forma próximos de $\sqrt{2}$ indicam fenômenos tendendo a senoidal.

2.8.1.1 - Média Temporal Síncrona

Como extensas análises no domínio tempo requerem uma ampla experiência para uma determinação segura de falhas, uma técnica chamada média temporal síncrona (TSA) é utilizada em muitos sistemas para auxiliar na correta determinação das falhas. Para obtenção de uma amostra síncrona do sinal vibratório de uma engrenagem em particular, é realizada uma média sobre várias revoluções dessa engrenagem, na qual cada bloco de amostragem tem o ponto inicial sempre na mesma posição angular referente a engrenagem em estudo. O sinal resultante deste processo possui, praticamente, somente as componentes que são síncronas com a rotação da engrenagem em questão. De fato se a média for realizada sobre um número suficiente de amostras, a TSA se aproxima de um sinal periódico verdadeiro, cuja periodicidade corresponde a um giro da engrenagem em estudo.

Outro ponto positivo deste método é a eliminação quase que total do ruído aleatório que pode estar presente, porque o valor da média de um grande número de amostras contendo apenas elementos aleatórios tende a zero. Uma dificuldade inerente à aplicação deste método é a necessidade da utilização de um *trigger*, para a obtenção de um sinal de referência, cuja finalidade é a determinação da posição angular da engrenagem em estudo. Outro problema é que, para se obter um diagnóstico completo sobre um redutor, é necessário que a análise utilizando a TSA seja repetida em cada engrenagem que o compõe (SILVA, 2001).

Um exemplo de onde a TSA é benéfica na análise de sistemas de engrenagens pode ser visto na Figura 2.39

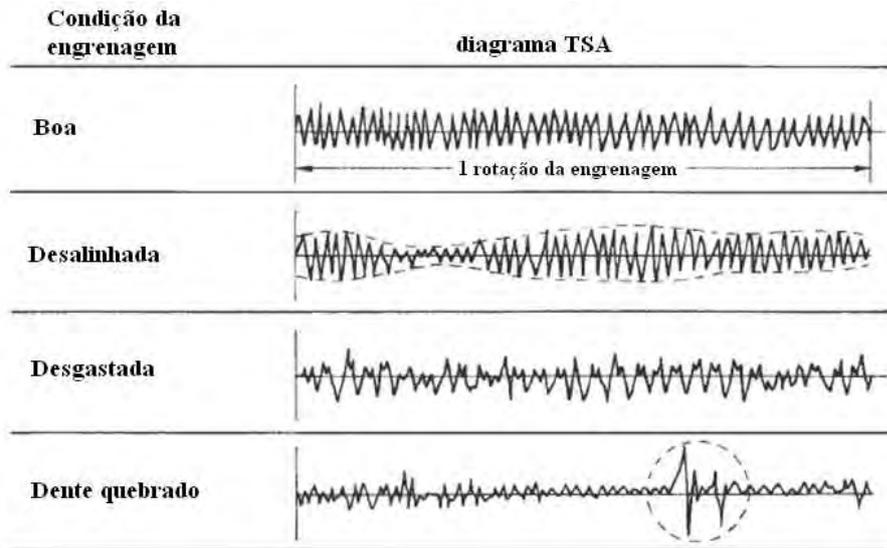


Figura 2.39 - Condições de engrenagens utilizando TSA (GOLDMAN, 1991 citado por GREEN, 2003).

2.8.2 – Descrição no Domínio da Frequência

A transformada rápida de Fourier (FFT) pode derivar uma forma de onda no tempo e apresentá-la no domínio da frequência como mostra na Figura 2.40. Este processo consiste na quebra de todo sinal vibratório em componentes individuais do sinal de vibração e plotagem destes em escala de frequência. Esse sinal no domínio da frequência é chamado de espectro de frequência e fornece uma informação valiosa sobre a condição de uma máquina.

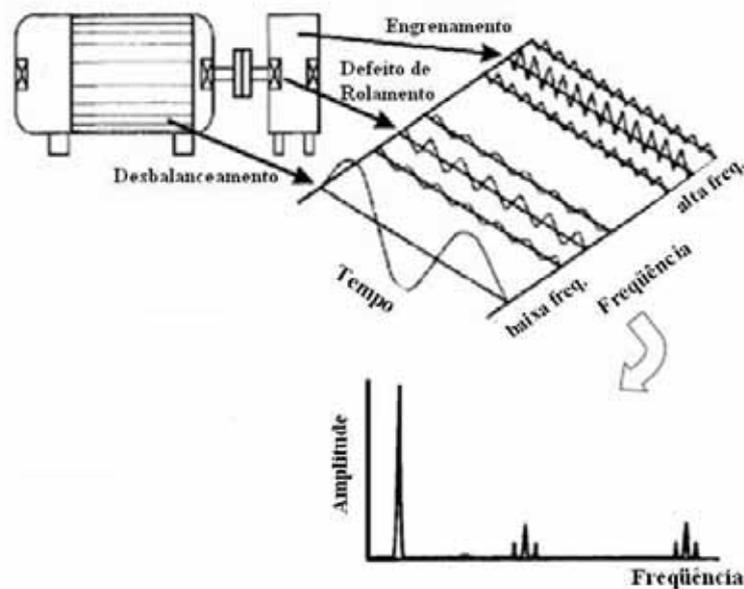


Figura 2.40 - Sinal vibratório no domínio da frequência (GREEN, 2003).

Os espectros de frequência são utilizados para conseguir informações que ajudam a determinar a localização do problema, a causa do problema e ainda o tempo para o problema se tornar crítico. Isto depende do tipo de máquina e é sempre relativo ao nível de vibração do bom funcionamento da máquina. A frequência é o número de vezes que um sinal de vibração ocorre em um dado período de tempo. A frequência na qual a vibração ocorre indica o tipo de falha e esta fornece a mais limpa indicação do que está causando a falha.

Novamente na Figura 2.40 pode-se ver os vários sinais de vibração decorrentes de falhas na máquina em faixas específicas de frequência. O desbalanceamento produz um sinal com a mais alta amplitude e com a menor frequência (1 RPM). Problemas nos rolamentos produzem a baixa amplitude e alta frequência, e sinais de vibração de baixa amplitude são produzidos na faixa da frequência de engrenamento a qual é determinada pelo número de dentes nas engrenagens.

2.8.2.1 - Obtenção do Espectro de frequência

Os princípios básicos para a Transformação Rápida de Fourier (Fast Fourier Transform – FFT) foram estabelecidos pelo matemático francês Fourier, em 1822. Ele demonstrou que qualquer sinal periódico pode ser dividido em uma série de vibrações harmônicas individuais computadas por amplitude e fase.

Pouco tempo depois, a integral de Fourier foi deduzida, mostrando os princípios básicos para a transformação de sinais a partir do domínio do tempo para o domínio da frequência é dada na Equação 2.10.

$$y(f) = \int_{-\infty}^{\infty} \chi(t) e^{-j2\pi ft} dt \quad (2.10)$$

O algoritmo e a técnica de conversão computacional a partir das quais a análise FFT foi desenvolvida são conhecidas desde 1965, e formam a base de todos os instrumentos de análise modernos. Os analisadores baseados em microprocessador são capazes de lidar com esse algoritmo em alta velocidade, resultando no termo comum *analisador de FFT* (Analisador de Transformação Rápida de Fourier).

Na transformação FFT, uma pequena seção é extraída do sinal de tempo (a assim chamada *janela de tempo*) e o espectro de frequência é calculado utilizando o algoritmo FFT. Durante esse processo o instrumento assume que o sinal nessa janela de tempo (*time data set* –

conjunto de dados no tempo) é continuamente periódico, ou seja, é repetido ao longo do tempo, conforme Figura 2.41.

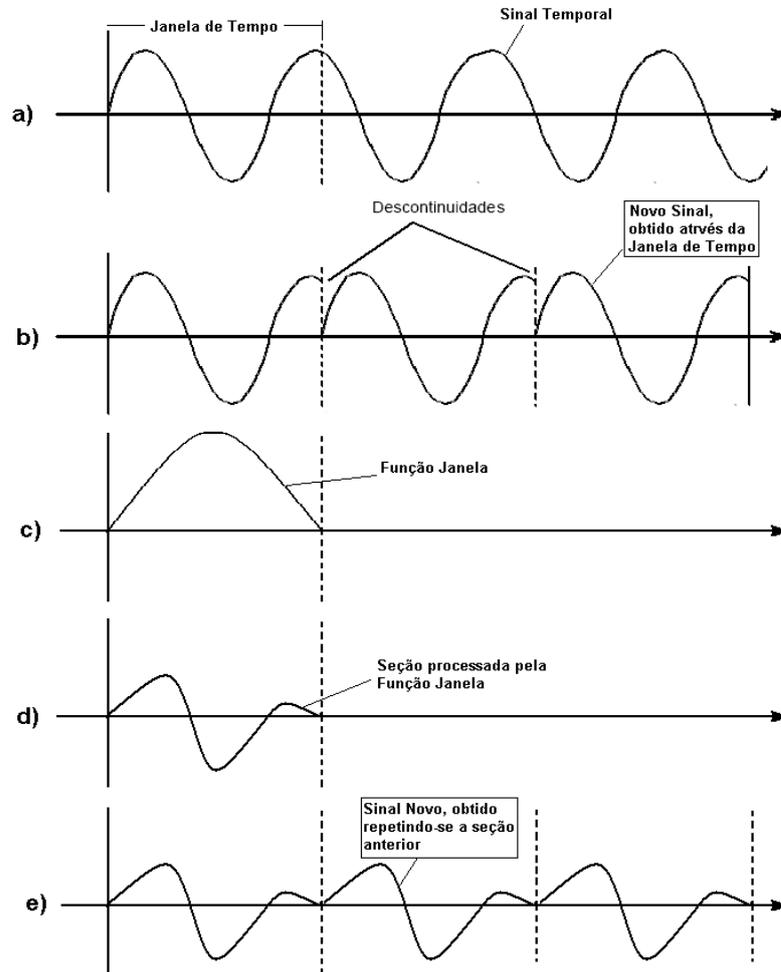


Figura 2.41 – Obtenção da transformada rápida de Fourier.

Dependendo da estrutura do sinal e das circunstâncias, algumas interrupções na seqüência podem ocorrer nas bordas da janela de tempo – o que refletirá nos componentes visuais de vibração.

Essas interrupções nas seqüências sempre ocorrem quando o número de períodos do sinal de tempo na janela de tempo não é um número inteiro. Para suprimir tais interrupções, uma função de ponderação é aplicada ao sinal dentro da janela de tempo. Via de regra, isso é feito de modo que os valores do sinal no início e no final da janela de tempo sejam atenuados até zero.

Quando, em seguida, o sinal de tempo é reconstruído no computador, todas as interrupções na seqüência do sinal são suprimidas.

É evidente que, devido a essa “manipulação”, o sinal original da vibração da máquina é deturpado. Para corrigir isso, os resultados da transformação são multiplicados por um fator de correção de modo que os valores exatos de amplitude sejam mantidos, após a transformação.

2.8.2.2 - Acompanhamento dos espectros de vibração

A avaliação dos espectros de frequência é uma excelente ferramenta na avaliação do estado de conservação do equipamento. Em um redutor de velocidades o acompanhamento do espectro de frequência pode identificar os problemas listados a seguir.

- Acoplamento impróprio entre os dentes.
- Excentricidade das engrenagens, este inclui: engrenagens com a altura dos dentes desiguais, largura dos dentes desiguais, etc.
- Engrenagens montadas em eixos curvados.
- Relaxamento, incluindo: relaxamento da engrenagem ou do rolamento do eixo e/ou da caixa.
- Excessivas marcas nas engrenagens.
- Engrenagem quebrada, emissão de barulho ou lascamento dos dentes.

A frequência de engrenamento nos dá uma avaliação dos problemas nas engrenagens, ela pode ser calculada pela multiplicação do número de dentes pela rotação do eixo da engrenagem.

Um exemplo de espectro de frequência sem falhas, operando com uma carga normal pode ser visto na Figura 2.42. Alguns exemplos de falhas comum podem ser vistos nas Figuras 2.43, 2.44 e 2.45, onde FE é a Frequência de engrenamento (n° de dentes multiplicado pela rotação) e f_n é a frequência natural da engrenagem.

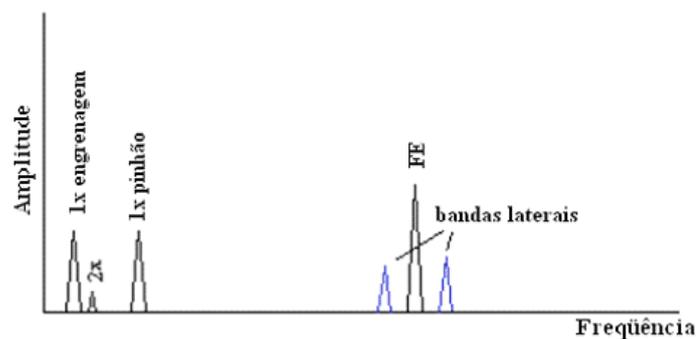


Figura 2.42 - Espectro de frequência de uma engrenagem de dentes retos em operação normal.

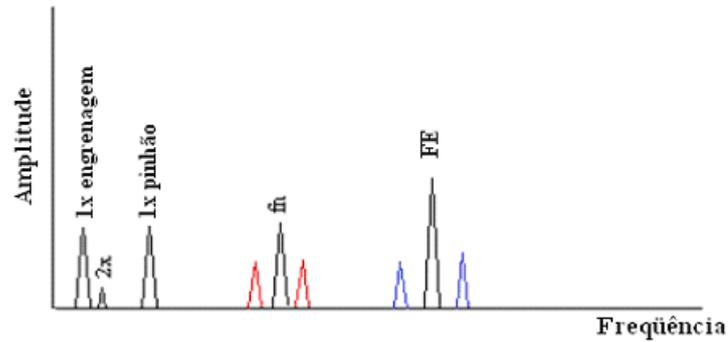


Figura 2.43 - Espectro de frequência de uma engrenagem com dente desgastado.

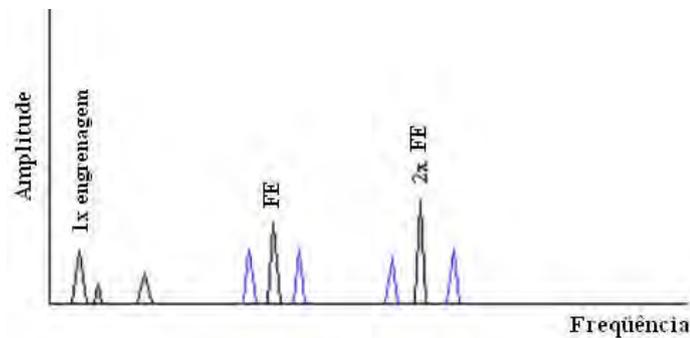


Figura 2.44 - Espectro de frequência de uma engrenagem desalinhada.

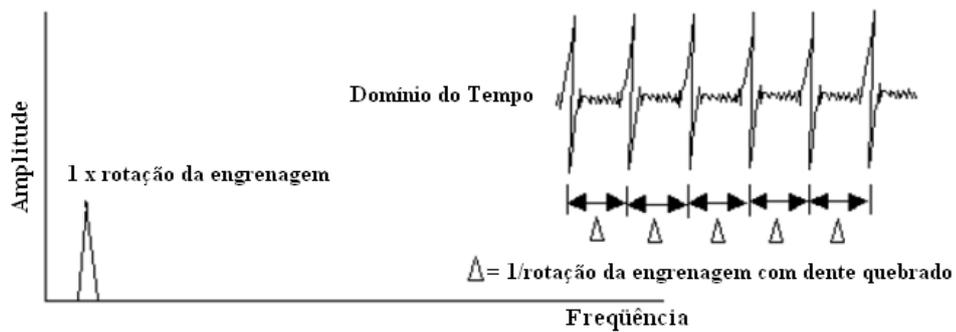


Figura 2.45 - Espectro de frequência de uma engrenagem com dente trincado ou fraturado.

2.8.3 - Coleta dos Dados

O sucesso da análise do estado da máquina depende também de uma coleta correta dos sinais vibratórios. Assim pode-se verificar as mudanças na máquina, proceder o diagnóstico mecânico e estudar a raiz do problema. As medidas fornecem uma preciosa colaboração para fixar a condição de funcionamento normal da máquina.

A fonte de excitação de qualquer vibração é a RPM de trabalho, ou seja, a vibração surge quando a máquina é acionada dando movimento aos elementos rotativos. O “elo de ligação” entre as partes rotativas (dinâmicas) e as partes fixas (estáticas) de uma máquina são os seus mancais de apoio dos rotores. Assim, as vibrações excitadoras irão do rotor para a carcaça passando pelo mancal e suas características são internas (para as vibrações próprias e elásticas do rotor) e externas (carregamento e ressonâncias).

Portanto os pontos de medição devem ser selecionados de modo que a rota de transmissão seja a mais curta e rígida possível. Pontos macios e flexíveis, ou pontos que sofrem amortecimento devem ser evitados. Normalmente, as caixas de mancal são apropriadas para a montagem de sensores.

Os pontos de medição devem ser planos, limpos e livres de óleo ou graxa. Superfícies enferrujadas ou com tinta descascada no ponto também devem ser evitadas ou limpas. O sensor deve firmar-se com segurança e não balançar. Durante a medição, tanto o sensor quanto o respectivo cabo devem se permanecer parados.

Todos os padrões e diretrizes recomendam que o valor RMS da velocidade de vibração seja medido respectivamente nas direções vertical, horizontal e axial nas posições de mancal na máquina, como mostrado na Figura 2.46. Os pontos e direções de medição para investigações adicionais devem permanecer na direção das vibrações principais a serem investigadas. Acelerômetros e sensores de velocidade de vibração são unidirecionais, ou seja, ambos os tipos de sensores são sensíveis às vibrações que ocorrem em uma direção perpendicular à superfície de montagem.

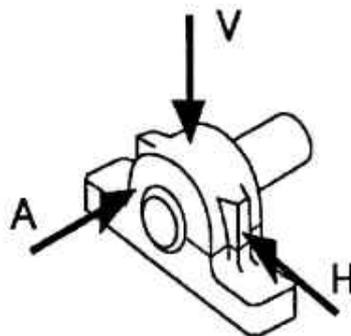


Figura 2.46 - Planos de medidas.

2.8.4 - Instrumentos de medida

Para a obtenção do sinal vibratório é necessário a utilização de uma cadeia instrumental, composta basicamente de um transdutor, um condicionador/amplificador, sistema de conversão A/D, microcomputador e software de aquisição. A seguir, apresenta-se uma breve descrição de cada um destes elementos.

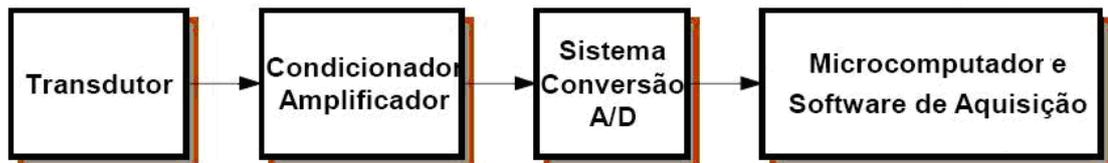


Figura 2.47 - Cadeia de medição utilizada para aquisição do sinal vibratório.

Transdutor

Usado para converter um movimento mecânico, no nosso caso a vibração a ser analisada, em um sinal elétrico ou magnético. Para análise de vibrações podemos usar transdutores de deslocamento, de velocidade ou acelerômetros. O mais utilizado, no entanto, é o acelerômetro, que pode ser visto na Figura 2.48.

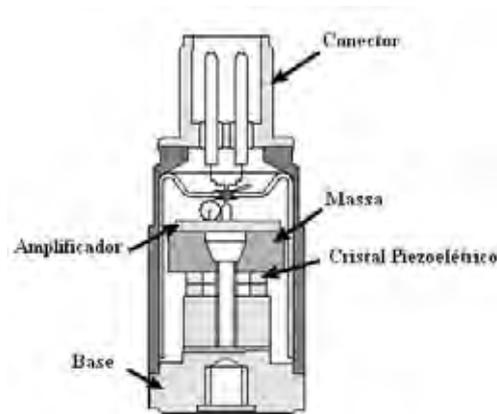


Figura 2.48 – Acelerômetro.

O acelerômetro é projetado para produzir uma voltagem elétrica proporcional ao movimento, velocidade ou aceleração da vibração usando um princípio piezoeletrico. Eles consistem em um cristal piezoeletrico e uma massa normalizada incluída em uma “caixa” de metal. Como a massa aplica uma força no cristal, este por sua vez produz uma carga elétrica proporcional a 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 utilização dos acelerômetros se deve pelas seguintes características:

- São pequenos e leves, tornando sua utilização acessível.
- Não tem partes móveis, aumentando assim sua segurança.
- Têm uma razoável constante de respostas lineares.
- Custo razoável de fabricação.
- Fornecem elevada economia para relativos níveis de energia em altas frequências, tornando-se assim um especialista em monitoramentos de rolamento e engrenagens.

A fixação dos acelerômetros deve ser preferencialmente fixado na superfície de medição por meio de aparafusamento, mas pode ser colado, fixado por base magnética e, em ultimo caso, firmemente pressionado no ponto com auxílio de uma haste com ponta cônica. Deve-se tomar muito cuidado com essa fixação, ela é essencial para uma leitura de vibração confiável.

Condicionador/Amplificador

É o responsável pelo tratamento do sinal coletado no transdutor, sua amplificação, compensação da resistência e capacitância do cabo e, em muitos casos fornece a intensidade ou nível de vibração em termos de deslocamento, velocidade ou aceleração. Possui elemento integrador que integra o sinal proporcional de aceleração para velocidade e de velocidade para deslocamento. Possui filtros do tipo passa-alta e passa-baixa para determinar a faixa de frequência medida, eliminando assim ruídos.

Sistema de Conversão Analógico/Digital

Converte o sinal analógico de saída do condicionador em um sinal digital. O condicionamento do sinal neste sistema pode incluir amplificação, filtragem, aplicações diferenciais, isolamento, amostragem simultânea e retenção, conversão corrente-voltagem, conversão voltagem-frequência, linearização e outros.

Microcomputador e software de aquisição

São os responsáveis pelo processamento numérico, armazenagem e transferência dos dados. São associados a programas de gerenciamento e análise de sinais, baseados em processamento pelo algoritmo FFT (*Fast Fourier Transform*) complementado por ferramentas gráficas importantes para a comparação e análise dos sinais.

2.8.5 - Análise pelo Nível Global de Vibrações

Na avaliação pelo nível global de vibrações (que representa a composição de várias fontes de vibrações) o estado de conservação do equipamento é verificado com base em um valor global calculado para os sinais de vibrações coletados nos pontos de medições. Os valores obtidos devem permanecer dentro de faixas admissíveis. A partir de uma tendência de evolução desses níveis de vibração é feita uma análise de frequência para identificação da origem do problema.

Níveis de Severidade

Os níveis de severidade seguintes são definidos para permitir uma avaliação qualitativa da vibração em uma determinada máquina e prover possíveis ações de manutenção. A ISO 10816-3 separa as condições de trabalhos em 4 níveis:

Nível A – Boas condições. Faixa normalmente encontrada após amaciamento, em máquinas novas ou revisadas.

Nível B – Aceitável para operação continuada. Faixa de operação normal das máquinas em boas condições de manutenção e operadas adequadamente.

Nível C – Limite tolerável. Faixa não aceitável para operação continuada. Nesta faixa deve-se operar o equipamento por um período limitado e deve-se programar uma revisão para ajustes ou consertos mais rápido possíveis.

Nível D – Não permissível. A severidade neste nível é considerada danosa para o equipamento. Deve-se parar imediatamente e realizar uma manutenção corretiva.

Esses níveis são fornecidos por normas internacionais para cada classe de máquina em inspeção. Porém devem ser encarados como recomendações para obtenção de referências, no início de processos de monitoramento.

No caso da aplicação para manutenção preditiva, as normas técnicas internacionais, dentre elas a ISO, definem dois critérios para adoção de um valor global. Um método avalia a severidade de vibração por meio da medição da vibração absoluta sobre partes não rotativas. O outro avalia as condições da máquina por meio da medição direta da oscilação dos eixos. (ARATO, 2004).

Segundo a NBR 10082, na Tabela 2.9 tem-se a classificação e avaliação das máquinas por níveis de severidade de vibração para quatro tipos de classes, conforme mostrado a seguir. As faixas de severidade são baseadas na norma ISO 2372/74.

Tabela 2.9 - Classificação e avaliação das máquinas por níveis de severidade de vibração.

FAIXA DE SEVERIDADE DE VIBRAÇÃO		AVALIAÇÃO DA QUALIDADE PARA CLASSES DIFERENTES DE MÁQUINAS			
FAIXA	VELOCIDADE NOS LIMITES (mm/s)	CLASSE I	CLASSE II	CLASSE III	CLASSE IV
0,28	0,28	A	A	A	A
0,45	0,45	A	A	A	A
0,71	0,71	A	A	A	A
1,12	1,12	B	A	A	A
1,8	1,8	B	B	A	A
2,8	2,8	C	B	B	A
4,5	4,5	C	C	B	B
7,1	7,1	D	C	C	B
11,2	11,2	D	D	C	C
18	18	D	D	D	C
28	28	D	D	D	D
45	45	D	D	D	D
71	Acima de 45	D	D	D	D

Classe I – Máquinas pequenas, com acionamento por motor elétrico diretamente acoplado, potência máxima de 15 KW.

Classe II – Máquinas médias, do tipo da classe I, com potência maior que 15 KW, até 75 KW. Motores ou máquinas montadas rigidamente até 300 KW.

Classe III – Máquinas motrizes grandes e outras máquinas grandes (>75 KW), com massas rotativas montadas sobre fundações rígidas e pesadas, que são relativamente rígidas na direção de medição de vibração.

Classe IV – Máquinas do tipo da classe III, montadas sobre fundações relativamente flexíveis na direção de medição de vibração, por exemplo, conjunto de turbogeradores.

Segundo a NBR 10082, na Tabela 2.10 tem-se as faixas de severidade de vibrações para a faixa de 10 a 1000 Hz.

Tabela 2.10 – Faixas de severidade de vibrações conforme NBR 10082 (Banda de 10 a 1000Hz).

FAIXA DE VELOCIDADE RMS (VALOR EFICAZ DA VELOCIDADE DE VIBRAÇÃO) – mm/s		
FAIXA DE CLASSIFICAÇÃO	ACIMA DE	ATÉ
0,11	0,071	0,112
0,18	0,112	0,18
0,28	0,180	0,28
0,45	0,28	0,45
0,71	0,45	0,71
1,12	0,71	1,12
1,8	1,12	1,80
2,8	1,8	2,8
4,5	2,8	4,5
7,1	4,5	7,1
11,2	7,1	11,2
18	11,2	18
28	18	28
45	28	45
71	45	71

Para máquinas girantes com velocidades de rotação na faixa de 600 a 12.000 rpm (10 a 200 Hz), a norma ISO 2372, VDI Richiline 2056, e no Brasil, pela NBR 10082, adotam o valor eficaz da velocidade de vibração, conhecido como velocidade RMS do sinal, como unidade de medida para identificação da severidade de vibração.

O parâmetro a ser medido é a velocidade de vibração absoluta sobre as partes da máquina, preferencialmente os mancais. Neste caso, o valor global escolhido como unidade de medida para indicação da severidade de vibração, o valor eficaz, ou simplesmente velocidade RMS (V_{ef}) não é representado por uma escala de valores única. Isto se deve à grande diversidade de formas, massa, montagem e condições operacionais dos equipamentos, o que acarreta valores da velocidade RMS diferentes para níveis de severidade aceitáveis, (ARATO, 2004).

Além dos níveis de vibrações, deve-se levar em consideração que aumentos bruscos (acima de 4 dB) na velocidade eficaz, mesmo quando estes permanecem em níveis aceitáveis, indicam o surgimento de defeitos.

A utilização do nível global de vibrações é uma técnica adequada para o monitoramento de muitos equipamentos e pode identificar muitos problemas. Esta também é muito confiável pois permite tomar providências antes que ocorra a falha da máquina. Na análise de vibrações é o processo de menor custo.

Uma das desvantagens deste método é que ele não permite que se estabeleça um diagnóstico preciso sobre a origem da falha que provocou a vibração excessiva. Para tal, há

necessidade não só da medida do nível global de vibração, mas também de uma análise de vibração, sendo tal análise tão precisa quanto maior a complexidade e a importância do equipamento em questão.

2.8.6 - Demodulação

Em situações mais complexas, onde se tem combinação de mais de uma fonte de excitação somada aos ruídos transmitidos através do suporte e das fundações das máquinas, o espectro de frequências obtido pode apresentar dificuldades de análise (CUNHA, 2005).

Para casos como este torna-se necessário o uso de outras técnicas mais dedicadas, como é o caso da técnica de demodulação. Esta identifica as fontes de ruído responsáveis pela excitação de respostas ressonantes na estrutura.

Através da demodulação, pode-se monitorar defeitos responsáveis por excitações do tipo impactos repetidos além de outros que produzam sinais moduladores, mesmo que o nível de energia da fonte não permita uma identificação direta de sua frequência no espectro geral, por gerar amplitudes pouco significativas, que ficam escondidas no nível do ruído de fundo.

Considerando-se, por generalização, que a modulação em amplitude de um sinal é definida como a multiplicação de um sinal por outro, sendo um processo inerente não linear criando novas frequências que não estão presentes em nenhum dos sinais envolvidos. A identificação da fonte de ruído associada ao defeito exige a identificação da frequência moduladora do sinal, (SILVA, 2001).

O processo de identificação da frequência moduladora de um sinal modulado é conhecido como demodulação e envolve os passos apresentados a seguir (SILVA, 2001).

- a- Filtragem do sinal por filtro passa banda para faixa de frequência identificada como modulada;
- b- Detecção do sinal modulador;
- c- Análise espectral desse sinal modulador detectado.

Para a detecção do sinal modulador existem várias técnicas. A aplicação da transformada de Hilbert que pode ser obtida a partir de $X(f)$ que é a transformada de Fourier do sinal filtrado $x(t)$ segundo as Equações 2.11 e 2.12;

$$x_{re}(t) = \text{Re} \left[2 \int_0^{\infty} X(f) e^{i2\pi ft} df \right] \quad (2.11)$$

$$x_{im}(t) = \text{Im} \left[2 \int_0^{\infty} X(f) e^{i2\pi ft} df \right] \quad (2.12)$$

Obtendo-se os sinais $x_{re}(t)$ e $x_{im}(t)$ a partir dos quais pode construir um sinal analítico $z(t) = x_{re}(t) + ix_{im}(t)$ (BENDAT, 1986 citado por SILVA, 2001), que pode ser representado pela Equação 2.13 onde $A(t)$ é o envelope e $\phi(t)$ é a fase instantânea do sinal $x(t)$ conforme as Equações 2.14 e 2.15.

$$z(t) = A(t) \cdot e^{i\phi(t)} \quad (2.13)$$

$$A(t) = \sqrt{x^2(t) + x_1^2(t)} \quad (2.14)$$

$$\phi(t) = \text{tg}^{-1} \left(\frac{x(t)}{x_1(t)} \right) \quad (2.15)$$

2.8.7 - Fontes Vibratórias de uma Máquina

Todo corpo na natureza possui uma frequência natural própria de sua constituição física. Desde um exemplo típico de sistema massa-mola, até aos mais complexos sistemas, todos possuem frequência natural própria.

Considerando um grau de liberdade, matematicamente ela é definida como sendo a relação entre a Rigidez (K) e a Massa (M) do corpo/sistema, Equação 2.16

$$\omega_n = \sqrt{\frac{K}{M}} \text{ (Hz)} \quad (2.16)$$

Qualquer elemento pode ser modelado por um sistema massa, mola e amortecimento. Este sistema pode representar qualquer parte de máquinas, ou seja, uma chapa de carcaça, mesa de mancal, eixo, rolamentos e seus componentes, base de concreto, ou ainda, qualquer corpo na natureza.

Os gráficos da Figura 2.49 mostram que, quando a frequência natural e a de excitação estão próximas ($\omega_{exc} / \omega_n \cong 1$), a amplitude tende a infinito, levando à quebra da máquina quando a resistência mecânica é ultrapassada. Neste caso o sistema está em ressonância.

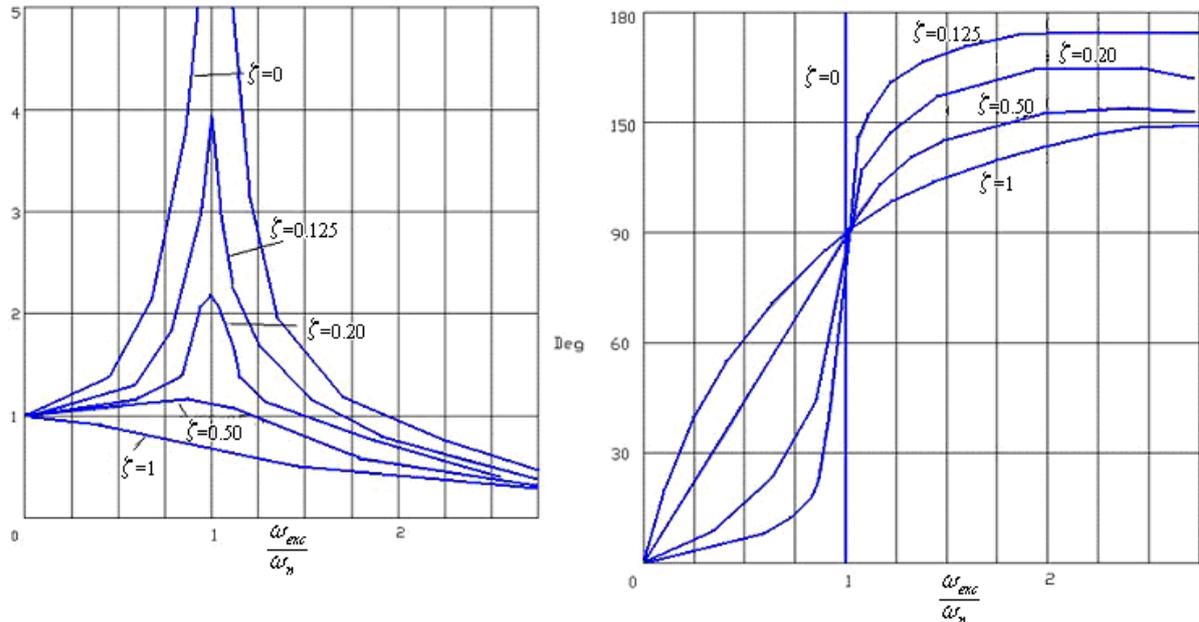


Figura 2.49 – Gráficos mostrando situação de ressonância.

Podemos observar nos gráficos que quanto maior o fator de amortecimento (ζ), menor são as amplitudes de oscilação na faixa de ressonância.

A ressonância é a interação física e matemática de dois ou mais eventos atuando simultaneamente. As energias dos eventos manifestando-se em frequências idênticas ou próximas entre si, darão surgimento a excitações não previstas inicialmente nos mais diversos sistemas mecânicos, elétricos ou estruturais.

O sinal vibratório é composto por diversas combinações de sinais, originados do movimento dos componentes associado a causas específicas. Então é necessário conhecer quais as características da vibração provocada pelas diversas combinações de causas e componentes.

2.8.7.1 - Desbalanceamento

O desbalanceamento é um esforço adicional atuante nos mancais de apoio de peças rotativas devido a massas desequilibradas em relação ao eixo de inércia. Sua vibração é bem determinada, com componente predominante na direção radial e sua frequência coincide com

a frequência de rotação do eixo. Sua amplitude é proporcional à quantidade de desbalanceamento e ao quadrado da rotação.

As causas mais comuns de desbalanceamento são:

- Fabricação deficiente;
- Desgaste;
- Manutenção incorreta;
- Impregnação de materiais em rotores
- Armazenagem;
- Transporte;
- etc.

2.8.7.2 - Desalinhamento

É uma importante fonte de vibrações em máquinas e pode, muitas vezes, passar despercebida ou ser desprezada. Este é um problema tão comum quanto o desbalanceamento devido ao fato de que em uma montagem mecânica existem vários eixos, mancais e acoplamentos com características dinâmicas diferentes. Quando o conjunto gira as forças dinâmicas interagem excitando vibrações no sistema. Este gera uma vibração radial com frequência igual ao giro do eixo, acompanhado de outras frequências iguais ao dobro e triplo da velocidade de rotação (harmônicos). De maneira geral, apresenta também componente na direção axial do eixo, com a mesma composição de frequências.

O importante, para diferenciar as vibrações oriundas de desbalanceamento daquelas oriundas de desalinhamento, é que enquanto o desbalanceamento apresenta vibrações com componentes máximos apenas radiais, o desalinhamento apresenta componentes com amplitudes da mesma ordem no sentido radial e axial (ARATO, 2004).

2.8.7.3 - Eixo Torto

Em um equipamento qualquer, a existência de um eixo defletido dá origem a uma vibração cuja frequência é o dobro da frequência de rotação do eixo em questão (ARATO, 2004).

2.8.7.4 - Rolamentos danificados ou inadequados;

Por serem elementos submetidos a cargas cíclicas, o principal tipo de falha sob condições normais de uso é o lascamento por fadiga de contato nas pistas ou nos elementos girantes (MCFADDEN, 1990 citado por SILVA, 2001).

Os defeitos em rolamentos se manifestam produzindo frequências de danos típicas. São *não síncronas*, isto é, não são múltiplas inteiras da velocidade de rotação do eixo. Isso pode permitir a sua identificação, mesmo quando não se conhece qual o rolamento instalado na máquina monitorada.

Existem quatro frequências básicas geradas por defeitos de rolamentos e são relacionadas com o comportamento dinâmico de seus principais componentes, ou seja:

- Frequência de passagem de elementos rolantes por um ponto da pista interna (BPFI do inglês *Ball Pass Frequency Inner Race*), associada a defeitos na pista interna.
- Frequência de passagem de elementos rolantes por um ponto da pista externa (BPFO do inglês *Ball Pass Frequency Outer Race*), associada a defeitos na pista externa.
- Frequência de giro dos elementos (BSF do inglês *Ball Spin Frequency*), associada a defeitos nos elementos rolantes (rolos ou esferas).
- Frequência de giro da gaiola (FTF do inglês *Fundamental Train Frequency*), associada a defeitos na gaiola e a defeitos em alguns dos elementos rolantes.

Um outro defeito que pode aparecer nos rolamentos é a folga. Esta pode ser entre o rolamento e mancal/eixo ou então no próprio rolamento. As folgas aparecem nos espectros de vibrações nas frequências de rotação do eixo e suas harmônicas.

No surgimento e desenvolvimento de uma pequena falha na pista estacionária, o sinal obtido mostra alguns transientes periódicos (impactos) com amplitudes praticamente invariantes no tempo. Como consequência direta, essa fonte de excitação tipo impactante pode excitar frequências ressoantes do sistema eixo-mancal, estas estão localizadas geralmente nas altas faixas de frequência do espectro. Quando a falha se desenvolve na pista rotativa ou no elemento rolante, o efeito do carregamento e do meio de transmissão irão causar uma modulação na amplitude de vibração gerando um espectro, que apresenta uma frequência ressonante conjuntamente com bandas laterais mistas que dependem da posição angular da falha. Num estágio mais avançado da falha em rolamento, o sinal volta a apresentar características típicas de ruído aleatório somado a pequenos transientes, assim não permitindo fazer um diagnóstico confiável da frequência característica do defeito (SILVA, 2001).

2.8.7.5 - Vibrações em redutores

As fontes de vibrações de uma caixa redutora de velocidade podem ser classificadas em três grupos: sincronizadas e harmônicas, não sincronizadas e as derivadas de impactos repetidos. Os danos possíveis relacionados com fontes de ruídos sincronizadas são o

desalinhamento dos eixos e as excentricidades dos engrenamentos. Os danos relacionados com fontes não sincronizadas são o atrito e danos na linha primitiva das engrenagens (pitting e desgaste localizado). Os danos em rolamentos e dentes são impactos repetidos que resultam em respostas ressonantes ao redor das frequências naturais do sistema (ARATO, 1992 citado por CUNHA, 2005).

As frequências de interesse para análise das fontes de vibração sincronizadas de um redutor de velocidade de engrenagens, são a frequências de giro dos eixos e a frequência de engrenamento. Já para redutores do tipo rosca sem fim, as frequências de interesse são: as frequências de giro dos eixos, as frequências ressonantes e as frequências devido ao atrito.

A seguir apresenta-se as principais fontes de vibração encontradas em redutores.

A - Frequência de Giro dos Eixos: trata-se de uma frequência sempre presente cujo valor é igual a rotação, em giros por segundo, dos eixos presentes que compõem o equipamento.

B - Frequência de Engrenamento: para cada par de engrenagens existe uma frequência correspondente e são devidas às deformações dos dentes durante o processo de engrenamento e desvio de forma desses dentes.

A frequência de engrenamento (f_e) é calculada pela Equação 2.17 onde N é o número de dentes da engrenagem e f_r é a frequência de giro do eixo ao qual esta acoplada.

$$f_e = N \cdot f_r \quad (2.17)$$

C - Atrito: as vibrações por atrito apresentam normalmente uma composição bastante ampla complexa, sendo detectada mais pelo barulho que produzem do que por seus efeitos, uma vez que a simples presença do barulho já indica uma irregularidade que é corrigida em qualquer instalação.

D - Harmônicos da frequência de Engrenamento: gera componentes espectrais cuja frequência é igual a duas, três ou quatro vezes a frequência de engrenamento, com baixas amplitudes. Decorrem dos desvios relativos ao perfil perfeito dos dentes, desvios estes causados pela deformação do dente sobre carregamento quanto por um desgaste desigual.

E - Danos no Dentado: os danos pontuais que podem estar presentes no dentado são: “pitting”, trincas e quebra de dentes. Todos estes são caracterizados através de uma perda localizada da rigidez do dente defeituoso, que reflete em uma mudança tanto na amplitude como em fase do sinal de vibração, durante o período de engrenamento do dente problemático. Estas mudanças ocorrem devido a uma modulação localizada, que reflete em

um aumento das bandas laterais presentes no espectro. Quando alguns desses defeitos são extensos, ocorre uma rápida e abrupta mudança na força aplicada no dente, este fato pode excitar frequências ressonantes do sistema eixo-mancal (MACFADDEN, 1992 citado por SILVA, 2001). Essas ressonâncias estão, por questão de projeto, localizadas entre a frequência de giro do eixo e a de engrenamento, e vem acompanhada de bandas laterais espaçadas da frequência de giro do eixo ao qual a engrenagem com problema está fixada.

2.8.7.6 - Vibrações de origem elétricas

As máquinas elétricas rotativas apresentam dois tipos de vibrações: a vibração devida a passagem dos pólos do rotor nas ranhuras do estator e os efeitos magnetostríticos devido a dilatação das lâminas. Esta última vibração coincide com um valor igual ao dobro da frequência alternativa da linha de alimentação. A primeira depende do número de pólos, fendas e rotação da máquina.

As vibrações eletromagnéticas devidas ao efeito de magnetostricção são facilmente detectáveis. Elas emitem um som igual àquele emitido pelos transformadores e reatores, já que sua frequência é igual ao dobro da frequência da linha. Sua identificação é imediata e basta desligar a corrente elétrica que elas cessam. Normalmente tais vibrações são axiais e radiam som pelo acoplamento rígido entre o motor, geralmente de pequena área radiante efetiva, e as superfícies e coberturas de equipamentos que apresentam grande área radiante.

As vibrações originadas pelas passagens dos pólos do rotor pelas ranhuras do estator apresentam uma frequência que depende do número de pólos e número de fendas do estator, assim como da rotação. A detecção dessas vibrações é problema delicado, uma vez que são facilmente confundidas com as frequências do rotor e suas harmônicas. Entretanto, cabe ressaltar que um aumento em seus componentes pode significar uma degradação do dispositivo, como por exemplo, uma variação inaceitável do entreferro (ARATO, 2004).

Capítulo 3

MATERIAIS E MÉTODOS

Neste trabalho, para verificar a eficácia das técnicas estudadas monitorou-se um redutor de velocidades do tipo cônica sem-fim. Para esta monitoração construiu-se uma bancada de ensaio onde o redutor, acoplado em seu eixo de entrada a um motor elétrico por meio de um acoplamento elástico, teve no seu eixo de saída uma carga composta de uma massa desbalanceada.

Na Figura 3.2, tem-se uma fotografia da bancada utilizada. As especificações do motor elétrico e do redutor estão nas Tabelas 3.1 e 3.2 respectivamente.



Figura 3.1 - Bancada de ensaio para verificação das técnicas estudadas.

Tabela 3.1 - Especificação do motor NBR 7094.

	Marca	WEG
	Tipo	Indução
	Nº Fase	Trifásico
	Potência Nominal	0,5 cv
	Frequência	60 Hz
	Rotação Nominal	1720 rpm
	Voltagem	220/380 V
	Rendimento	68,0 %

Tabela 3.2 - Especificação do redutor para uma rotação de 1720rpm na entrada.

	Fabricante	Macopema
	Modelo	Redutor zm rosca sem fim 11-V R-3
	Redução Efetiva	1:30
	Potência Entrada	0,53cv
	Potência Saída	0,31cv
	Quantidade de Óleo	0,25 litros

Como sistema de carga, na saída do redutor foi acoplado um mancal, Figura 3.2, e após o mancal uma massa de 7,5 Kg com um braço de 195 mm, como pode ser visto na Figura 3.1.



Figura 3.2 – Mancal utilizado na montagem da bancada.

Na Tabela 3.3, tem-se as frequências determinísticas dos rolamentos do motor. Na Tabela 3.4, tem-se as frequências determinísticas dos rolamentos do redutor, dos eixos de entrada e saída e do engrenamento.

Tabela 3.3 - Frequências de determinísticas dos rolamentos do motor (SKF, 2004).

Freq. Determinística	Rolamentos	
	6203-2Z	6202-2Z
BPFI	142 Hz	142 Hz
BPFO	87,5 Hz	87,4 Hz
BSF	114 Hz	114 Hz
FTP	13,2 Hz	11,9 Hz

Tabela 3.4 - Frequências determinísticas do redutor.

Freq. Determinística	Rolamentos		Freq. de rotação		Freq. de Engrenamento
	6008Z	6204Z	Saída	Entrada	
BPFI	197 Hz	142 Hz	0,95 Hz	28,67 Hz	28,67 Hz
BPFO	147 Hz	87,5 Hz			
BSF	191 Hz	114 Hz			
FTP	0,4 Hz	11 Hz			

3.1 – ENSAIOS ANTERIORES REALIZADOS NO MESMO REDUTOR

Este redutor foi utilizado anteriormente (2004-2005) com o mesmo propósito, porém não foi utilizada carga no eixo de saída. Os ensaios anteriores foram realizados sobre quatro parâmetros, com duração de 4 semanas cada (672 horas) e as coletas de óleo e vibrações foram feitas semanalmente (168 horas). No primeiro ensaio utilizou-se óleo recomendado pelo fabricante (ISO 320). No segundo utilizou-se um óleo (ISO 68) com viscosidade menor a do óleo recomendado. No terceiro utilizou-se o óleo ISO 320 acrescido de 0,4 gramas de pó de ferro, e no quarto utilizou-se o mesmo óleo acrescido de 0,8 gramas de pó de ferro. Nos resultados deste trabalho foram apresentados alguns dados desses ensaios.

Na Tabela 3.5, tem-se a especificação do óleo lubrificante ISO 320. Na Tabela 3.6, tem-se a propriedade do óleo lubrificante IRL hidráulico 68.

Tabela 3.5 - Especificação do óleo lubrificante ISO 320, (SCHAEFFEROIL, 2004)

Viscosidade a 40°C (ASTM D-445)	299-353 cSt
Viscosidade a 100°C (ASTM D-445)	27.94-33.34 cSt
Ponto de Fulgor ° F/° C (ASTM D-92)	490° / 254°
Ponto de Chama ° F/° C (ASTM D-92)	540° / 282°

Tabela 3.6 – Propriedade do óleo lubrificante IRL hidráulico 68.

Ensaio	Método de ensaio	Especificação	
		Mínimo	Maximo
Densidade a 20 °C, g/cm ³	ASTM D-4052	0,870	-
Ponto de fulgor, °C	ASTM D-92	185	-
Viscosidade Cinemática a 40 °C, cSt	ASTM D-445	61,2	74,8
Cor	Visual	Castanho	
Aparência	Visual	Líquido Límpido	

Após a primeira semana do primeiro ensaio o óleo foi coletado e o redutor foi desmontado e fotografado internamente. O primeiro ensaio teve como propósitos o estudo do amaciamento do redutor, a verificação do efeito da mudança da viscosidade e da introdução de contaminantes no óleo em todo o sistema e posteriormente a obtenção de uma diretriz conhecida como assinatura vibratória, a qual indica o estado de bom funcionamento do equipamento.

3.2 - ENSAIOS REALIZADOS NESTE TRABALHO

Para os novos ensaios, além da simulação de uma carga desbalanceada no eixo de saída do redutor, foi utilizado o óleo recomendado (ISO 320 – ENSAIO A), óleo ISO 320 contaminado com água em quatro concentrações diferentes(ENSAIO B) e óleo ISO 320 contaminado com abrasivo em duas concentrações diferentes (areia – ENSAIO C). Os ensaios A e B duraram 4 semanas cada (672 horas) e as coletas de óleo e vibrações foram feitas semanalmente (168 horas). O ensaio C durou pouco mais de 168 horas, pois foi verificada a falha dos rolamentos do eixo de entrada (parafuso sem-fim) do redutor.

3.3 - MEDIDAS DE VIBRAÇÕES

Os sinais de vibrações foram coletadas nas direções vertical, horizontal e axial. As análises foram feitas no tempo e na frequência afim de se determinar o princípio e a severidade do desgaste ativo e para ajudar na diagnose da causa do desgaste. A Figura 3.3 apresenta os pontos do redutor onde foram colocados os sensores para coleta dos sinais de vibração.

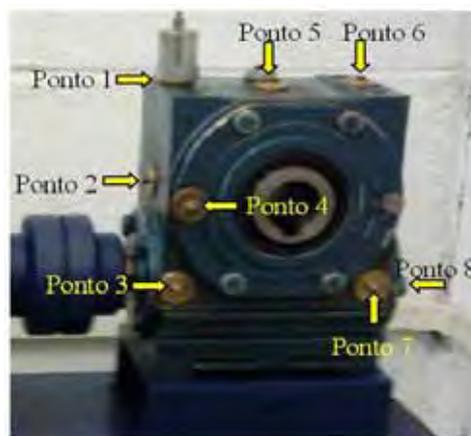


Figura 3.3 - Pontos de coletas dos sinais de vibrações.

Nos ensaios anteriores foram analisados os espectros obtidos em todos os pontos e apresentados apenas os espectros obtidos nos pontos 2 ,3 ,5 e 7, pois verificou-se que eram suficientes para o diagnóstico do redutor. Os pontos foram escolhidos devido ao grau de importância e informações fornecidas. Neste trabalho também adotou-se esta metodologia

Pela norma deve-se monitorar primeiramente os mancais. Desta forma escolheu-se os pontos 3 e 7. Os pontos 2 e 5 representam as duas outras direções restantes. Estes pontos contêm todas as informações fornecidas pelos pontos 1, 4, 6 e 8.

Os sinais temporais de vibração foram adquiridos medindo-se a velocidade de vibração do redutor. Para tais medidas utilizaram-se acelerômetros piezoelétricos, um Condicionador/Amplificador de 4 canais, sistema de aquisição de dados DaqBook e um computador do tipo NoteBook. As frequências de amostragem foram de 500 Hz, 1 KHz, 5 KHz e 10 KHz, e os filtros analógicos correspondentes foram de 141 Hz, 281 Hz, 2250 Hz e 4500 KHz. Para cada frequência foram tomadas 10 amostras de 2048 pontos cada.

Os sinais temporais de vibração adquiridos foram processados, usando o algoritmo FFT (Fast Fourier Transform), e analisados em laboratório através do “software” DASylab.

Na Figura 3.4, tem-se o *worksheet* utilizado na obtenção do sinal temporal e do valor eficaz da velocidade de vibração. Na Figura 3.5, tem-se o *worksheet* utilizado no processamento do sinal temporal.

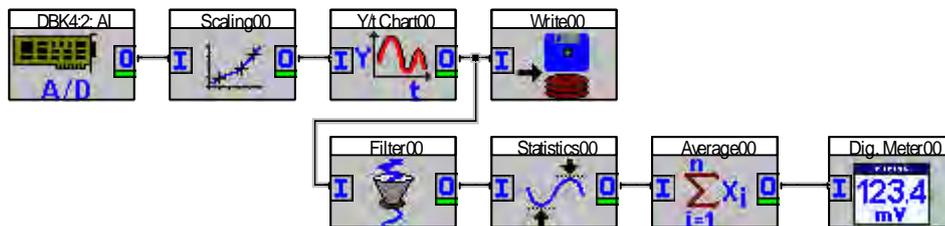


Figura 3.4 - *Worksheet* utilizado na obtenção do sinal temporal e do valor eficaz da velocidade de vibração.

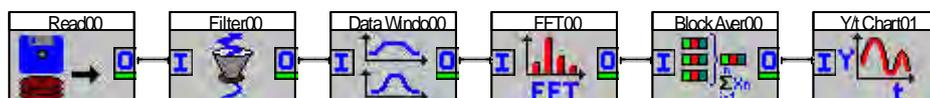


Figura 3.5 - *Worksheet* utilizado no processamento do sinal temporal.

Como o acelerômetro está medindo a velocidade de vibração do redutor, utilizando-se um indicador de leitura obtêm-se diretamente o valor da grandeza medida, ou seja, o valor eficaz da velocidade de vibração para cada frequência de amostragem distinta. Já o valor da severidade de vibração é obtido quando um sinal de vibração com uma frequência amostral de 5000Hz é lido, porém submetido a um filtro passa alta de 10 Hz e um passa baixa de 1000 Hz. Tanto o valor eficaz da velocidade de vibração como a severidade de vibração são obtidos

utilizando o “software” DASylab, que contém diversas ferramentas como: indicadores de leitura, filtros, etc.

Na Figura 3.6, tem-se o *worksheet* utilizado na medida da severidade de vibração.

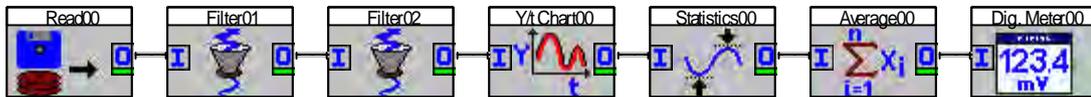


Figura 3.6 - *Worksheet* utilizado na medida da severidade de vibração (um filtro de 10Hz e outro de 1000Hz).

A análise de vibrações foi feita através da análise espectral, análise por demodulação e dos valores eficazes da velocidade de vibração e severidade de vibração.

Para a demodulação do sinal foi necessário utilizar uma rotina computacional sobre plataforma Matlab, denominada DEMOD criada por Silva (2001), responsável pelo cálculo da transformada de Hilbert.

Apenas os sinais temporais obtidos nos pontos 2 e 5 quando submetidos a altas frequência de amostragem foram demodulados, devido ao fato de serem os únicos sinais a apresentarem frequências ressonantes. Após a demodulação o sinal foi processado para obtenção do espectro do sinal demodulado.

Na Tabela 3.7, tem-se respectivamente, as especificações do transdutor, condicionador/amplificador, sistema de conversão de corrente e microcomputador utilizados. O software de aquisição utilizado foi o DasyLab fabricado pela IOTech Inc.

Tabela 3.7 – Equipamentos utilizados na cadeia de medição do sinal vibratório.

Transdutor	
	<p>Tipo Acelerômetro Piezoelétrico</p> <p>Modelo KS 50</p> <p>Número 2080</p> <p>Sensibilidade 2,29 mV/ms⁻²</p> <p>Freq. Ressonância 5 KHz</p>
Condicionador / Amplificador	
	<p>Fabricante Bruel&Kjare Sound and Vibration A/S</p> <p>Modelo Nexus 2693</p> <p>Canais 4 canais com simples e dupla integração</p>
Sistema Conversão A/D	
	<p>Fabricante IOTech, Inc</p> <p>Modelo Conjunto DaqBook/112</p> <p>Componentes 1 módulo DaqBook/112 e duas placas DBK 4</p> <p>Características DaqBook/112 Capacidade para até 16 canais single-ended, resolução de 12 bits e tempo de conversão de 8µs</p> <p>Características DBK 4 Entrada de 2 canais para sinais dinâmicos, contendo filtros anti-aliasing de 141,6 Hz à 18 KHz.</p>
Microcomputador	
	<p>Fabricante Toshiba, Inc</p> <p>Modelo Notebook Satellite 2180 CDT</p> <p>Processador ADM K6 de 450 MHz</p> <p>Memória RAM 64 Mb</p> <p>Disco Rígido 6,4 Gb</p> <p>Sistema Operacional MS Windows 98</p>

3.4 - ANÁLISE DOS ÓLEOS

Na análise das amostras de óleo coletadas foram utilizados os equipamentos: separador de partículas, monitor automático de partículas ferrosas, contador de partículas, viscosímetro e microscópio óptico. Especificados na Tabela 3.8.

Tabela 3.8 – Instrumentos utilizados na análise do óleo lubrificante.

Depositor Rotativo de Partículas (RPD)	
	<p>Fabricante Kittiwake Developments Ltd Voltagem nominal 110/240 V Frequência 47 a 63 Hz Consumo 75 watts Dimensão 360 x 360 x 450 mm Peso 5,5 Kg Velocidade de rotação 0-200 rpm (4 velocidades prefixadas)</p>
Monitor Automático de Partículas	
	<p>Fabricante Kittiwake Developments Ltd Voltagem nominal 110/240V Frequência 47 a 63 Hz Consumo 15 watts Diâmetro Máximo da Amostra 53 mm Temperatura Ambiente 20°C - 30°C</p>
Microscópio Óptico Neophot 21.	
	<p>Microscópio de luz refletida da marca Carl Zeiss de Jena.</p>
Microscópio Óptico JENAVAL	
	<p>Microscópio de luz transmitida da marca Carl Zeiss de Jena.</p>
Viscosímetro modelo Rheostat.	
	<p>O Rheostat 2 é um viscosímetro de rotação e serve para determinar a viscosidade dinâmica de lubrificantes e graxas. Tem capacidade dinâmica entre 1 a 4×10^8 m.Pa.s. Fabricado por VEB Kombinant, Alemanha.</p>

Depositador Rotativo de Partículas (RPD)

Este depositador rotativo de partícula extrai partículas presentes numa amostra de óleo pela ação de forças magnéticas, centrífugas e gravitacionais que atuam sobre as mesmas. As partículas são depositadas sobre uma lâmina de vidro formando três anéis concêntricos, durante esta deposição ocorre uma separação das partículas em relação ao seu tamanho, na qual partículas maiores (1-200 μ m) se deposita no anel interno, médias (1-50 μ m) no anel médio e partículas pequenas (1-10 μ m) no anel externo. As lâminas de vidro são observadas em um microscópio óptico, uma vez que se deseja saber a forma, tamanho, concentração e composição das partículas presentes.

As partículas separadas também podem ser medidas quantitativamente colocando a lâmina em um PQA (monitor de partículas automático). Dois experimentos foram realizados para cada amostra,

Monitor Automático de Partículas

O PQA é um magnetômetro com duas bobinas organizadas de forma que a bobina de amostra (sensor) e a bobina de referência estão em equilíbrio quando não há nenhuma amostra no sensor. O sistema é projetado para assegurar cuidadosamente que ambas as bobinas respondem igualmente as mudanças na temperatura ambiente. Quando uma amostra de óleo que contém partículas ferromagnéticas é colocada no sensor (bobina de amostra), o equilíbrio entre as bobinas é alterado. O sinal resultante causado pelo desequilíbrio é ampliado, é filtrado, e é exibido como um "índice" de PQ; isto relaciona diretamente à massa das partículas ferromagnéticas na amostra.

O PQA é diretamente controlado por botões montados no painel dianteiro ou remotamente do teclado de um computador de PC associado. Uma exibição alfanumérica no painel dianteiro do PQA permite a seleção de modos alternativos de operação e dá uma exibição local dos dados do índice de PQ depois de cada medida. Dados de um grupo de amostras são armazenados na memória do PQA.

Nestes, amostras de 2ml são colocadas em um pote plástico, através de uma pipeta, estes potes são colocados para medição no aparelho. Depois de efetuadas as medidas, cada pote é entregue a uma calha de disposição. Entre as medidas a calibração do PQA é verificada automaticamente contra um padrão conhecido montado permanentemente debaixo do carrossel de medida. As amostras foram ensaiadas 5 vezes e foram tomadas as médias aritméticas dos resultados.

Capítulo 4

RESULTADOS EXPERIMENTAIS

4.1 - EXPERIMENTO ANTERIOR

Como apresentado anteriormente, o redutor já havia sido utilizado sem carga no eixo de saída e com outros parâmetros de ensaio. A seguir tem-se alguns resultados obtidos neste primeiro experimento.

4.1.1 - Análise de óleo Lubrificante

Na Figura 4.1, tem-se algumas lâminas preparadas no RPD (depositador rotativo de partículas) durante o experimento com óleo ISO 320. Na foto da esquerda pode-se observar a grande quantidade de partículas geradas na primeira semana de teste, referentes a fase de amaciamento do redutor. A foto da direita refere-se à primeira semana após a troca de óleo.

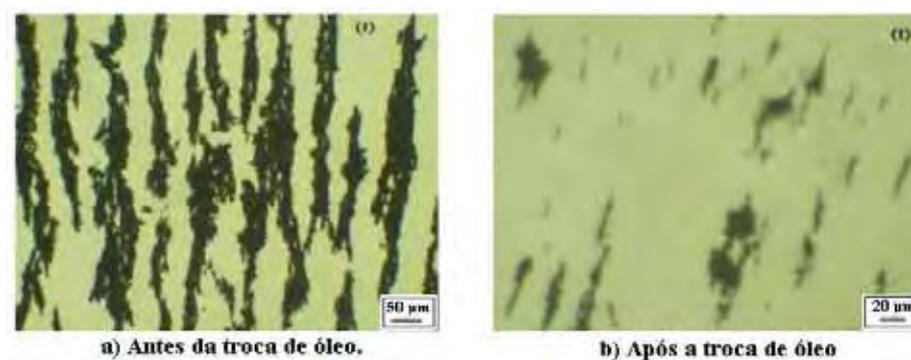


Figura 4.1 - Amostras do óleo ISO 320 utilizando luz transmitida.

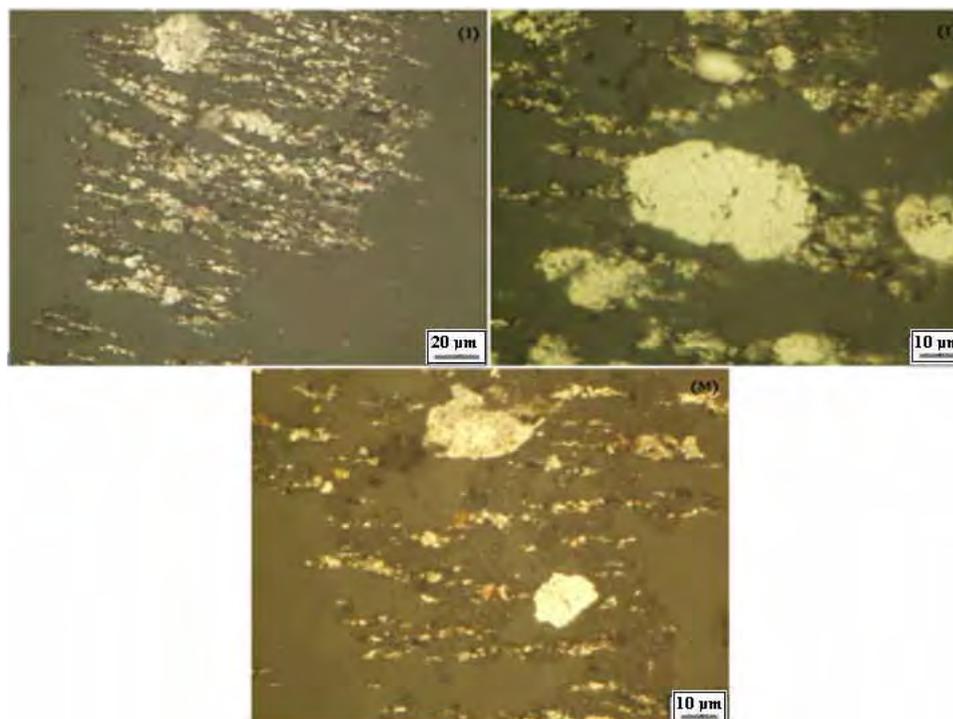


Figura 4.2 - Partículas de desgaste presentes no óleo após a terceira semana do óleo ISO 320. Luz Refletida. (I) anel interno, e (M) anel intermediário.

Pela Figura 4.2 observa-se a predominância de partículas de atrito. Na Tabela 4.1, tem-se alguns testes realizados no óleo ISO 320 depois de quatro semanas. Pode-se observar que o índice PQ na primeira semana foi muito maior que os demais. Isto também indica a fase de amaciamento. Ainda por esta tabela observa-se grande quantidade de “Si”. Este elemento foi introduzido devido à vedação adicional utilizando silicone, ao retentor, após a primeira troca de óleo.

Tabela 4.1 – Alguns testes realizados no óleo ISO 320 depois de 4 semanas.

Absorção Atômica (ppm)						ISO 4406	% água	TAN mgKOH/g	Visc. 40°C cst	Visc. 100°C cst	PQ Semana 1/2/3/4
Cu	Si	Al	Fe	Cr	Ni	21/19/16	0,00	1,50	304,81	35,94	148 /44 /46 /47
39	56	3	19	10	1						

Na Figura 4.3 estão apresentadas algumas partículas do experimento com óleo ISO 68. Devido a baixa viscosidade do óleo utilizado, o atrito entre os componentes do redutor aumentou bastante provocando assim desgaste do componente mais dúctil, ou seja, da engrenagem de bronze. Na Tabela 4.2, tem-se alguns testes realizados no óleo ISO 68 depois de quatro semanas, o baixo valor do índice PQ também indica que poucas partículas ferrosas foram geradas. Já o aumento do “Cu” indica aumento de partículas de bronze no óleo, uma vez que o bronze é uma liga de cobre e estanho.



Figura 4.3 - Amostras do óleo ISO 68 visualizadas com luz refletida após a última semana de teste.

Tabela 4.2 – Alguns testes realizados no óleo ISO 68 depois de 4 semanas.

Absorção Atômica (ppm)						ISO 4406	% água	TAN mgKOH/g	Visc. 40°C cst	Visc. 100°C cst	PQ B1/B2/B3/B4
Cu	Si	Al	Fe	Cr	Ni	23/22/2	0,00	0,74	67,90	8,96	28/28/29/31
50	51	2	16	1	1						

Na Figura 4.4 estão apresentadas algumas fotos de partículas dos experimentos com óleo ISO 320 acrescido de 0,4 gramas de pó de ferro com as características mostradas na Tabela 4.3. A foto da esquerda apresenta o anel médio após a segunda semana de teste, a da direita o anel interno após a última semana de teste.

Tabela 4.3 - Características do pó de ferro.

Densidade (g/cm ³)	Malha (%)					
	80	100	150	200	325	-325
2.70	1.3	10.9	25.50	27.30	24.20	10.80

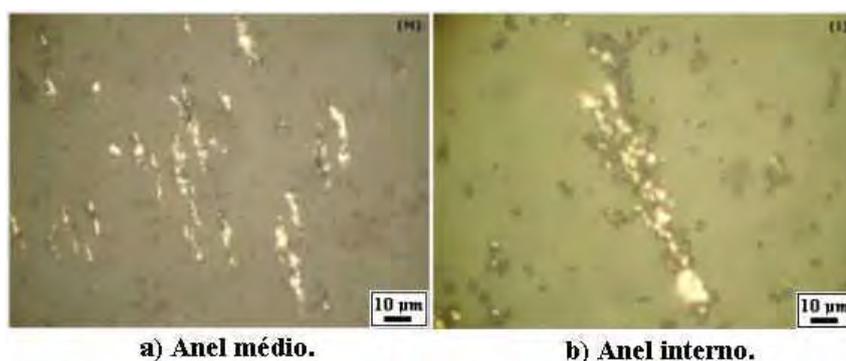


Figura 4.4 - Amostras do óleo ISO 320 acrescido de 0,4 gramas de pó de ferro, visualizadas com luz refletida.

Tabela 4.4 - Demais ensaios realizados no experimento C.

Índice PQ	C1	C2	C3	C4
	202	202	203	203

Na Figura 4.5, tem-se algumas fotos de ferrogramas do experimento com óleo ISO 320 acrescido de 0,8 gramas de pó de ferro. Na esquerda, foto do anel médio após a segunda semana de teste. Na direita, partículas de desgaste presentes na ultima semana (anel médio). Na Tabela 4.5, tem-se algumas análises feitas no óleo ao término do ensaio.

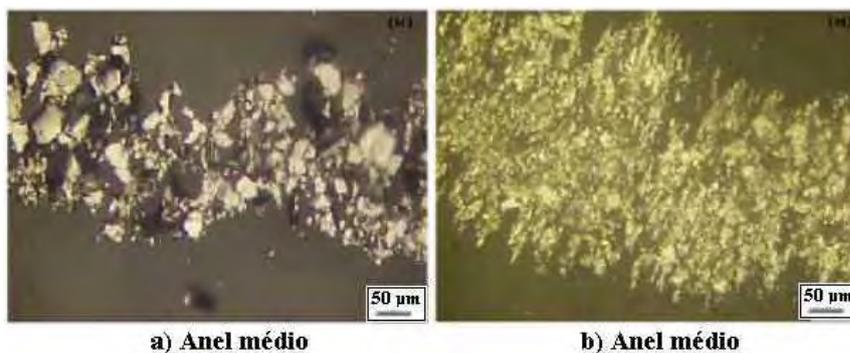


Figura 4.5 - Amostras do óleo ISO 320 acrescido de 0,8 gramas de pó de ferro, visualizadas com luz refletida.

Tabela 4.5 - Demais ensaios realizados no experimento com óleo ISO 320 acrescido de 0,8 gramas de pó de ferro.

Absorção Atômica (ppm)						ISO 4406	% água	TAN mgKOH/g	Visc. 40°C cst	Visc. 100°C cst	PQ D1/D2/D3/D4
C	Si	A	F	C	Ni	Sem Classif.	0,0	1,05	311,11	33,04	310/311/311/31 2
41	2	0	7	0	0						

4.1.2 - Análise de Vibrações

Na Figura 4.6, tem-se o espectro dos sinais de vibrações do ponto 3 para frequências amostrais e filtros analógicos diferentes, após a primeira semana, com óleo ISO 320. Na Figura 4.7, tem-se a evolução da severidade de vibração para o teste com ISO 320 na frequência amostral de 10 KHz. Na Figura 4.8, tem-se o desgaste na coroa com o uso do óleo ISO 68.

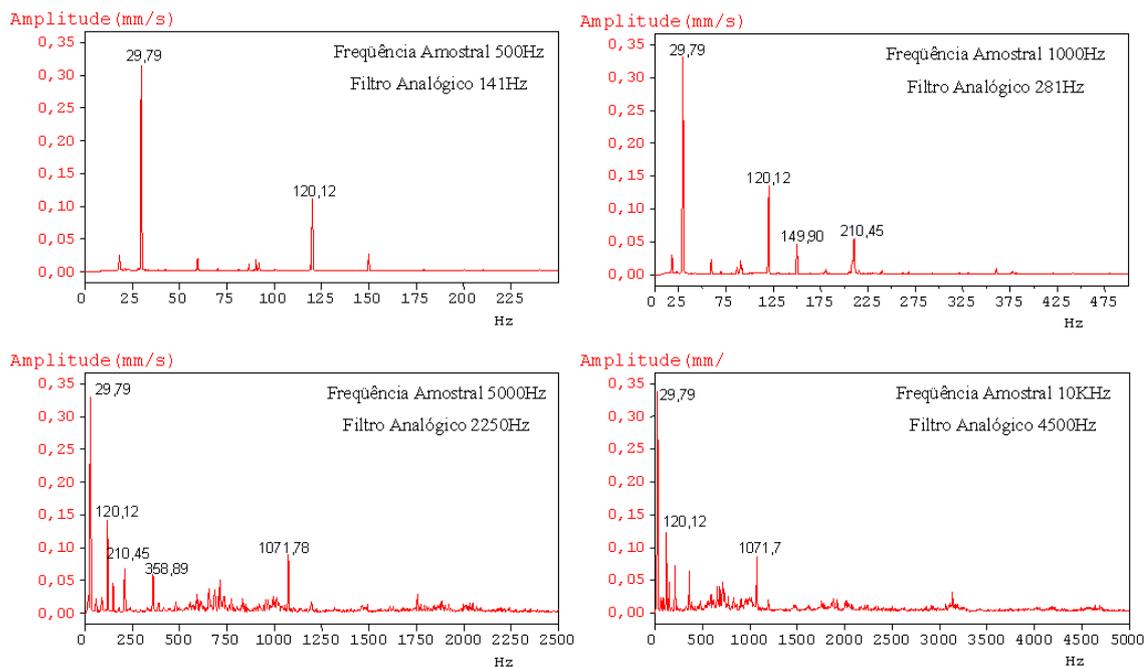


Figura 4.6 - Espectro do ponto 3 para diferentes frequências e diferentes filtros.

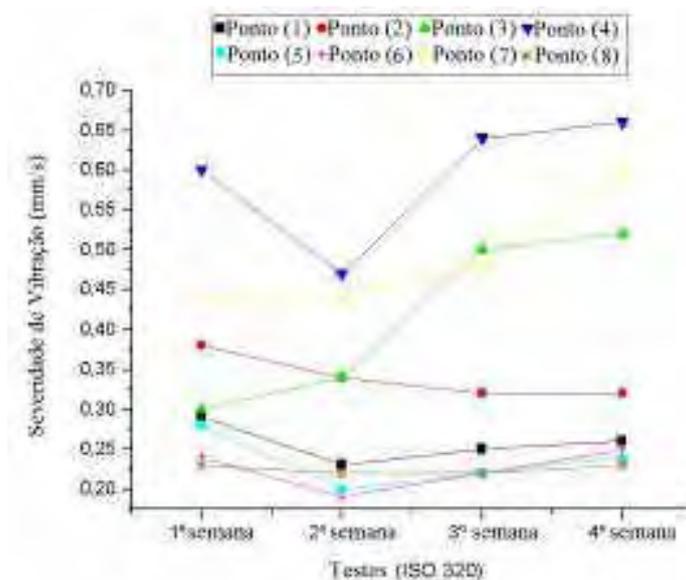


Figura 4.7 - Evolução da severidade de vibração medida pela NBR 10082.



Figura 4.8 – Foto mostrando o desgaste na coroa após o segundo teste (com óleo ISO 68).

4.2 - ENSAIOS REALIZADOS NESTE TRABALHO

4.2.1 - Análise de óleo Lubrificante

Inicialmente os elementos internos do redutor foram fotografados, para uma posterior comparação e verificação do desgaste, conforme mostrado na Figura 4.9.



Figura 4.9 – Elementos internos do redutor de velocidades.

As amostras de óleo foram preparadas no depositador rotativo de partícula (RPD). Foram analisadas e fotografadas utilizando o microscópio óptico Neophot 21 com uma luz transmitida adaptada. Na lâmina do RPD as partículas são dispostas em três anéis distintos, dependendo do tamanho da partícula, devido a isto foi necessário capturar as imagens observando estes três anéis separadamente.

Utilizando o monitor automático de partículas ferrosas obteve-se o índice PQ das amostras. Também foram obtidos a viscosidade, o teor de água, o índice de acidez e a absorção atômica das amostras de óleo ao final de cada ensaio.

Foram realizados três ensaios (A, B e C). Para cada ensaio foram feitas quatro coletas de óleo. Ao final de cada ensaio foram realizados teste de odor (olfato), aparência (visual), água (percentual), T.A.N (mgKOH/g), viscosidade a 40°C (cSt) e viscosidade a 100°C (cSt). Também foi realizado o teste de absorção atômica, mostrando o PPM de cada elemento presente no óleo. Finalmente apresentou-se o índice PQ das amostras.

Ensaio A – Primeira Coleta

Nas Figuras 4.10, 4.11, 4.12 e 4.13 estão apresentadas fotos após a primeira semana de ensaio com o óleo ISO 320 (ensaio A). Na Figura 4.10, tem-se uma foto do anel interno do RPD visualizada com luz transmitida.

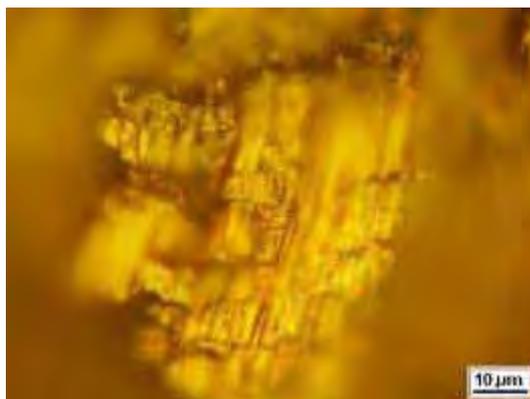


Figura 4.10 - Partícula de desgaste gerada no ensaio A. Foto do anel interno do RPD

Na Figura 4.11, tem-se duas fotos da mesma seção do anel interno do RPD, na primeira utilizou-se luz refletida e transmitida, na segunda apenas luz transmitida. Pode-se perceber como uso de diferentes tipos de iluminação pode facilitar na visualização das partículas.

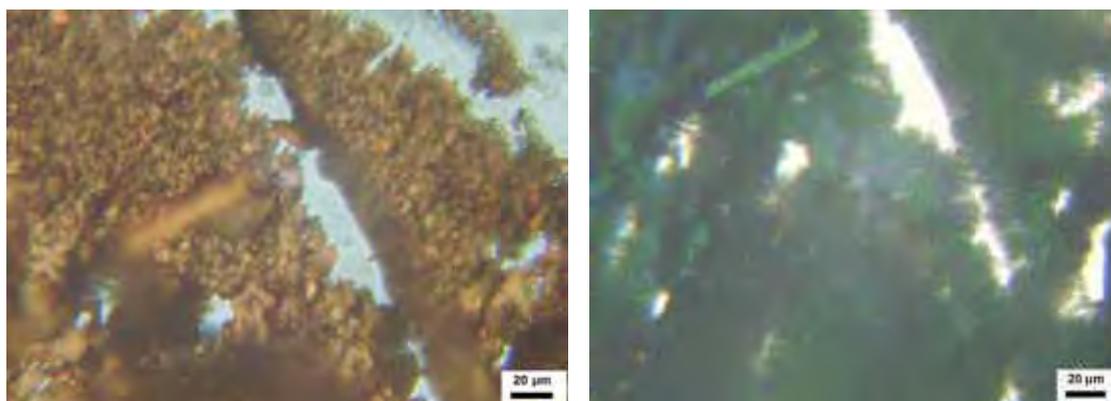


Figura 4.11 - Partículas de desgaste geradas no ensaio A. Fotos do anel interno do RPD.

Na Figura 4.12, tem-se fotos do anel médio do RPD visualizadas com luz transmitida e refletida. Nestas observamos uma partícula de bronze, uma partícula de desgaste por atrito e uma fibra de origem desconhecida respectivamente.

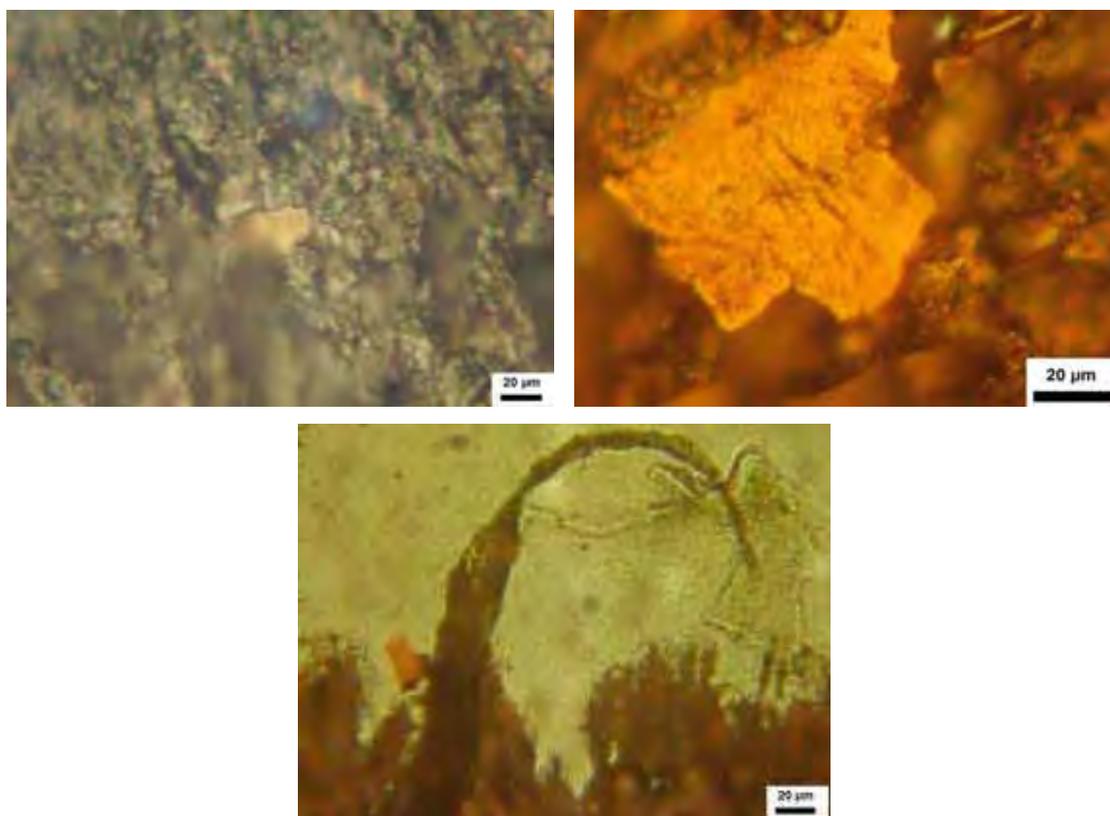


Figura 4.12 - Partículas de desgaste geradas no ensaio A. Fotos do anel médio do RPD.

Na Figura 4.13, tem-se fotos do anel externo do RPD visualizadas com luz transmitida e refletida.

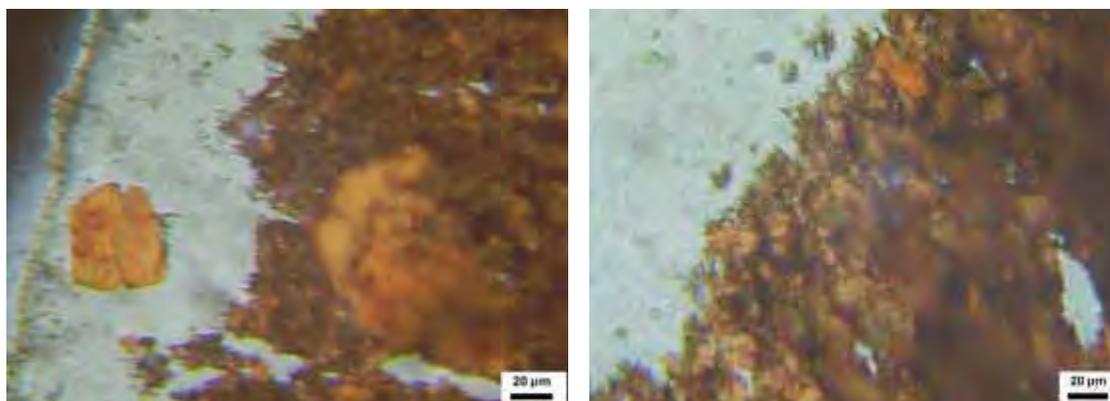


Figura 4.13 - Partículas de desgaste geradas no ensaio A. Fotos do anel externo do RPD.

Ensaio A – Segunda Coleta

Nas Figuras 4.14, 4.15, 4.16 e 4.17 estão apresentadas fotos após a segunda semana de ensaio com o óleo ISO 320 (ensaio A). Na Figura 4.14, tem-se fotos do anel interno do RPD visualizadas com luz transmitida.

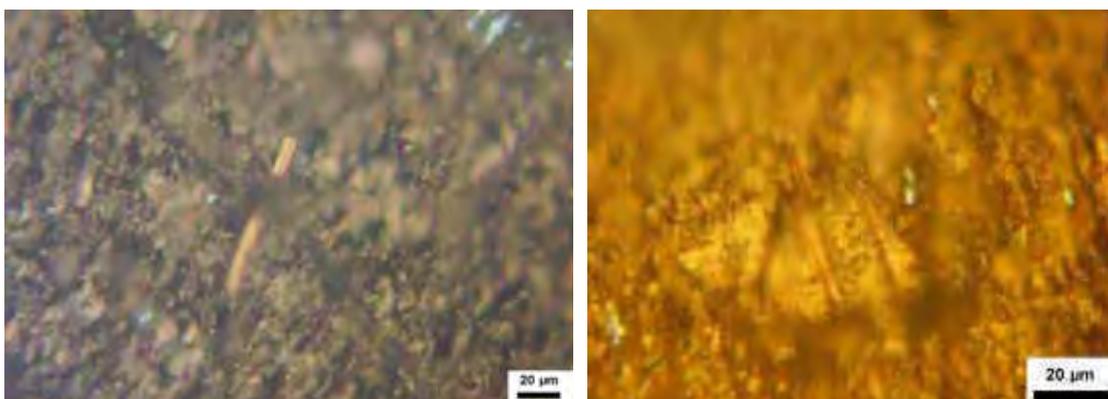


Figura 4.14 - Partículas de desgaste geradas no ensaio A. Fotos do anel interno do RPD.

Na Figura 4.15, tem-se fotos do anel interno do RPD visualizadas com luz transmitida. As três fotos são do mesmo campo de visão, porém com altura focal diferente. Nestas verifica-se a dificuldade da focalização de partículas grandes no microscópio ótico.

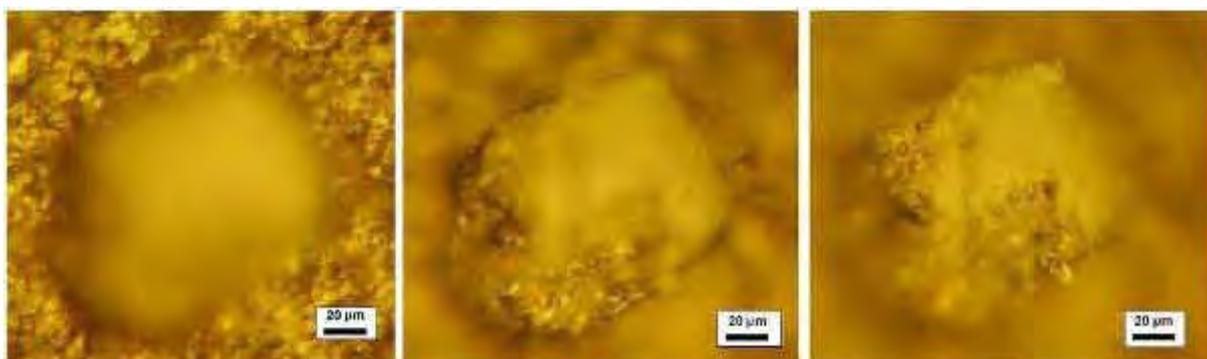


Figura 4.15 - Partícula de desgaste gerada no ensaio A. Foto do anel interno do RPD.

Na Figura 4.16, tem-se fotos do anel médio do RPD visualizadas com luz transmitida e refletida.

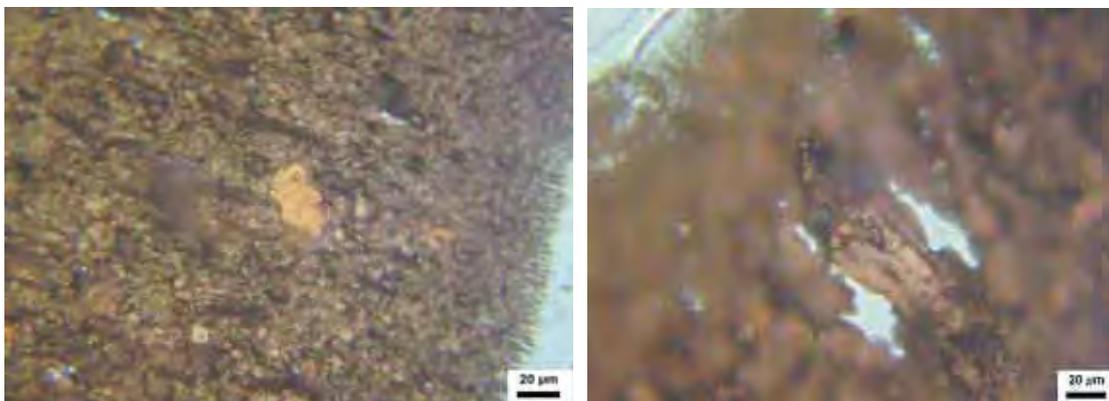


Figura 4.16 - Partículas de desgaste geradas no ensaio A. Fotos do anel médio do RPD.

Na Figura 4.17, tem-se fotos do anel externo do RPD visualizadas com luz transmitida e refletida.

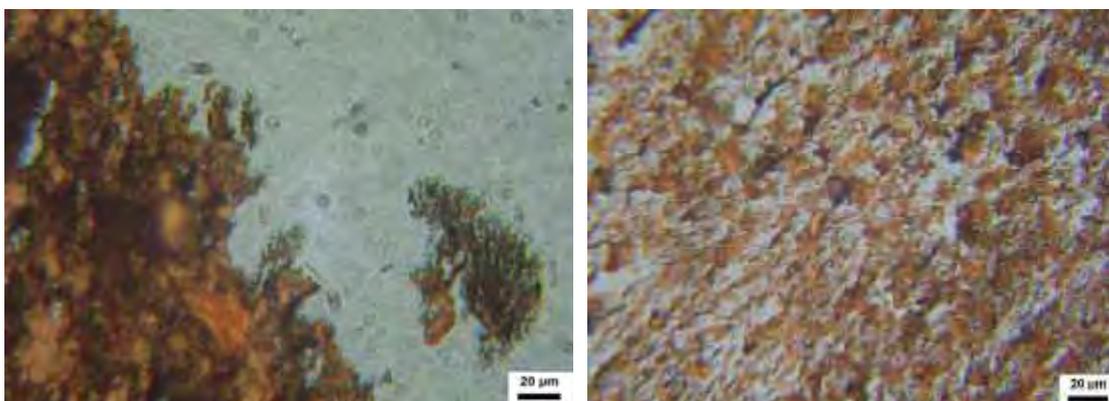


Figura 4.17 - Partículas de desgaste geradas no ensaio A. Fotos do anel externo do RPD.

Ensaio A – Terceira Coleta

Nas Figuras 4.18, 4.19, e 4.20 estão apresentadas fotos após a terceira semana de ensaio com o óleo ISO 320 (ensaio A). Na Figura 4.18, tem-se fotos do anel interno do RPD visualizadas com luz transmitida.

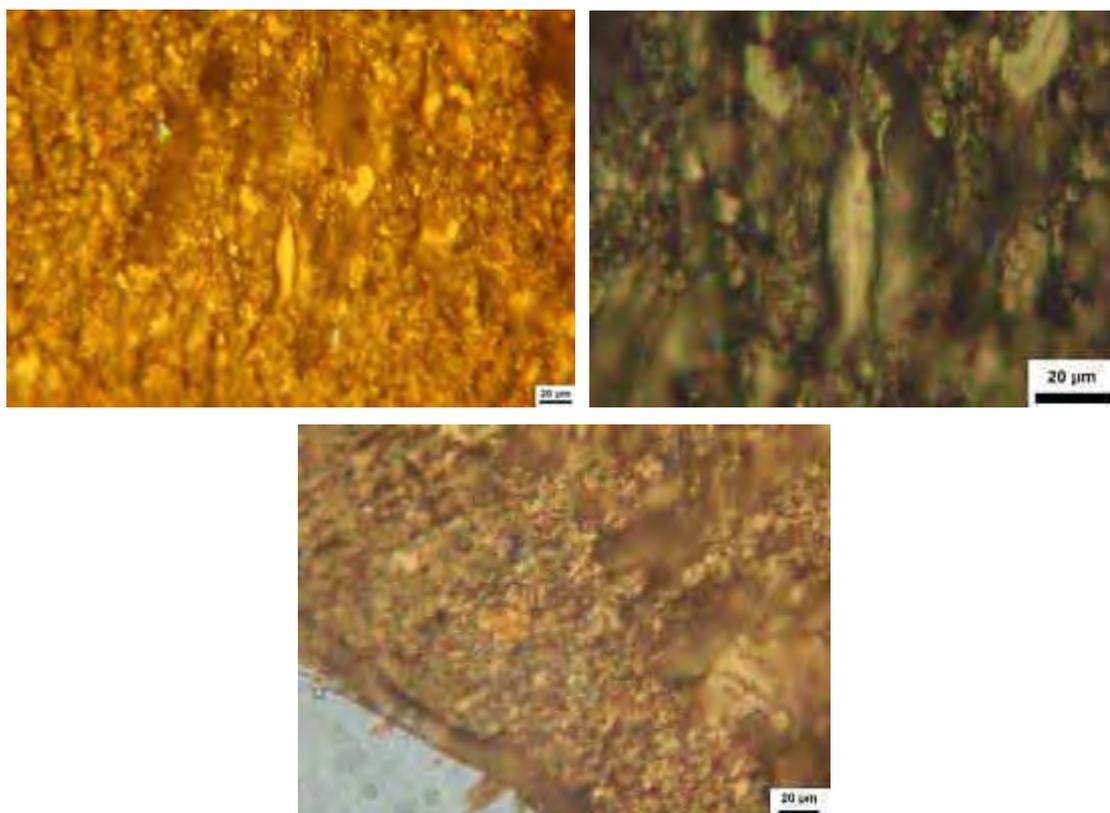


Figura 4.18 - Partículas de desgaste geradas no ensaio A. Fotos do anel interno do RPD.

Na Figura 4.19, tem-se fotos do anel médio do RPD visualizadas com luz transmitida e refletida. Na primeira foto, tem-se uma partícula estriada, provavelmente gerada por desgaste severo por deslizamento. A última foto apresenta uma partícula de bronze laminar gerada pelo desgaste por atrito.

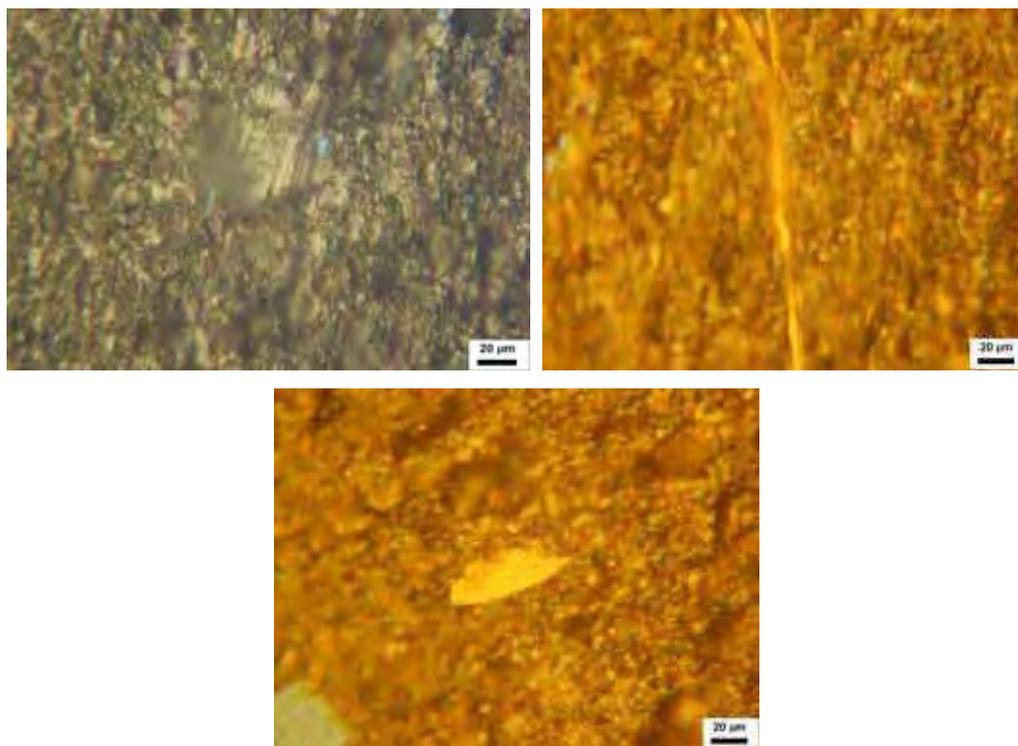


Figura 4.19 - Partículas de desgaste geradas no ensaio A. Fotos do anel interno do RPD.

Na Figura 4.20, tem-se fotos do anel externo do RPD visualizadas com luz transmitida e refletida.

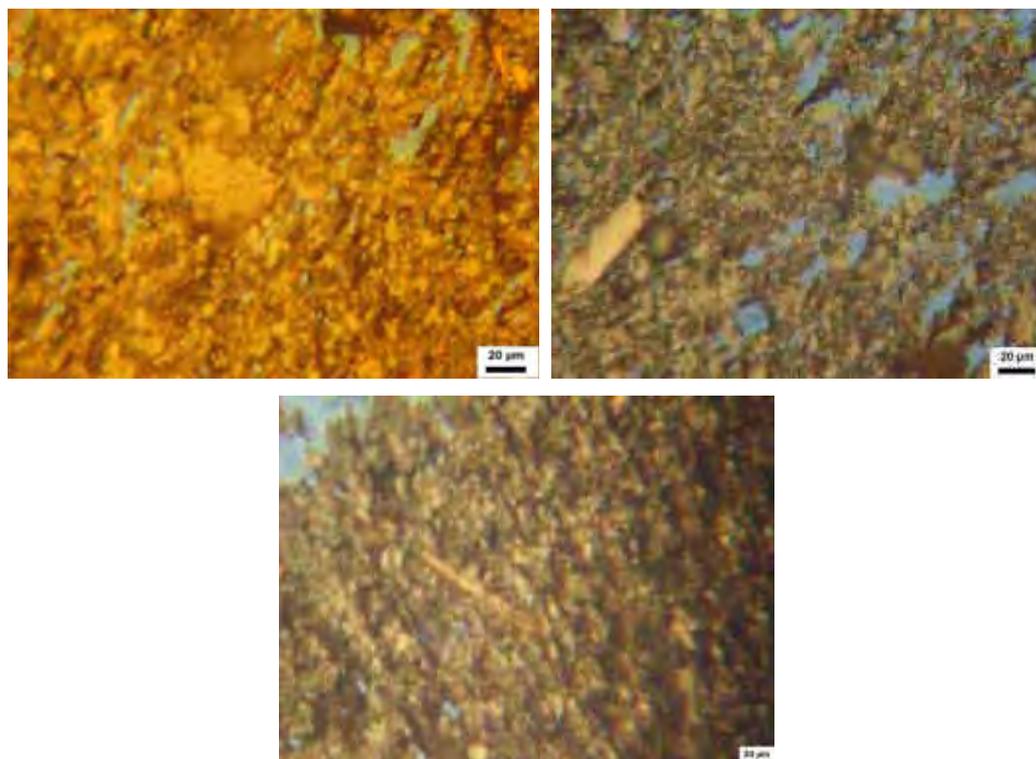


Figura 4.20 - Partículas de desgaste geradas no ensaio A. Fotos do anel interno do RPD.

Ensaio A – Quarta Coleta

Nas Figuras 4.21, 4.22, 4.23, e 4.24 estão apresentadas fotos após a quarta semana de ensaio com o óleo ISO 320 (ensaio A). Na Figura 4.21, tem-se fotos do anel interno do RPD visualizadas com luz transmitida.

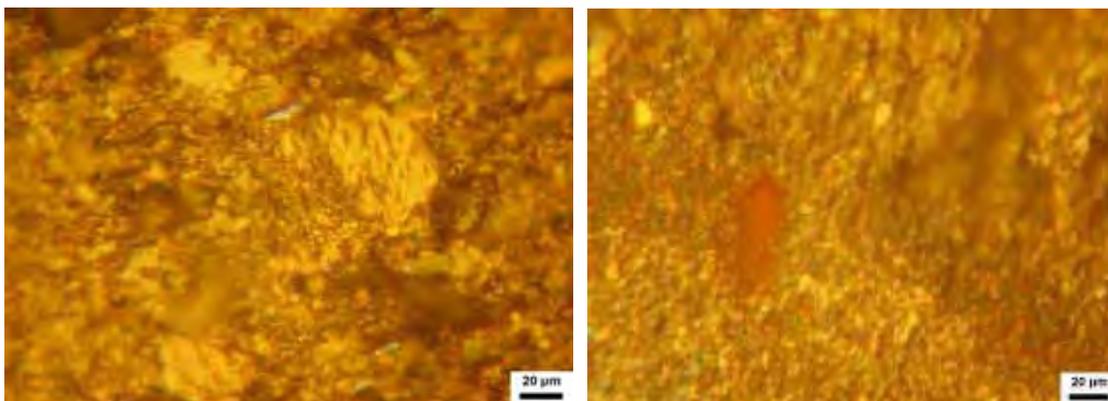


Figura 4.21 - Partículas de desgaste geradas na quarta semana do ensaio A. Fotos do anel interno do RPD.

Na Figura 4.22, tem-se fotos do anel médio do RPD visualizadas com luz transmitida e refletida. Na segunda foto, tem-se uma partícula laminar de bronze com mais de 100•m na dimensão principal.

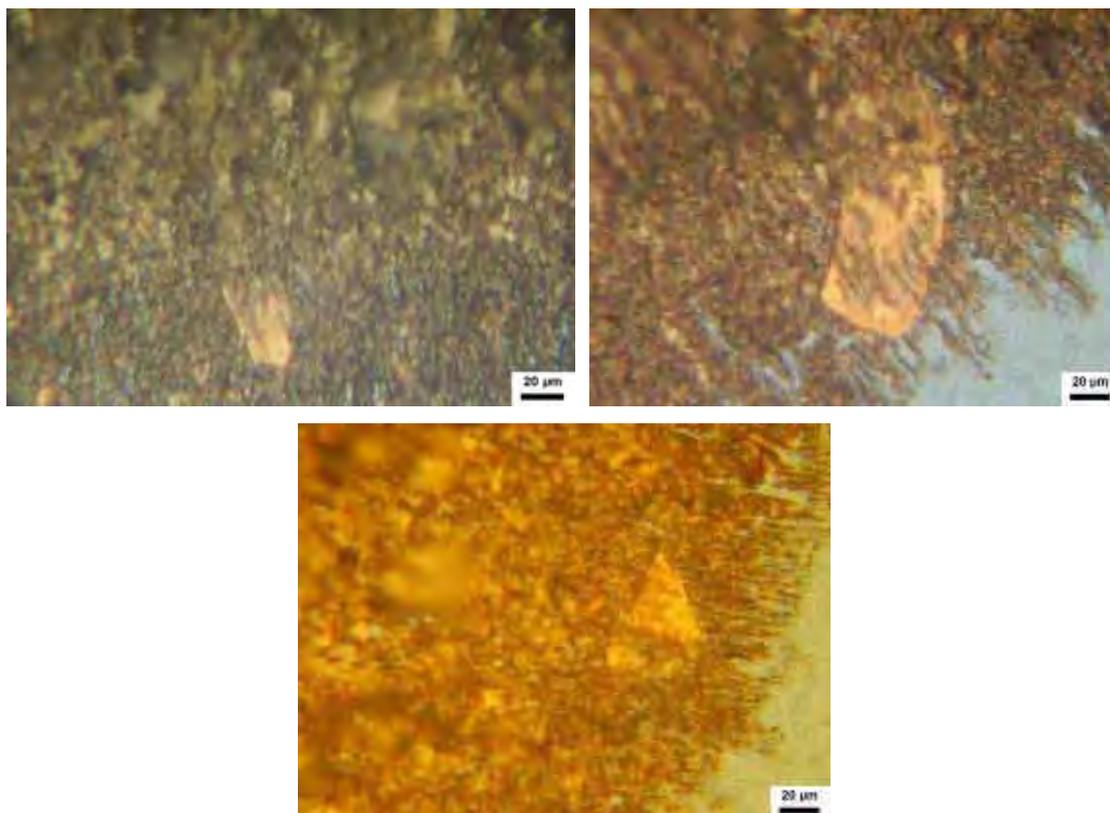


Figura 4.22 - Partículas de desgaste geradas na quarta semana do ensaio A. Fotos do anel médio do RPD.

Na Figura 4.23, tem-se fotos do mesmo campo de visão do anel médio do RPD. A primeira visualizada com luz refletida e a segunda visualizada com luz transmitida. Através da luz transmitida pode-se verificar que o corpo visualizado não era uma partícula e sim um aglomerado destas.

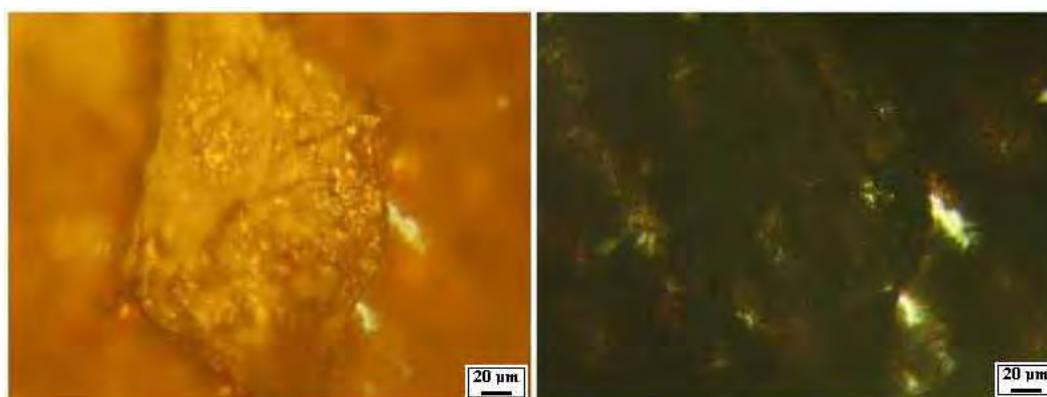


Figura 4.23 Partículas de desgaste geradas na quarta semana do ensaio A. Fotos do anel médio do RPD.

Na Figura 4.24, tem-se fotos do anel externo do RPD visualizadas com luz transmitida e refletida. Na terceira foto temos uma partícula de desgaste por atrito.

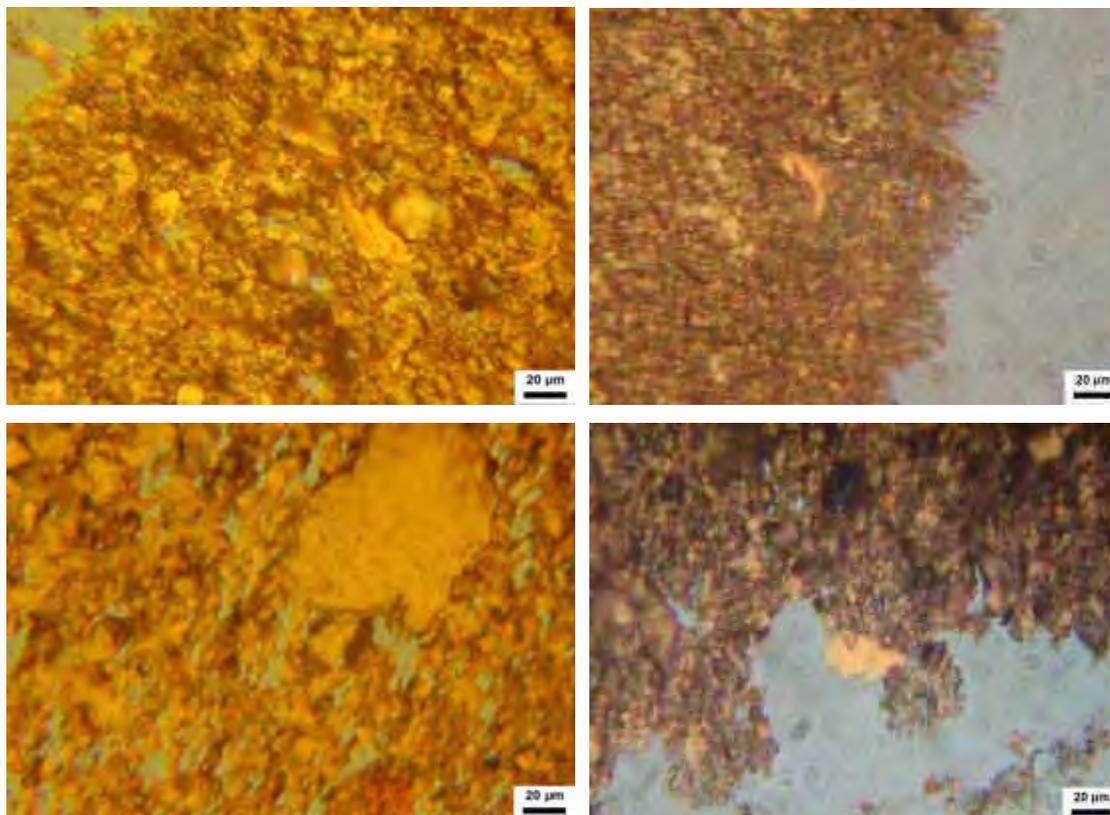


Figura 4.24 - Partículas de desgaste geradas na quarta semana do ensaio A. Fotos do anel externo do RPD.

Nas Tabelas 4.6, 4.7 e 4.8, têm-se alguns testes realizados no óleo ISO 320 depois das quatro semanas, podemos observar uma grande quantidade de Fe e Cu e um alto índice PQ devido ao desgaste provocado na coroa e no sem-fim com a aplicação da carga.

Na Figura 4.25, tem-se o desgaste na coroa e no sem-fim com o uso do óleo ISO 320 e a aplicação da carga.

Tabela 4.6 – Ensaios realizados no óleo ao término do ensaio A.

ODOR	APARÊNCIA	ÁGUA	T. A. N.	VISC. 40 °C	VISC. 100 °C
OLFATO	VISUAL	ASTM D 95	ASTM D 664	ASTM D 445	ASTM D 445
		%	mgKOH/g	cSt	cSt
CARACT.	BOM	0,00	1,17	295,50	42,03

Tabela 4.7 – Absorção Atômica realizada no óleo ao término do ensaio A.

Absorção Atômica						
Cu	Si	Al	Fe	Pb	Cr	Ni
ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm
580	18	4	142	0	0	7

Tabela 4.8- Índice PQ obtido no monitor de partículas.

Ensaio A			
1ª Amostra	2ª Amostra	3ª Amostra	4ª Amostra
670	1680	3050	4000



Figura 4.25 – Elementos internos do redutor de velocidades após o primeiro ensaio.

Ensaio B – Primeira Coleta

Nas Figuras 4.26, 4.27 e 4.28 estão apresentadas fotos após a primeira semana de ensaio com o óleo ISO 320 acrescido de água (ensaio B). Neste ensaio foram adicionados 5% em volume de água ao óleo a cada semana. Na Figura 4.26, tem-se uma foto do anel interno do RPD visualizada com luz transmitida onde podemos verificar a presença de óxidos.

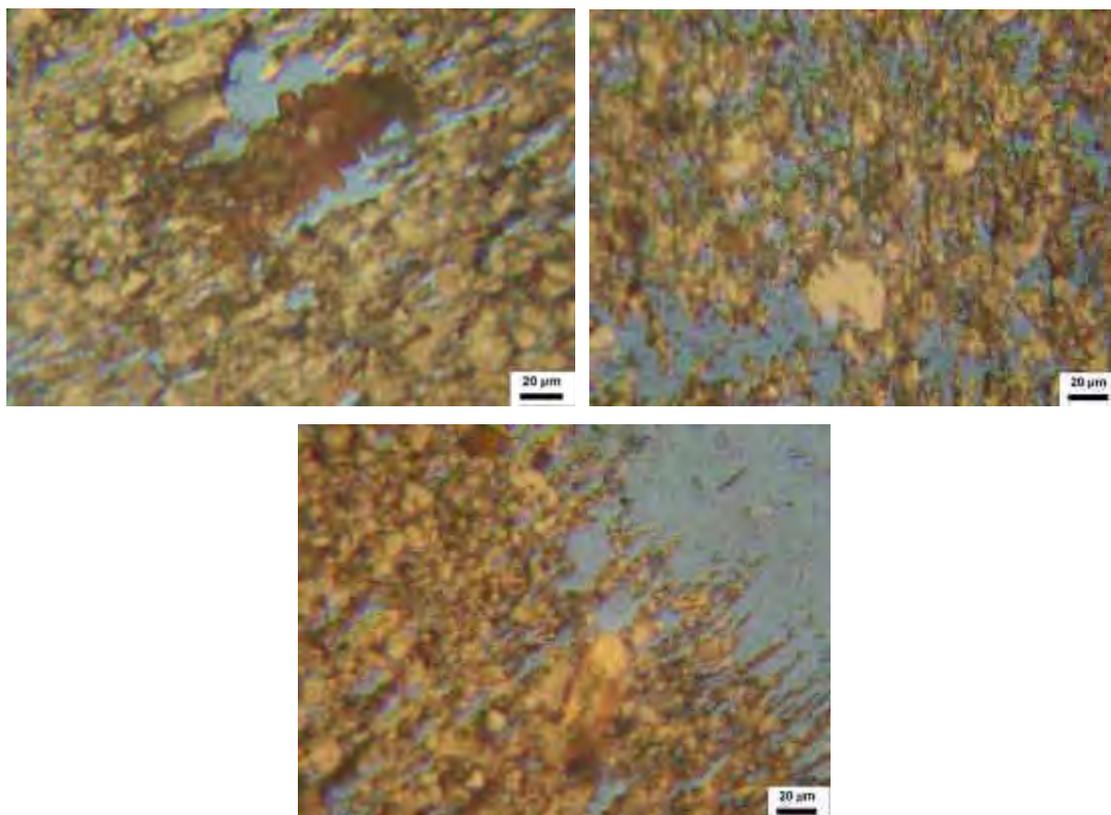


Figura 4.26 - Partículas de desgaste geradas na primeira semana do ensaio B. Fotos do anel interno do RPD.

Na Figura 4.27, tem-se fotos do anel médio do RPD visualizadas com luz transmitida e refletida. Neste experimento verificou-se a diminuição na quantidade de partículas.

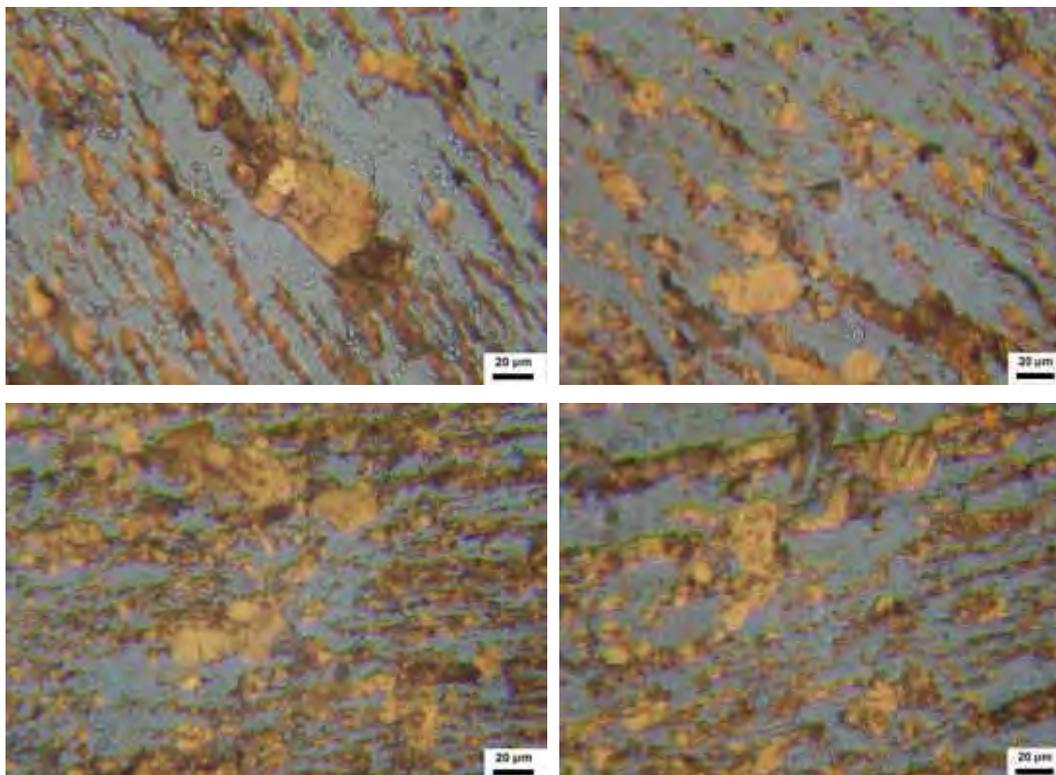


Figura 4.27 - Partículas de desgaste geradas na primeira semana do ensaio B. Fotos do anel médio do RPD.

Na Figura 4.28, tem-se fotos do anel externo do RPD visualizadas com luz transmitida e refletida. Na primeira foto, tem-se uma partícula de desgaste por atrito com cerca de $100 \mu\text{m}$ na dimensão principal.

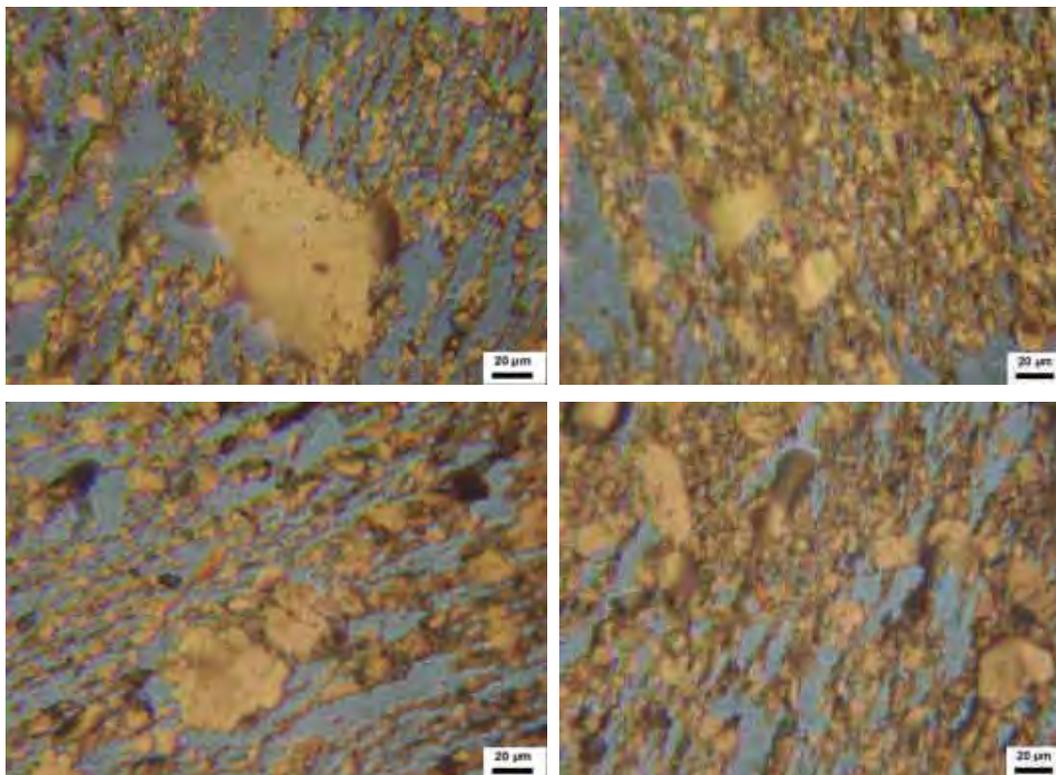


Figura 4.28 - Partículas de desgaste geradas na primeira semana do ensaio B. Fotos do anel externo do RPD.

Ensaio B – Segunda Coleta

Nas Figuras 4.29, 4.30, 4.31, 4.32 e 4.33 estão apresentadas fotos após a segunda semana de ensaio com o óleo ISO 320 acrescido de 10% água (ensaio B). Na Figura 4.29, tem-se uma foto do anel interno do RPD visualizada com luz transmitida onde podemos verificar a presença de óxidos e partículas de bronze.

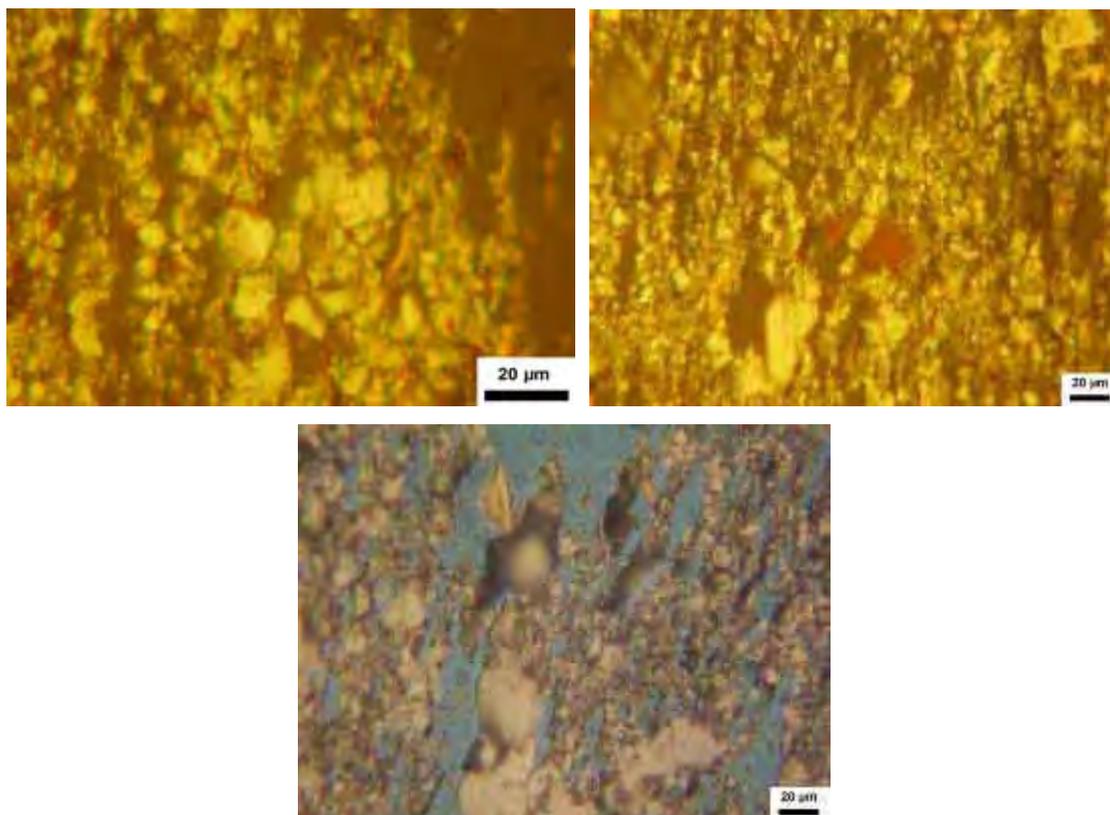


Figura 4.29 - Partículas de desgaste geradas na segunda semana do ensaio B. Fotos do anel interno do RPD.

Na Figura 4.30, tem-se fotos do anel interno do RPD, a primeira visualizada com luz refletida e a segunda com luz transmitida. Pode-se verificar que quando a quantidade de partículas não é muito grande o uso de luz transmitida nos dá muitas informações.

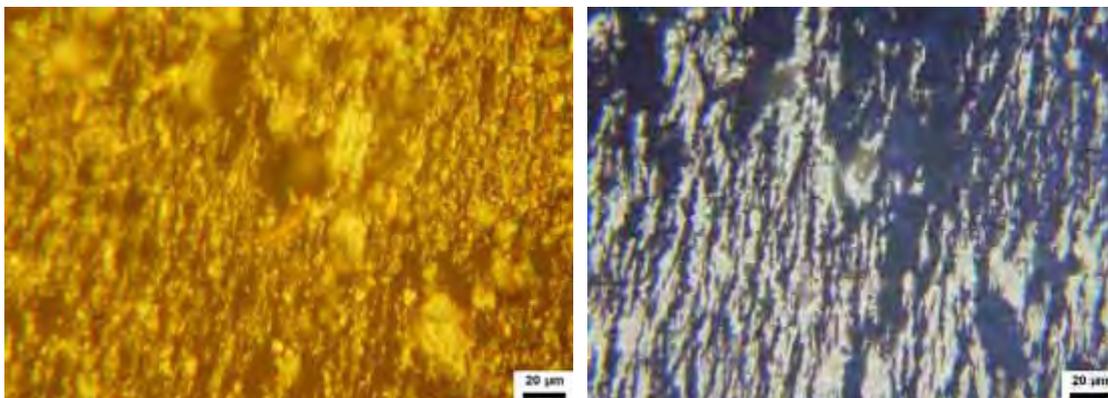


Figura 4.30 - Partículas de desgaste geradas na segunda semana do ensaio B. Fotos do anel interno do RPD.

Na Figura 4.31, tem-se fotos do anel interno do RPD visualizadas com luz transmitida e luz refletida. As três fotos são do mesmo campo de visão, porém com altura focal diferente. Nesta verifica-se a dificuldade da focalização de partículas grandes no microscópio ótico.



Figura 4.31 - Partículas de desgaste geradas na segunda semana do ensaio B. Fotos do anel interno do RPD.

Na Figura 4.32, tem-se fotos do anel médio do RPD visualizadas com luz transmitida e luz refletida. Nas fotos, têm-se partículas de desgaste por atrito, partículas de desgaste severo por deslizamento, óxidos e partículas de bronze.

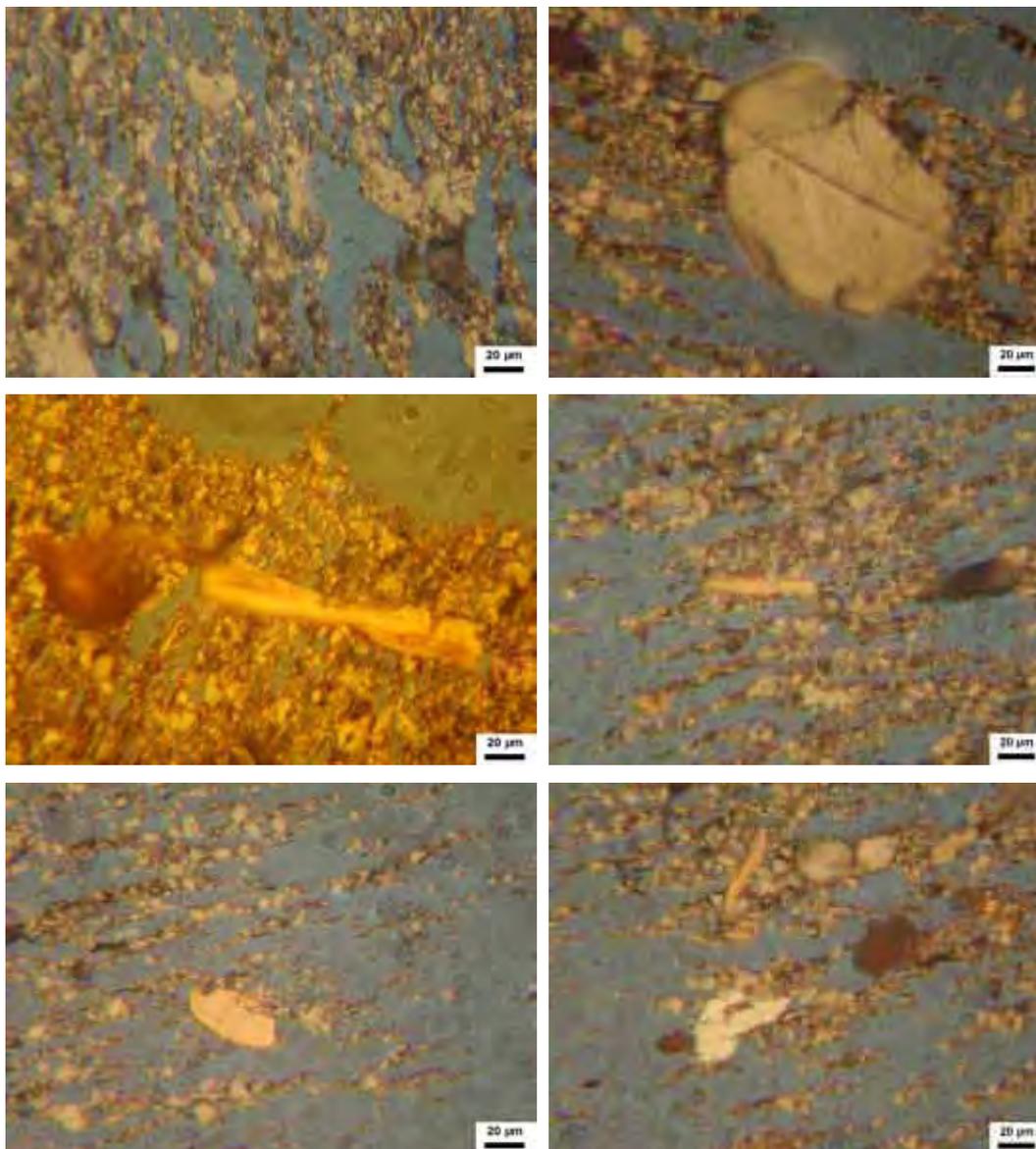


Figura 4.32 - Partículas de desgaste geradas na segunda semana do ensaio B. Fotos do anel médio do RPD.

Na Figura 4.33, tem-se fotos do anel externo do RPD visualizadas com luz transmitida e luz refletida.

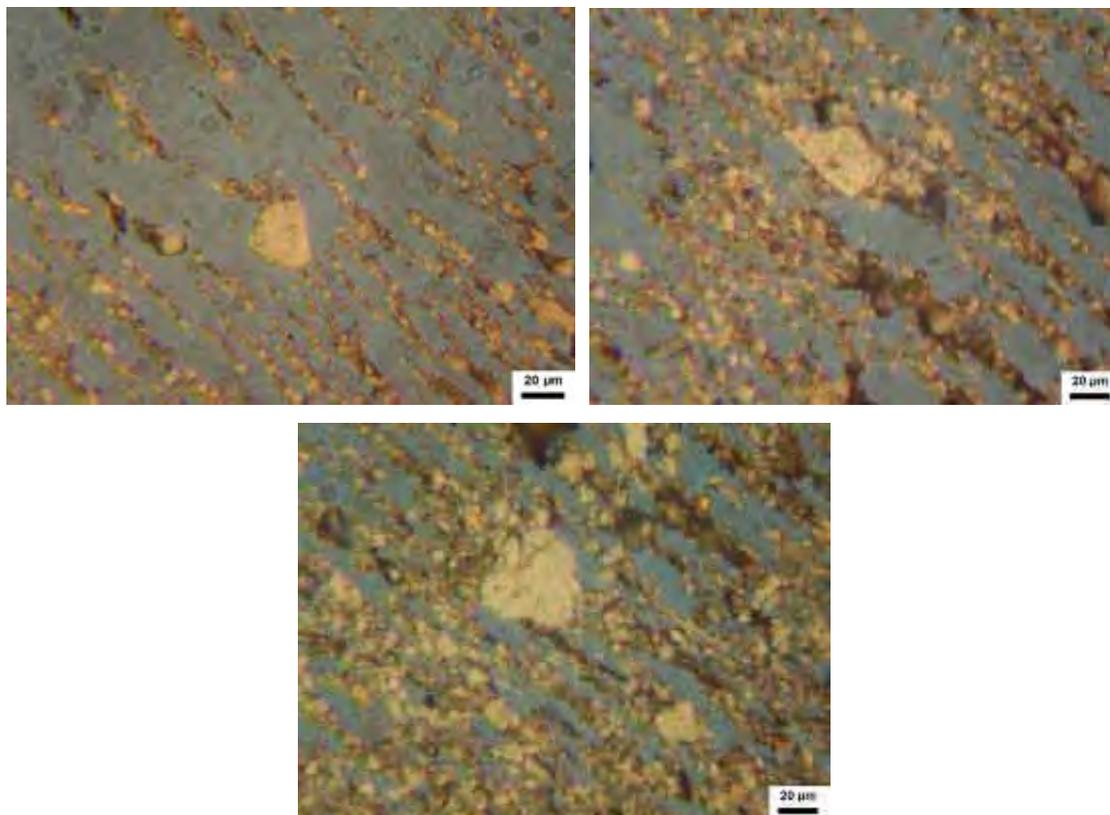


Figura 4.33 - Partículas de desgaste geradas na segunda semana do ensaio B. Fotos do anel externo do RPD.

Ensaio B – Terceira Coleta

Nas Figuras 4.34, 4.35 e 4.36 estão apresentadas fotos após a terceira semana de ensaio com o óleo ISO 320 acrescido de 15% água (ensaio B). Na Figura 4.34, tem-se fotos do anel interno do RPD visualizadas com luz transmitida e luz refletida, onde podemos verificar partículas de desgaste severo por deslizamento e desgaste por atrito.

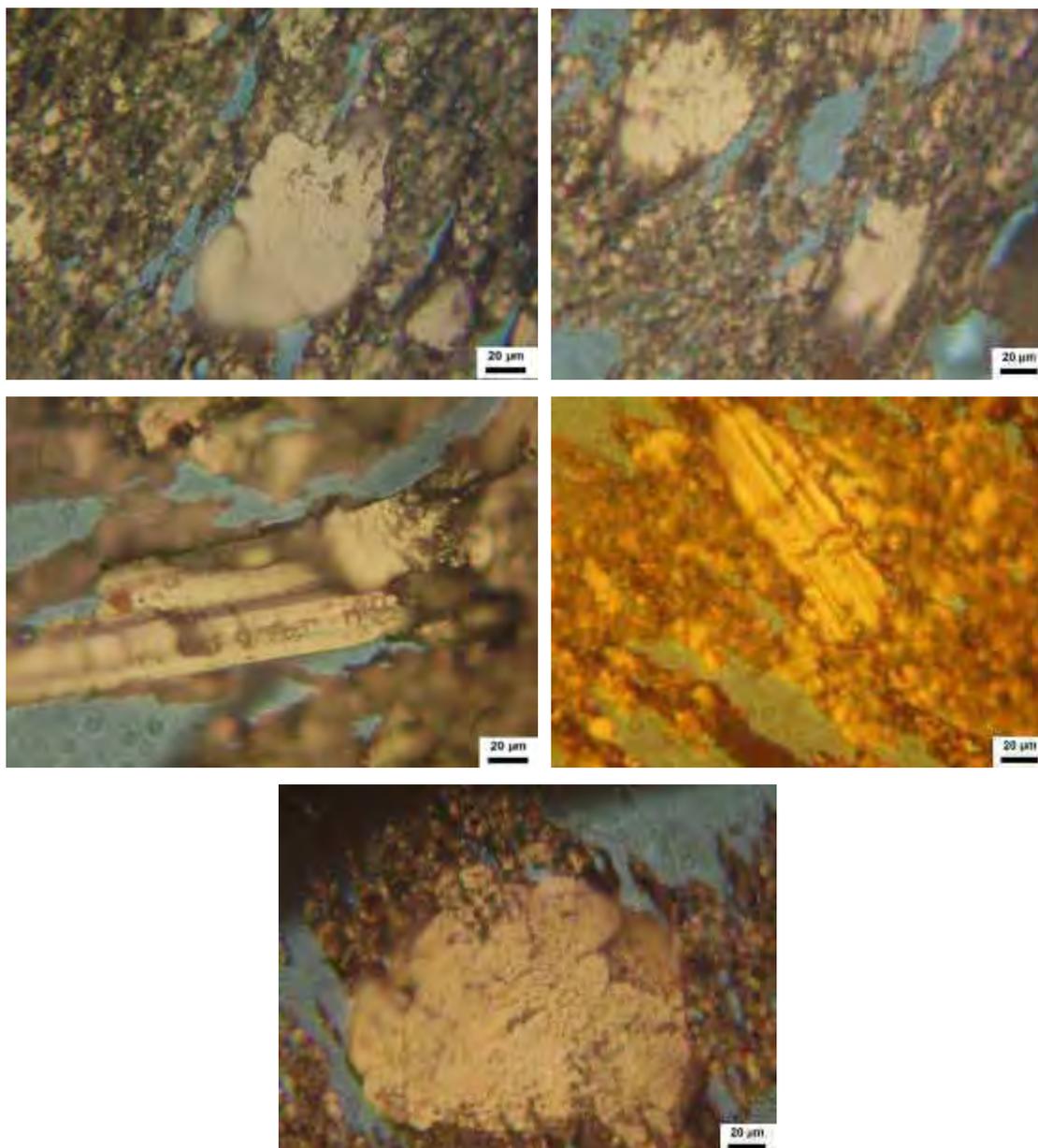


Figura 4.34 - Partículas de desgaste geradas na terceira semana do ensaio B. Fotos do anel interno do RPD.

Na Figura 4.35, tem-se fotos do anel médio do RPD visualizada com luz transmitida e luz refletida.

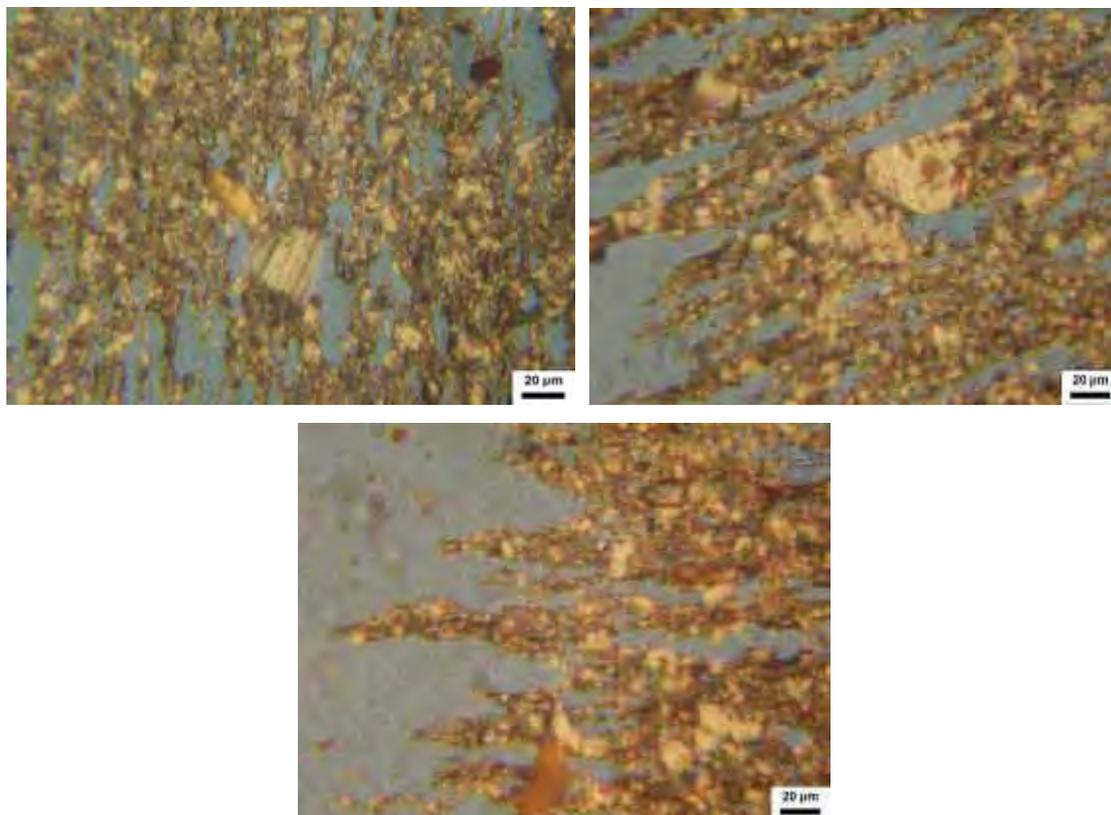


Figura 4.35 - Partículas de desgaste geradas na terceira semana do ensaio B. Fotos do anel médio do RPD.

Na Figura 4.36, tem-se fotos do anel externo do RPD visualizada com luz transmitida e refletida, onde podemos verificar partículas de desgaste severo por deslizamento e desgaste por atrito.

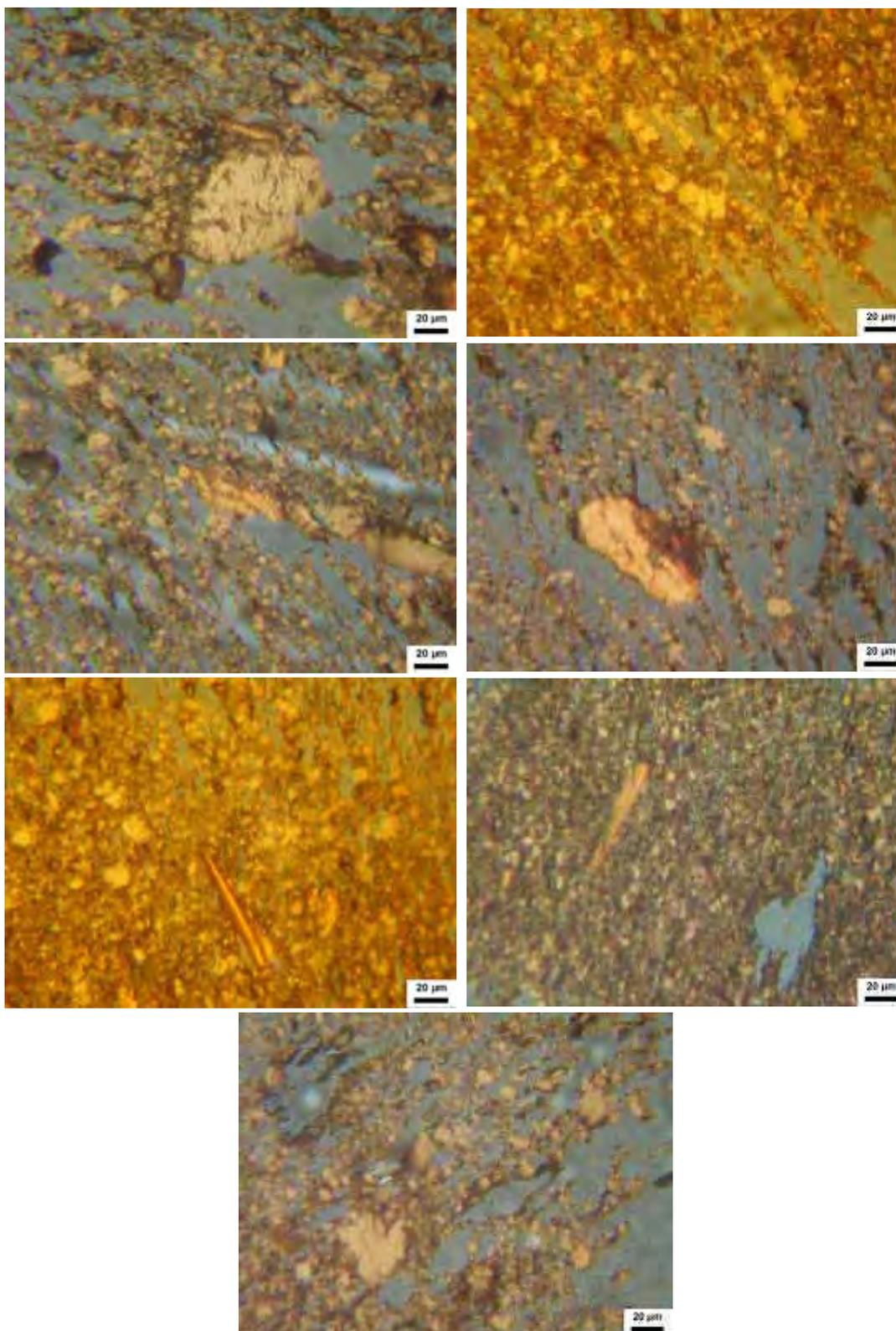


Figura 4.36 - Partículas de desgaste geradas na terceira semana do ensaio B. Fotos do anel externo do RPD.

Ensaio B – Quarta Coleta

Nas Figuras 4.37, 4.38 e 4.39 estão apresentadas fotos após a quarta semana de ensaio com o óleo ISO 320 acrescido de 20% água (ensaio B). Na Figura 4.37, tem-se fotos do anel interno do RPD visualizadas com luz transmitida e luz refletida, onde podemos verificar partículas de desgaste severo por deslizamento, desgaste por atrito e óxidos.

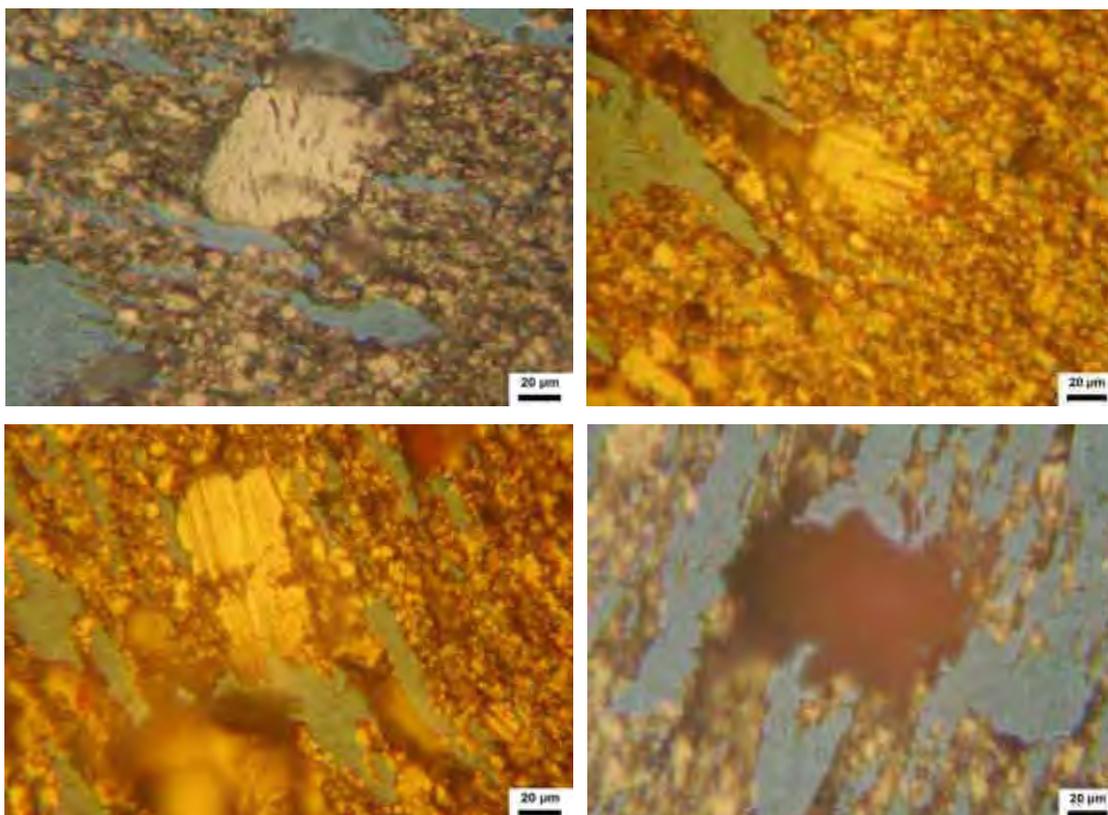


Figura 4.37 - Partículas de desgaste geradas na quarta semana do ensaio B. Fotos do anel interno do RPD.

Nas Figuras 4.38 e 4.39, tem-se fotos do anel médio e externo do RPD respectivamente, visualizadas com luz transmitida e luz refletida.

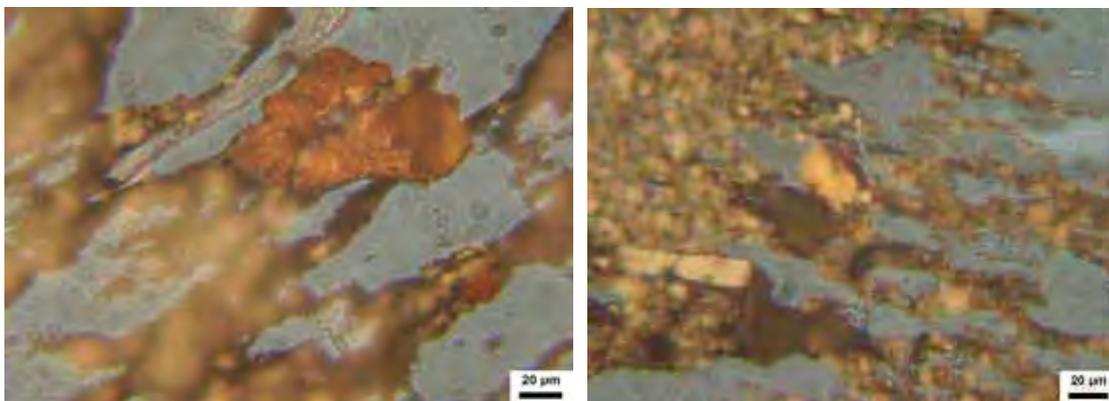


Figura 4.38 - Partículas de desgaste geradas na quarta semana do ensaio B. Fotos do anel médio do RPD.

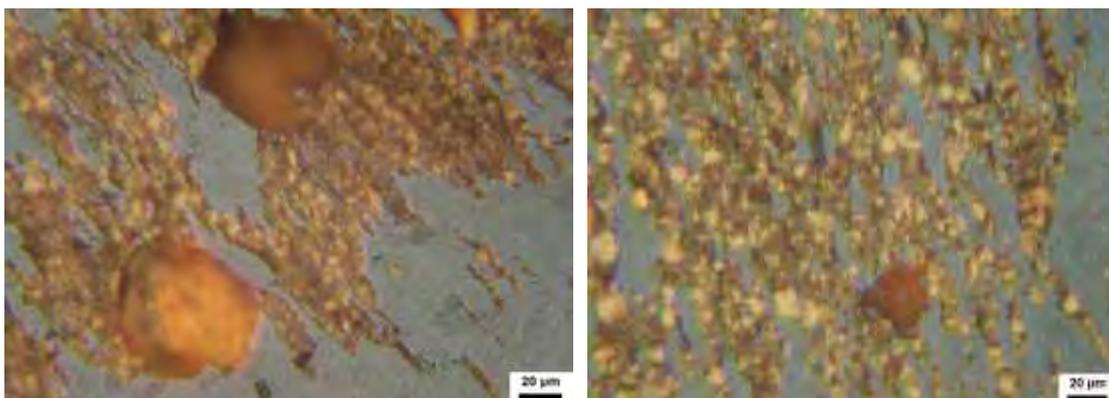


Figura 4.39 - Partículas de desgaste geradas na quarta semana do ensaio B. Fotos do anel externo do RPD.

Nas Tabelas 4.9, 4.10 e 4.11, têm-se alguns testes realizados no óleo ISO 320 depois das quatro semanas, podemos observar que a quantidade de Fe e Cu diminuíram em relação ao ensaio A, assim como o índice PQ. Observou-se também a presença já esperada da água nos resultados.

Tabela 4.9 – Ensaio realizado no óleo ao término do ensaio B.

ODOR	APARÊNCIA	ÁGUA	T. A. N.	VISC. 40 °C
OLFATO	VISUAL	ASTM D 95	ASTM D 664	ASTM D 445
		%	mgKOH/g	cSt
RUIM	TURVO	13,50	1,64	395,12

Tabela 4.10 – Absorção Atômica realizada no óleo ao término do ensaio B.

Absorção Atômica						
Cu ppm	Si ppm	Al ppm	Fe ppm	Pb ppm	Cr ppm	Ni ppm
333	16	3	125	0	0	2

Tabela 4.11- Índice PQ obtido no monitor de partículas.

Ensaio B			
1ª Amostra	2ª Amostra	3ª Amostra	4ª Amostra
250	360	510	540

Na Figura 4.40, tem-se o desgaste na coroa e no sem-fim com o uso do óleo ISO 320 acrescido de água e a aplicação da carga. Na Figura 4.41, tem-se a oxidação da parte interna da carcaça do redutor e das pontas dos parafusos que estavam em contato com o óleo.



Figura 4.40 – Elementos internos do redutor de velocidades após o segundo ensaio.



Figura 4.41 – Oxidação dos parafusos e da caixa do redutor.

Ensaio C – Primeira Coleta

Nas Figuras 4.42, 4.43 e 4.44, têm-se fotos após a primeira semana de ensaio com o óleo ISO 320 acrescido de areia (ensaio C). Neste ensaio foram adicionados 0.4gramas a cada semana. A grande quantidade de partículas não permitiu a separação destas em anéis no RPD. Na Figura 4.42, tem-se fotos tirada por baixo da lâmina de vidro, nas duas fotos foram usadas luz refletida e luz transmitida, porem, na segunda a intensidade da luz refletida é pequena.

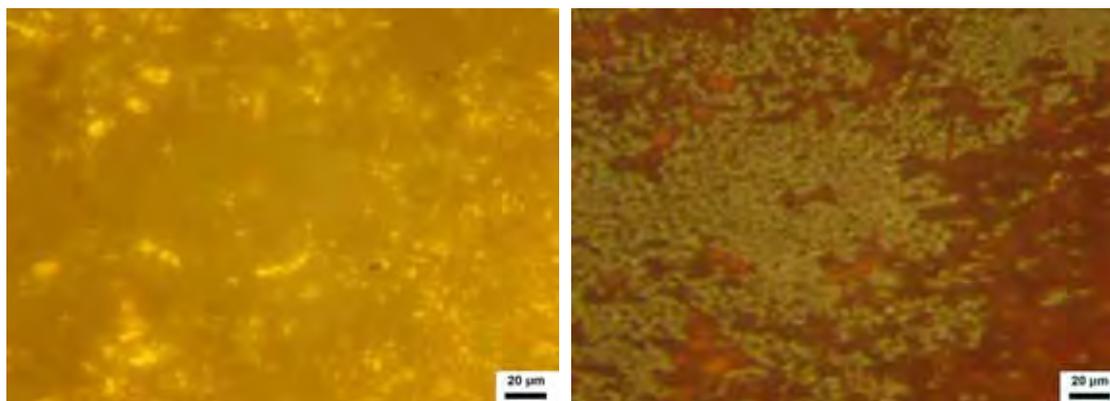


Figura 4.42 – Partículas de desgaste geradas na primeira semana do ensaio C

Na Figura 4.43, tem-se fotos tirada por baixo da lâmina de vidro, observa-se a presença de partículas de desgaste abrasivo. Foram usadas luz refletida e luz transmitida.

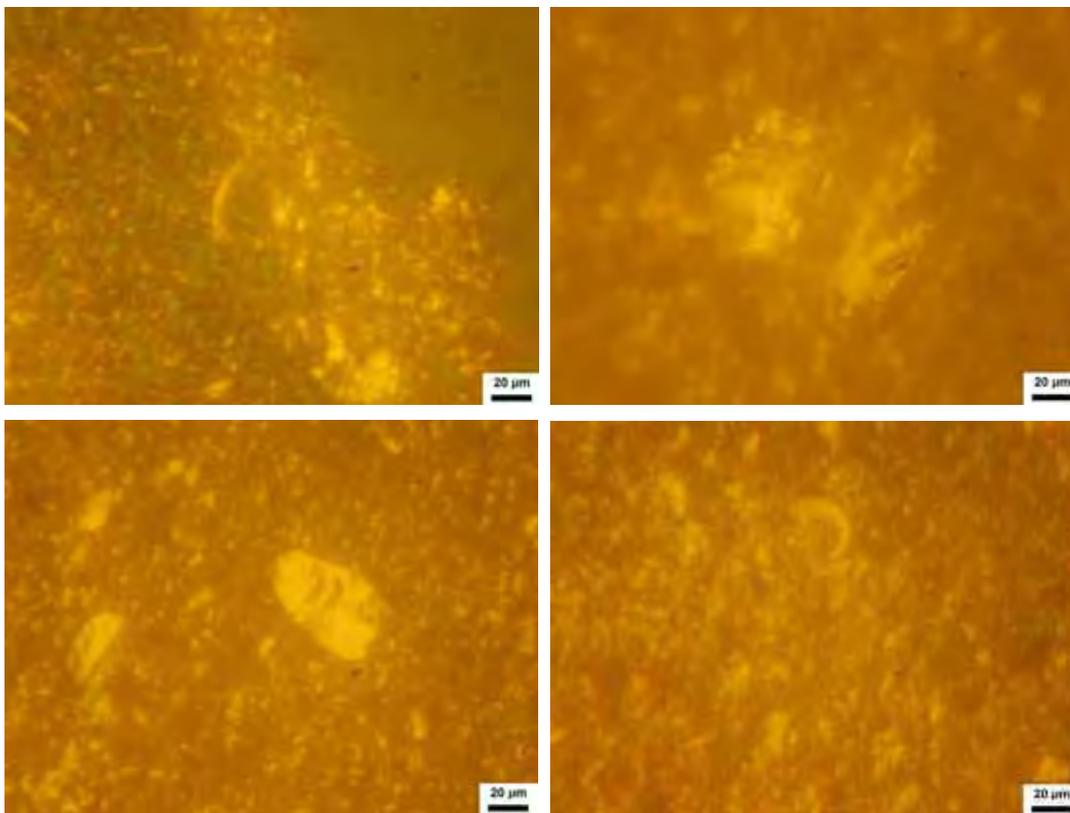


Figura 4.43 - Partículas de desgaste geradas na primeira semana do ensaio C.

Na Figura 4.44, tem-se fotos tiradas por cima da lâmina de vidro (lado correto de visualização), observa-se a presença de partículas de desgaste abrasivo. Na primeira e na última foto observa-se a grande quantidade de partículas.

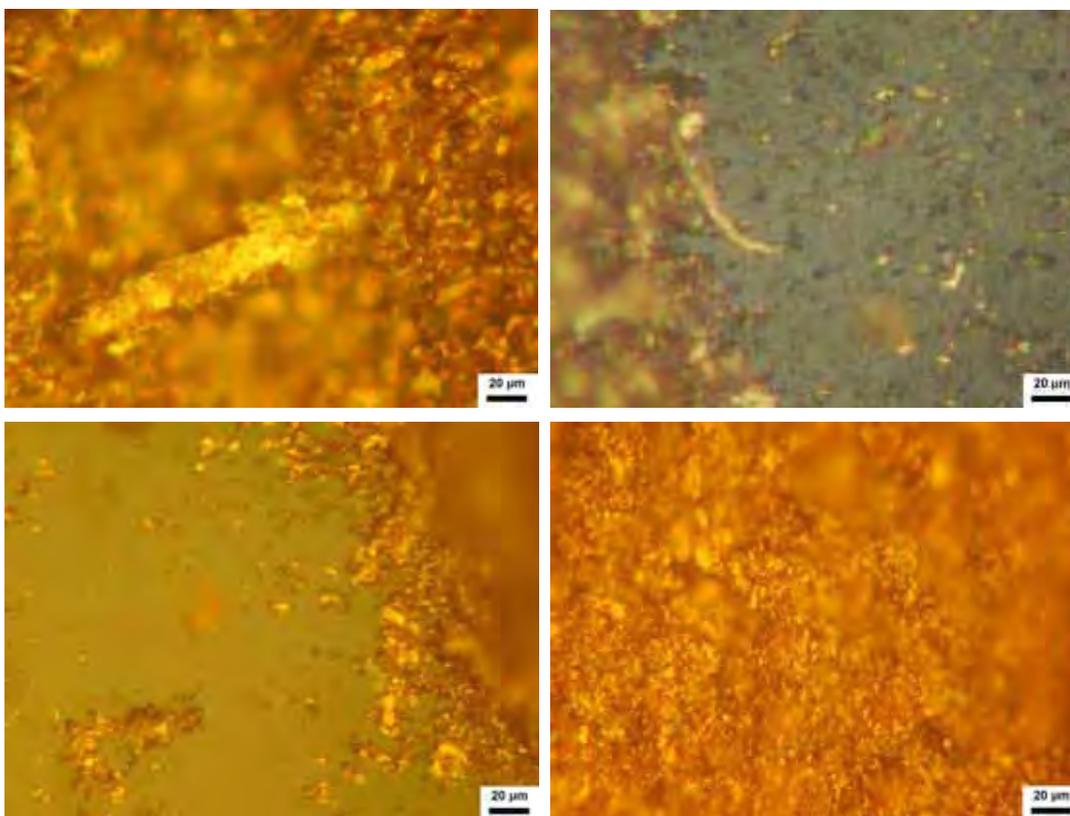


Figura 4.44 - Partículas de desgaste geradas na primeira semana do ensaio C.

Ensaio C – Segunda Coleta

Nas Figuras 4.45 e 4.46, têm-se fotos após a segunda semana de ensaio com o óleo ISO 320 acrescido de 0.8 gramas de areia (ensaio C). A grande quantidade de partículas não permitiu a separação destas em anéis no RPD. Na Figura 4.45, tem-se fotos tiradas por baixo da lâmina de vidro.

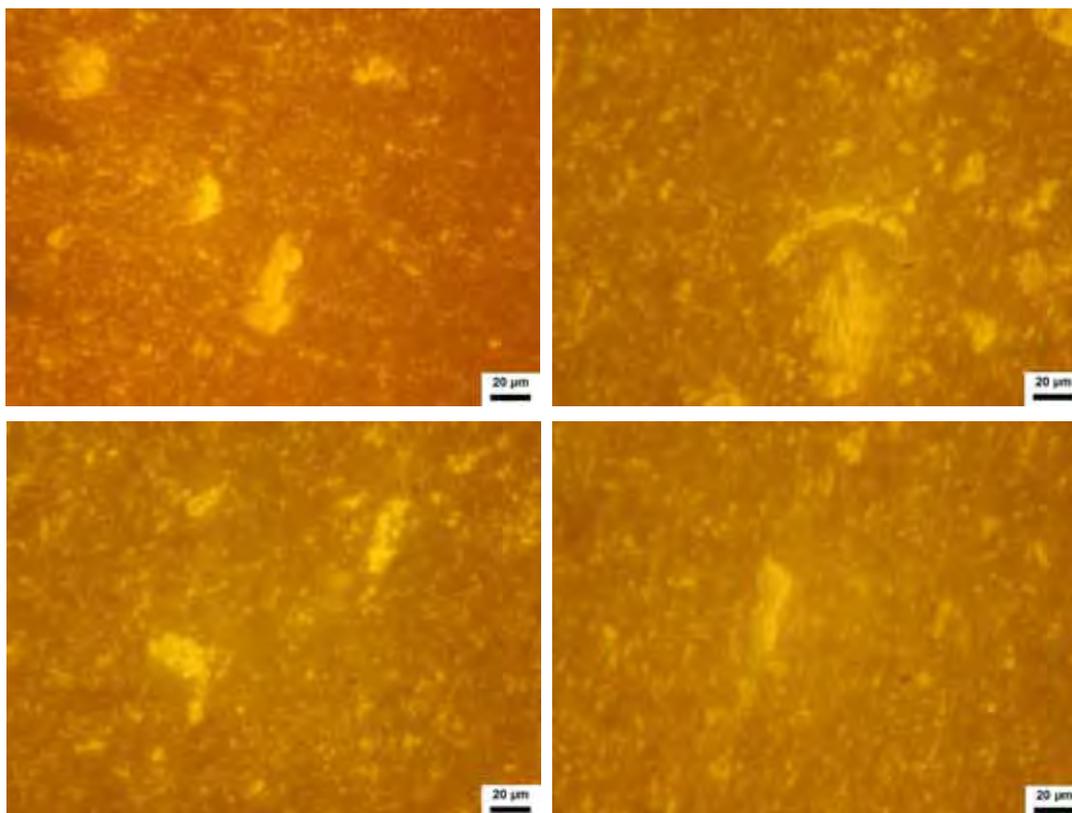


Figura 4.45 - Partículas de desgaste geradas na segunda semana do ensaio C.

Na Figura 4.46, tem-se fotos tirada por cima da lâmina de vidro (lado correto de visualização), observa-se a presença de partículas de desgaste abrasivo e a dificuldade em se focalizar as partículas quando as lâminas do RPD estão saturadas.

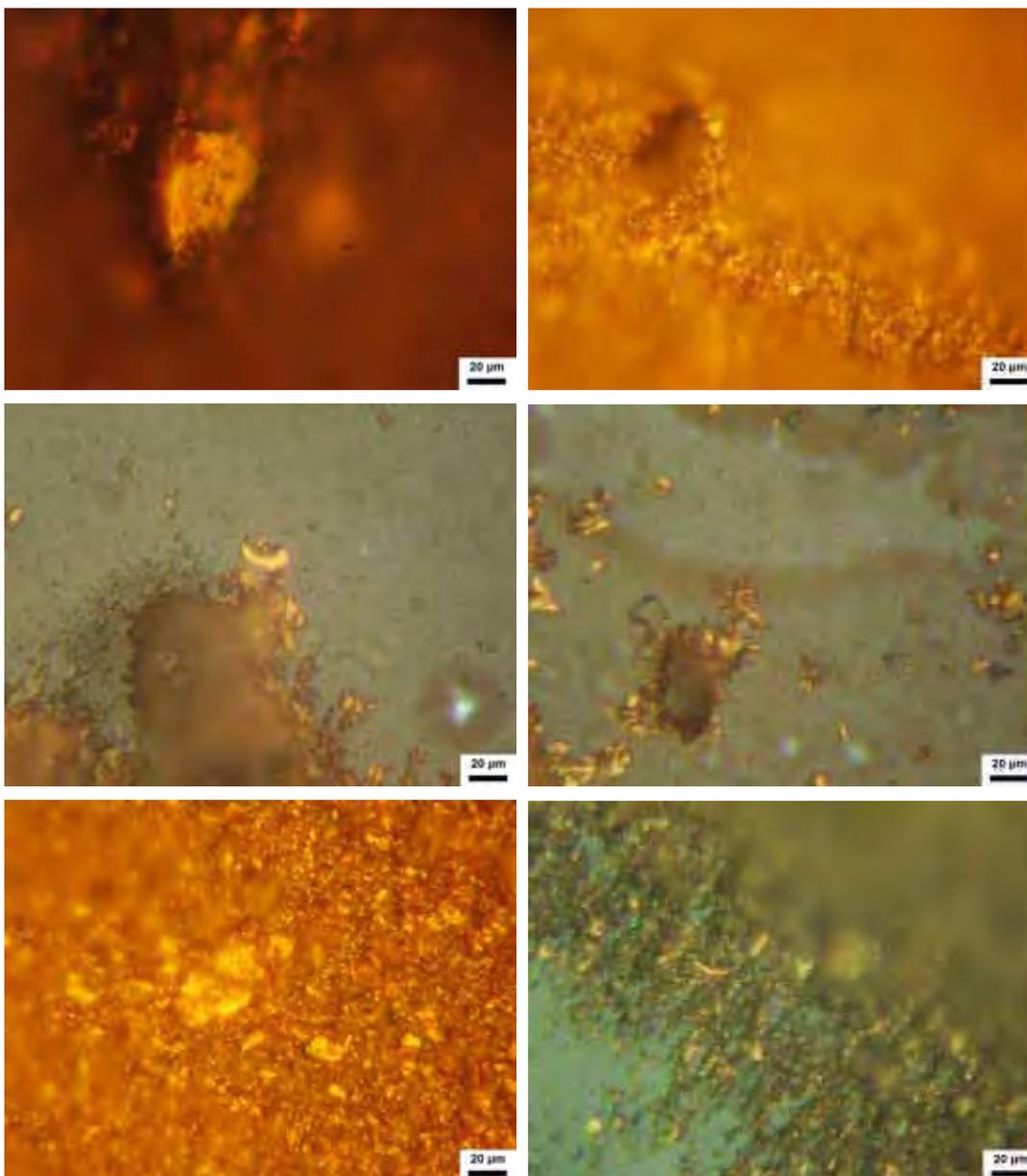


Figura 4.46 - Partículas de desgaste geradas na segunda semana do ensaio C.

Nas Tabelas 4.12, 4.13 e 4.14, têm-se alguns testes realizados no óleo ISO 320 ao final dos ensaios, pode-se observar a grande quantidade de partículas tanto pela absorção atômica quanto pelo índice PQ. Também observa-se a mudança da viscosidade e aparência do óleo.

Ao final do ensaio C os seguintes ensaios foram realizados:

Tabela 4.12 – Ensaio realizados no óleo ao término do ensaio C.

ODOR	APARÊNCIA	ÁGUA	T. A. N.	VISC. 40 °C	VISC. 100 °C
OLFATO	VISUAL	ASTM D 95	ASTM D 664	ASTM D 445	ASTM D 445
		%	mgKOH/g	cSt	cSt
CARACT.	ESCURO	0,00	1,79	348,76	57,22

Tabela 4.13 – Absorção Atômica realizada no óleo ao término do ensaio C.

Absorção Atômica						
Cu	Si	Al	Fe	Pb	Cr	Ni
ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm
1010	1171	17	1186	79	22	345

Tabela 4.14- Índice PQ obtido no monitor de partículas.

3º Ensaio	
1ª Amostra	2ª Amostra
19500	19600

Na Figura 4.47, tem-se o desgaste na coroa e no sem fim ao fim do ensaio C. Observa-se o estado avançado de deterioração destes.



Figura 4.47 – Elementos internos do redutor de velocidades após o terceiro ensaio.

Na Figura 4.48, tem-se o aspecto visual do óleo após o final de cada ensaio. No ensaio A um aspecto característico, no ensaio B verifica-se emulsão aquosa e no ensaio C um óleo com aparência escura devido a grande quantidade de partículas.



Figura 4.48 – Aspecto visual dos óleos dos três ensaios.

Na Figura 4.49, tem-se uma foto do rolamento do redutor desmontado, não observou-se defeitos pontuais.



Figura 4.49 – Rolamento do redutor desmontado para verificar possível falha.

4.2.2 - Análise de Vibração

Ensaio A – primeira semana

Nas Figuras 4.50, 4.51, 4.52 e 4.53, têm-se os espectros de vibração para os pontos 2, 3, 5 e 7 respectivamente na primeira semana do Ensaio A. Para cada ponto utilizou-se frequências amostrais de 500, 1000, 5000 e 10000 Hz com os filtros analógicos de 141, 281, 2250 e 4500 Hz respectivamente.

Ponto 2

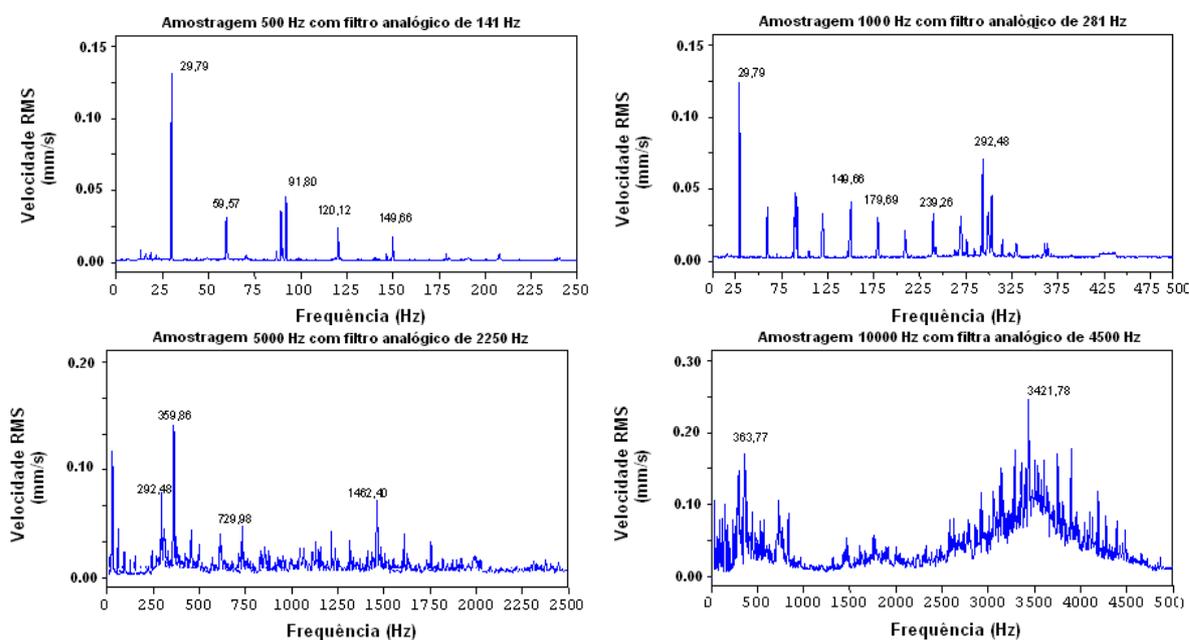


Figura 4.50 – Espectros de vibração obtidos no ponto 2 na primeira semana do Ensaio A.

Ponto 3

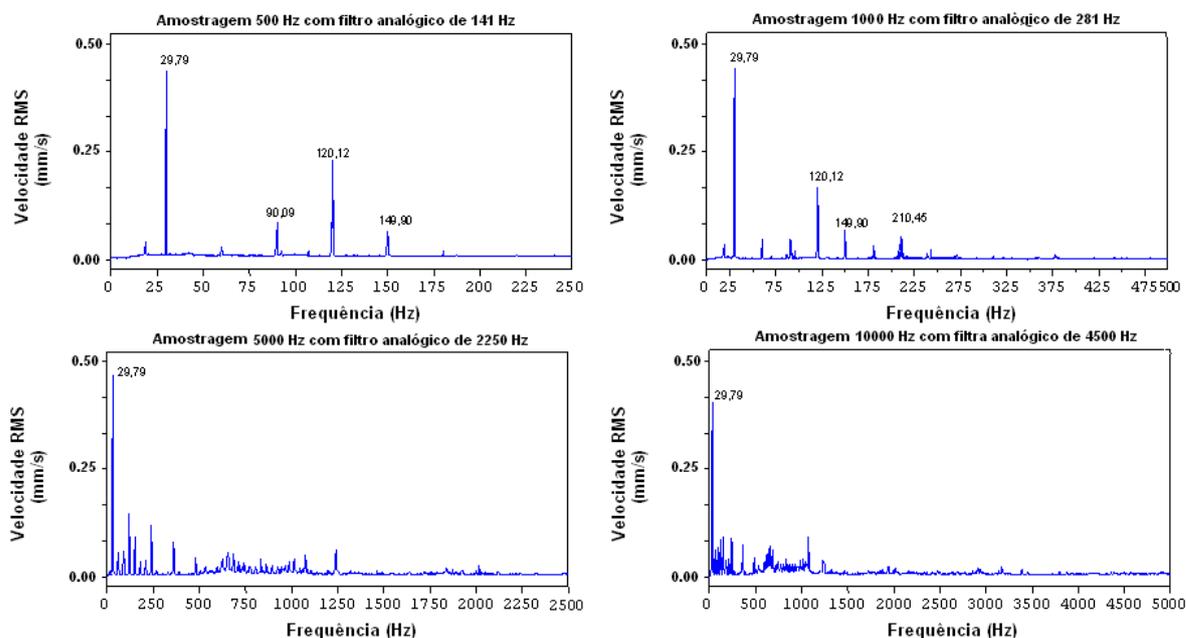


Figura 4.51 – Espectros de vibração obtidos no ponto 3 na primeira semana do Ensaio A

Ponto 5

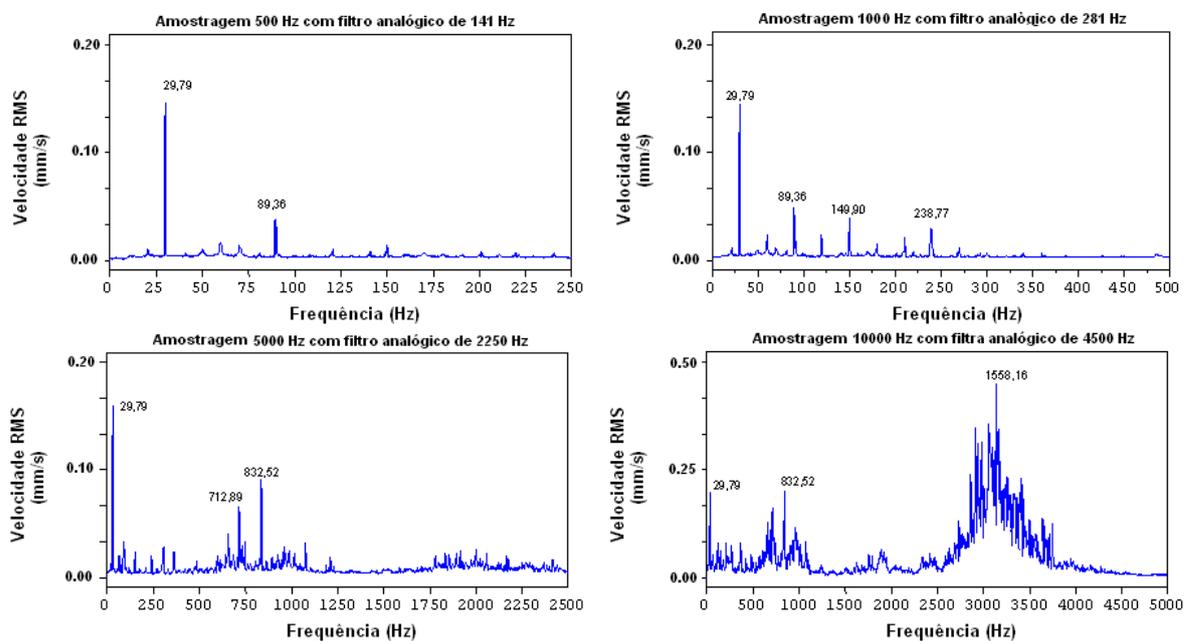


Figura 4.52 – Espectros de vibração obtidos no ponto 5 na primeira semana do Ensaio A

Ponto 7

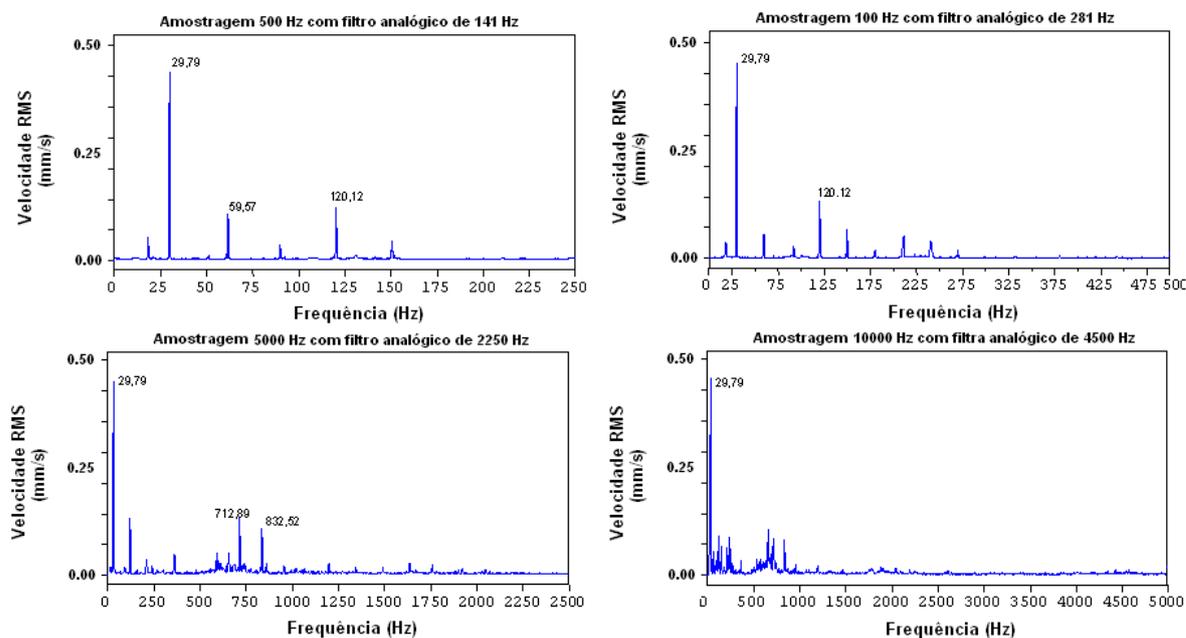


Figura 4.53 – Espectros de vibração obtidos no ponto 7 na primeira semana do Ensaio A

Na Tabela 4.15, tem-se o valor eficaz das velocidades de vibração (mm/s) e os valores da severidade de vibração pela norma NBR 10082, (10 a 1000Hz) para a primeira semana do Ensaio A.

Tabela 4.15 - Valor eficaz das velocidades de vibração e valores da severidade de vibração para a primeira semana do Ensaio A.

	Valor eficaz de vibração (mm/s)			Severidade de Vibração NBR 10082
	500Hz	5000Hz	10KHz	
Ponto 2	0,21	0,69	0,96	0,62
Ponto 3	0,35	0,44	0,52	0,47
Ponto 5	0,33	0,41	1,06	0,39
Ponto 7	0,51	0,62	0,63	0,59

Ensaio A – segunda semana

Nas Figuras 4.54, 4.55, 4.56 e 4.57, têm-se os espectros de vibração para os pontos 2, 3, 5 e 7 respectivamente na segunda semana do Ensaio A. Para cada ponto utilizou-se frequências amostrais de 500, 1000, 5000 e 10000 Hz com os filtros analógicos de 141, 281, 2250 e 4500 Hz respectivamente.

Ponto 2

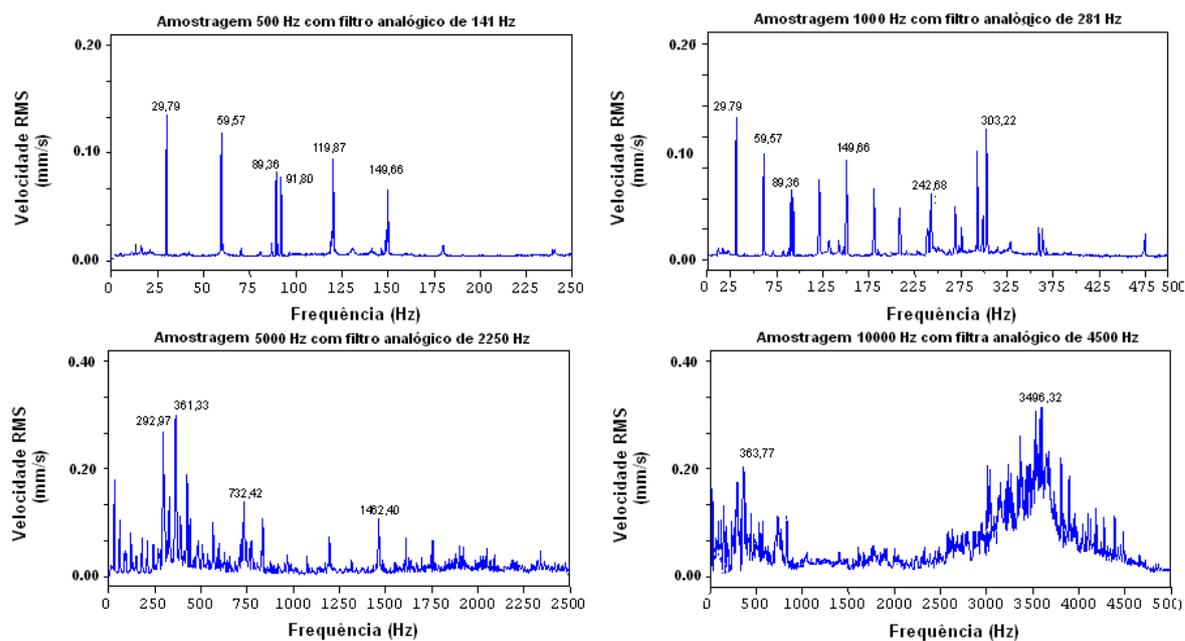


Figura 4.54 – Espectros de vibração obtidos no ponto 2 na segunda semana do Ensaio A

Ponto 3

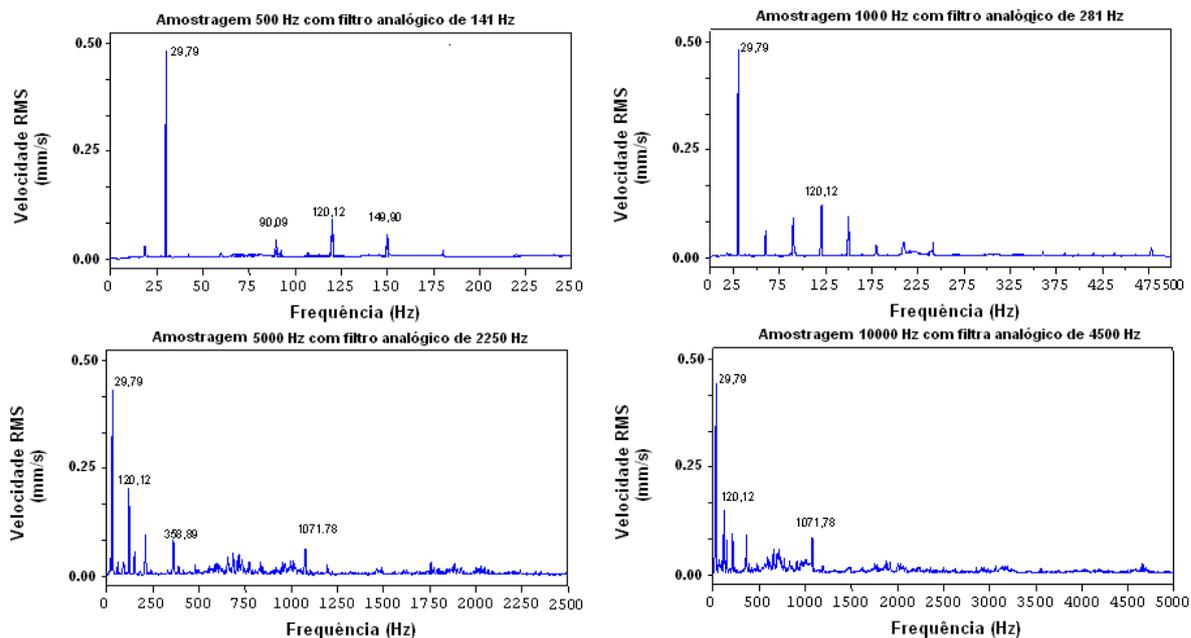


Figura 4.55 – Espectros de vibração obtidos no ponto 3 na segunda semana do Ensaio A

Ponto 5

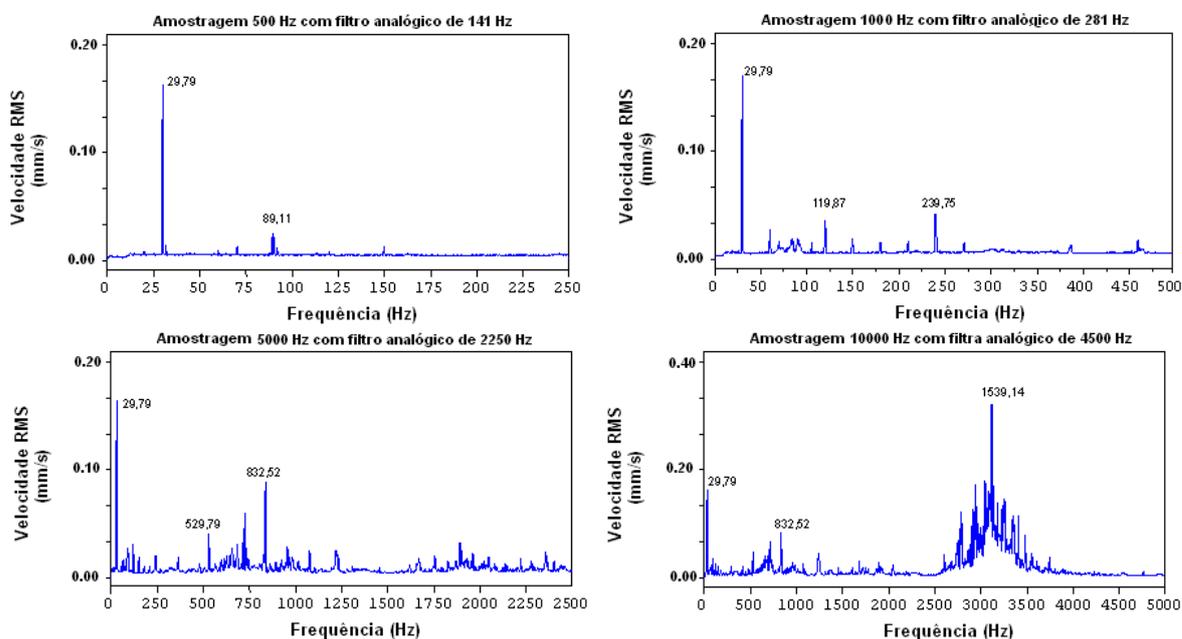


Figura 4.56 – Espectros de vibração obtidos no ponto 5 na segunda semana do Ensaio A

Ponto 7

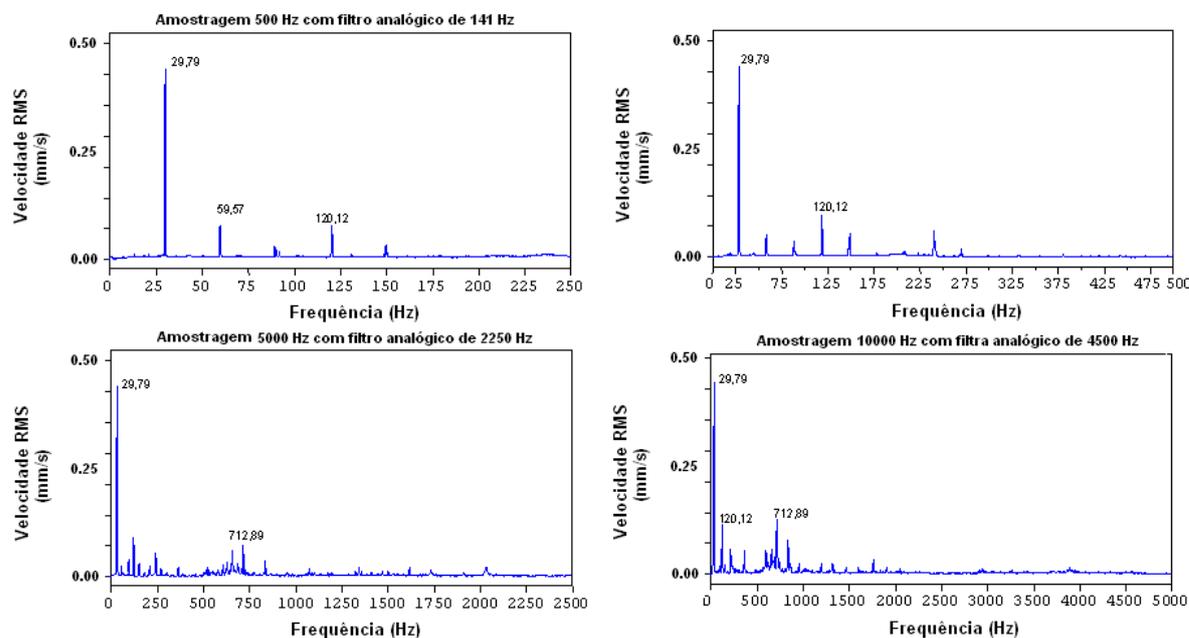


Figura 4.57 – Espectros de vibração obtidos no ponto 7 na segunda semana do Ensaio A

Na Tabela 4.16, tem-se o valor eficaz das velocidades de vibração (mm/s) e os valores da severidade de vibração pela norma NBR 10082, (10 a 1000Hz) para a segunda semana do Ensaio A.

Tabela 4.16 - Valor eficaz das velocidades de vibração e valores da severidade de vibração para a segunda semana do Ensaio A.

	Valor eficaz de vibração (mm/s)			Severidade de Vibração
	500Hz	5000Hz	10KHz	NBR 10082
Ponto 2	0,24	0,68	0,98	0,61
Ponto 3	0,32	0,40	0,53	0,50
Ponto 5	0,35	0,44	1,05	0,37
Ponto 7	0,51	0,63	0,62	0,58

Ensaio A – terceira semana

Nas Figuras 4.58, 4.59, 4.60 e 4.61, têm-se os espectros de vibração para os pontos 2, 3, 5 e 7 respectivamente na terceira semana do Ensaio A. Para cada ponto utilizou-se frequências amostrais de 500, 1000, 5000 e 10000 Hz com os filtros analógicos de 141, 281, 2250 e 4500 Hz respectivamente.

Ponto 2

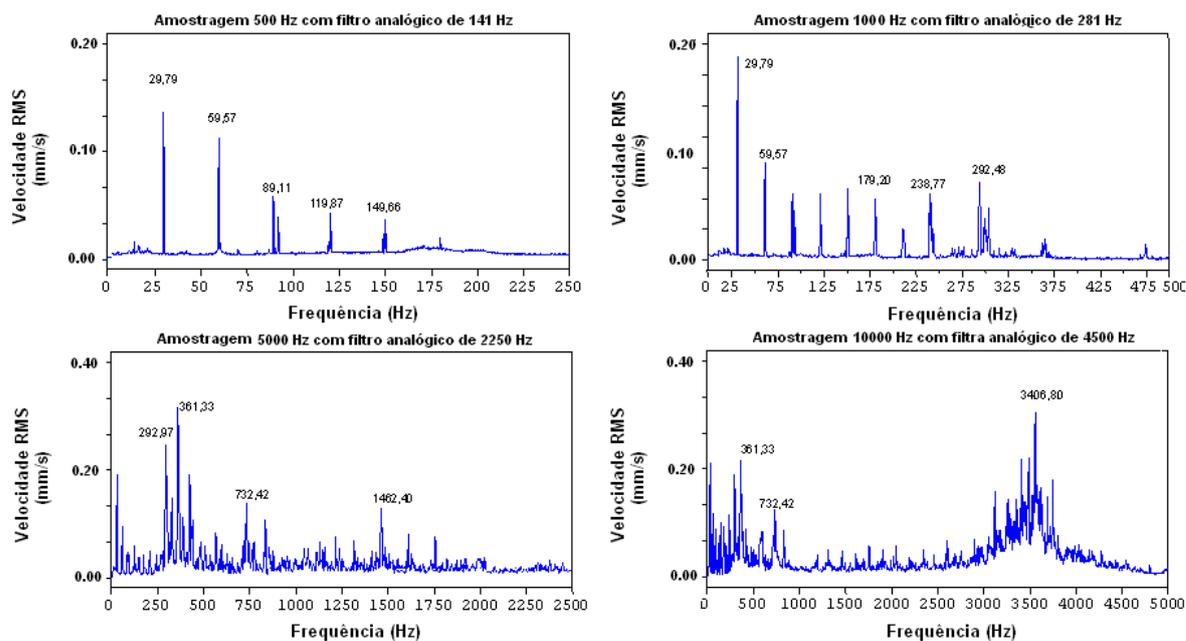


Figura 4.58 – Espectros de vibração obtidos no ponto 2 na terceira semana do Ensaio A.

Ponto 3

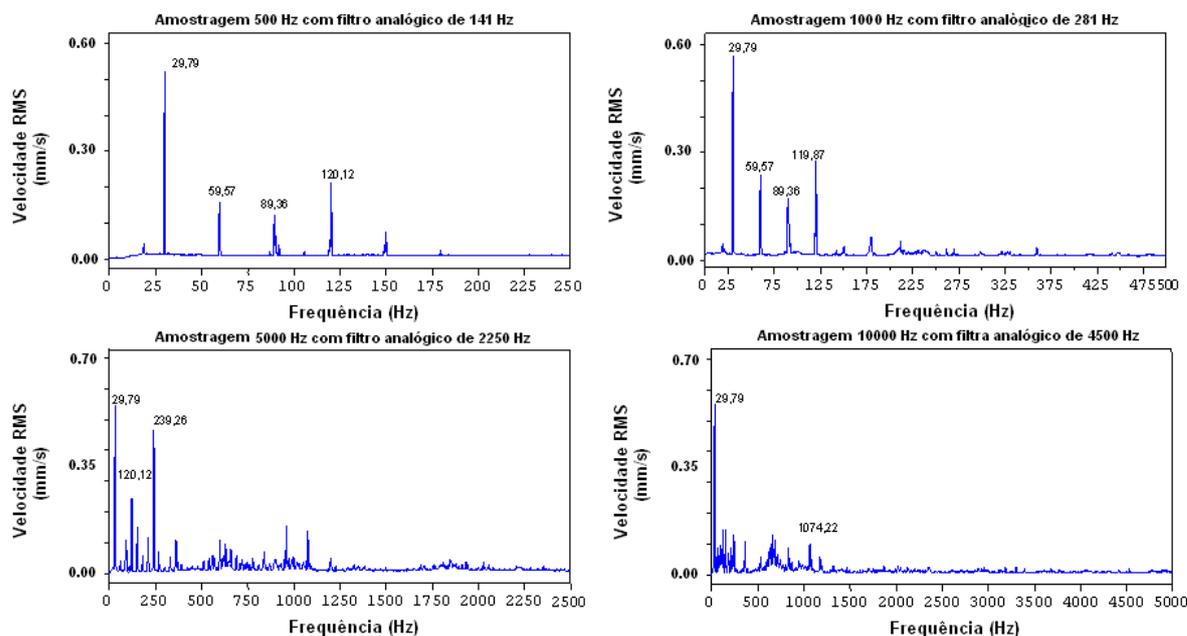


Figura 4.59 – Espectros de vibração obtidos no ponto 3 na terceira semana do Ensaio A.

Ponto 5

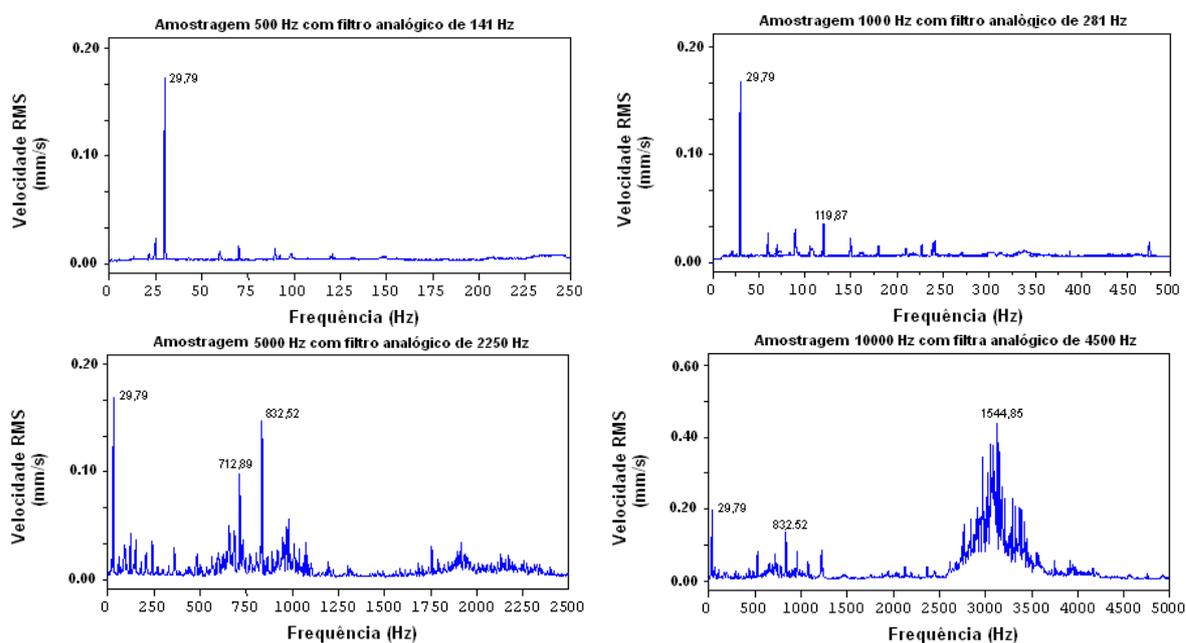


Figura 4.60 – Espectros de vibração obtidos no ponto 5 na terceira semana do Ensaio A.

Ponto 7

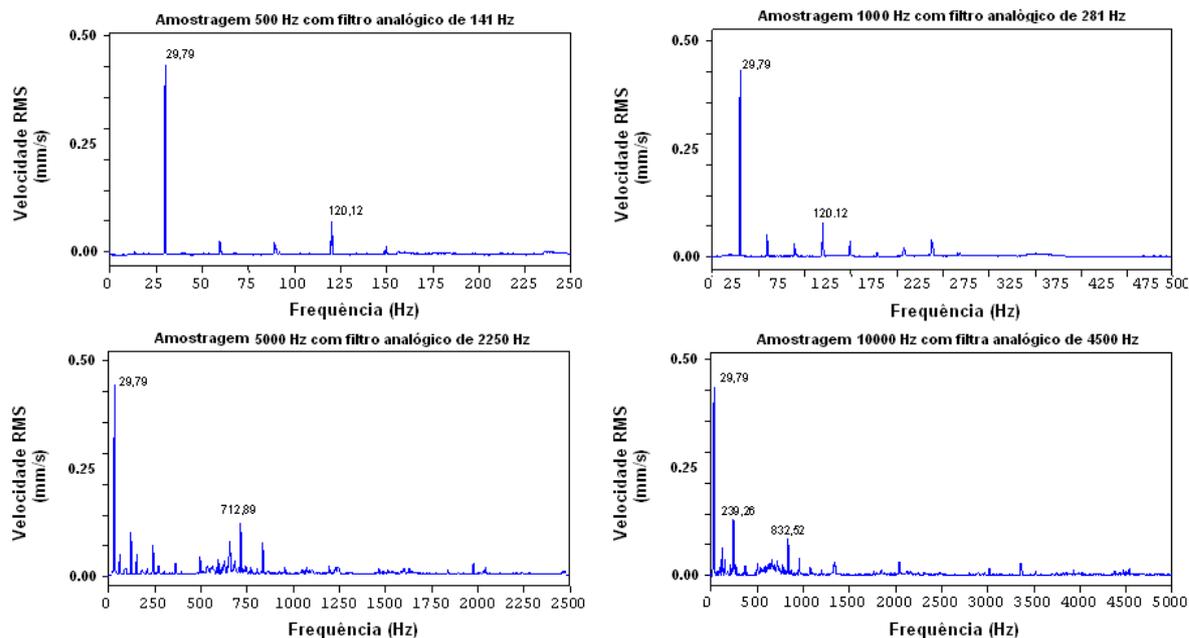


Figura 4.61 – Espectros de vibração obtidos no ponto 7 na terceira semana do Ensaio A.

Na Tabela 4.17, tem-se o valor eficaz das velocidades de vibração (mm/s) e os valores da severidade de vibração pela norma NBR 10082, (10 a 1000Hz) para a terceira semana do Ensaio A.

Tabela 4.17 - Valor eficaz das velocidades de vibração e valores da severidade de vibração para a terceira semana do Ensaio A.

	Valor eficaz de vibração (mm/s)			Severidade de Vibração
	500Hz	5000Hz	10KHz	NBR 10082
Ponto 2	0,25	0,70	0,97	0,61
Ponto 3	0,34	0,41	0,53	0,49
Ponto 5	0,34	0,42	1,05	0,37
Ponto 7	0,50	0,60	0,63	0,57

Ensaio A – quarta semana

Nas Figuras 4.62, 4.63, 4.64 e 4.65, têm-se os espectros de vibração para os pontos 2, 3, 5 e 7 respectivamente na quarta semana do Ensaio A. Para cada ponto utilizou-se frequências amostrais de 500, 1000, 5000 e 10000 Hz com os filtros analógicos de 141, 281, 2250 e 4500 Hz respectivamente.

Ponto 2

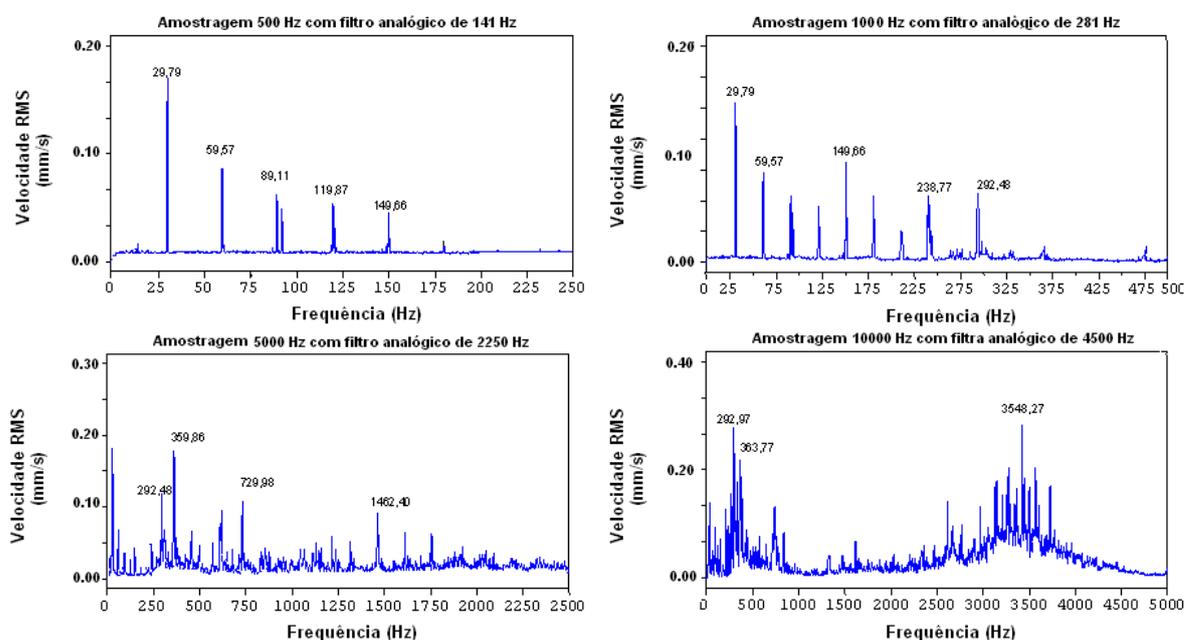


Figura 4.62 – Espectros de vibração obtidos no ponto 2 na quarta semana do Ensaio A.

Ponto 3

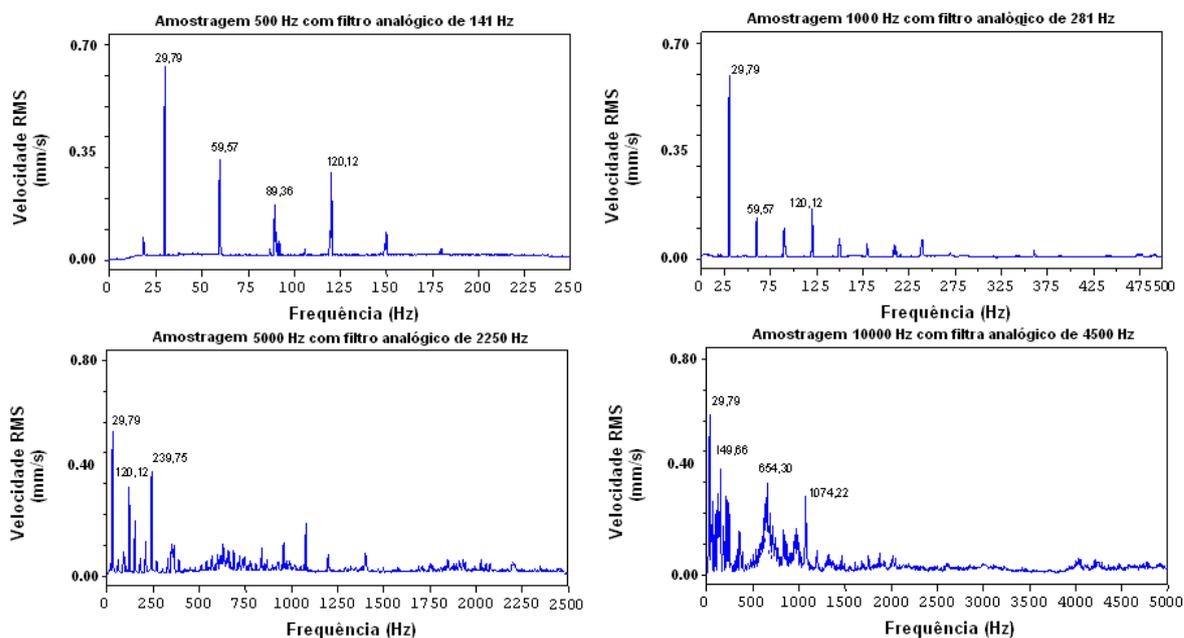


Figura 4.63 – Espectros de vibração obtidos no ponto 3 na quarta semana do Ensaio A.

Ponto 5

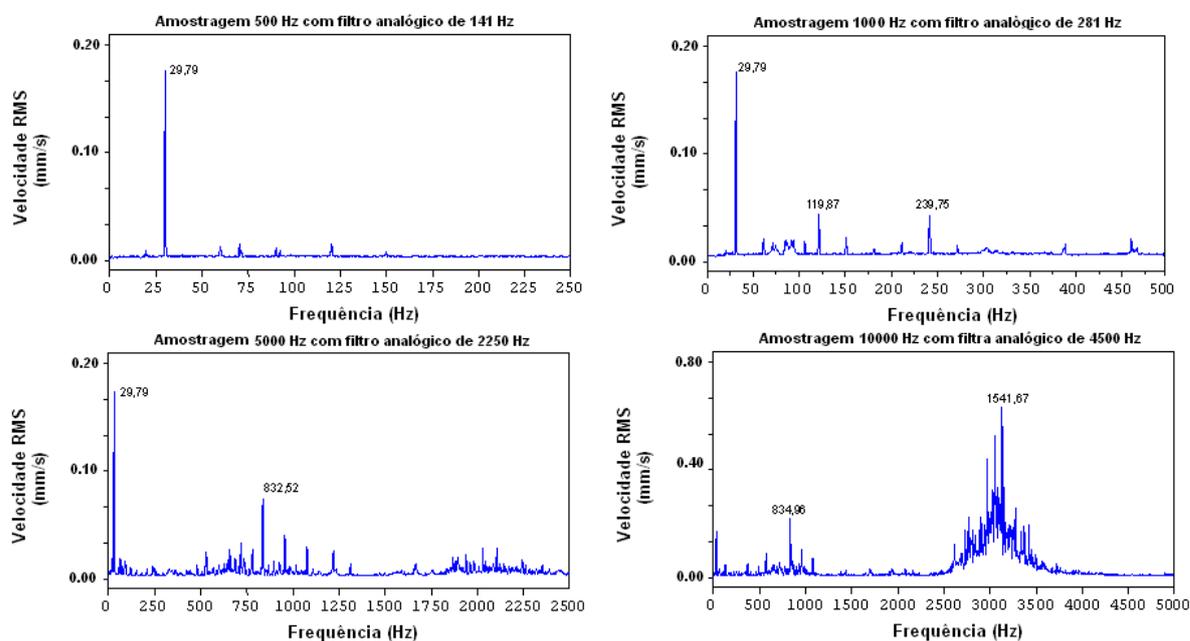


Figura 4.64 – Espectros de vibração obtidos no ponto 5 na quarta semana do Ensaio A.

Ponto 7

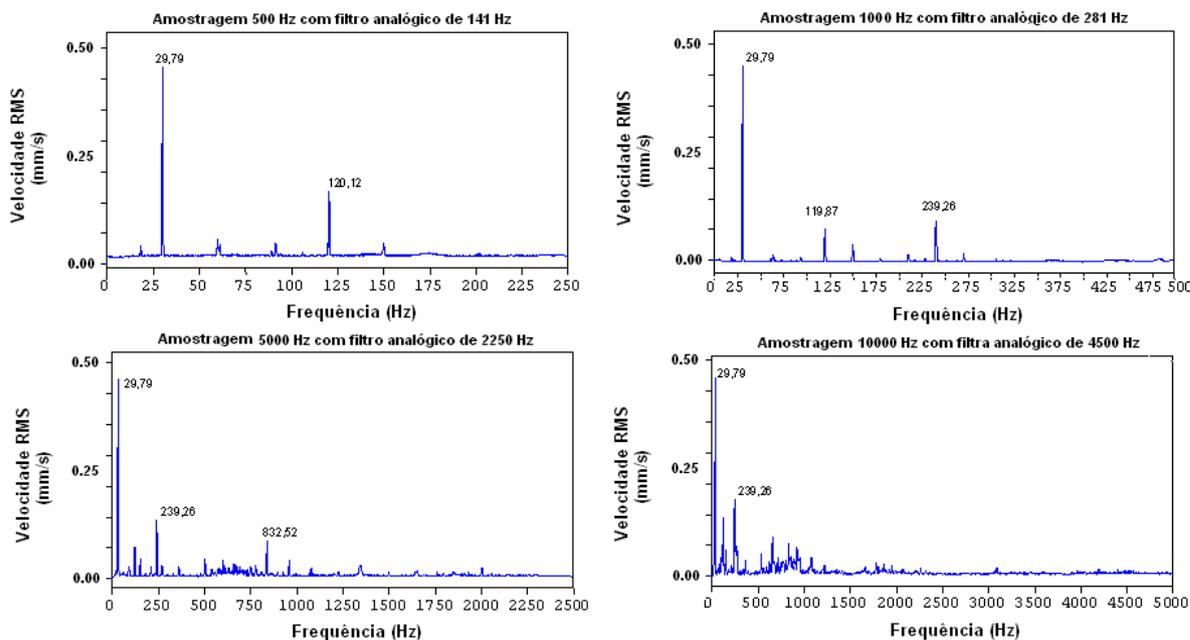


Figura 4.65 – Espectros de vibração obtidos no ponto 7 na quarta semana do Ensaio A.

Na Tabela 4.18, tem-se o valor eficaz das velocidades de vibração (mm/s) e os valores da severidade de vibração pela norma NBR 10082, (10 a 1000Hz) para a quarta semana do Ensaio A.

Tabela 4.18 - Valor eficaz das velocidades de vibração e valores da severidade de vibração para a quarta semana do Ensaio A.

	Valor eficaz de vibração (mm/s)			Severidade de Vibração
	500Hz	5000Hz	10KHz	NBR 10082
Ponto 2	0,27	0,71	0,99	0,64
Ponto 3	0,34	0,43	0,54	0,51
Ponto 5	0,37	0,44	1,09	0,42
Ponto 7	0,51	0,64	0,68	0,61

Ensaio B – primeira semana

Nas Figuras 4.66, 4.67, 4.68 e 4.69, têm-se os espectros de vibração para os pontos 2, 3, 5 e 7 respectivamente na primeira semana do Ensaio B. Para cada ponto utilizou-se frequências amostrais de 500, 1000, 5000 e 10000 Hz com os filtros analógicos de 141, 281, 2250 e 4500 Hz respectivamente.

Ponto 2

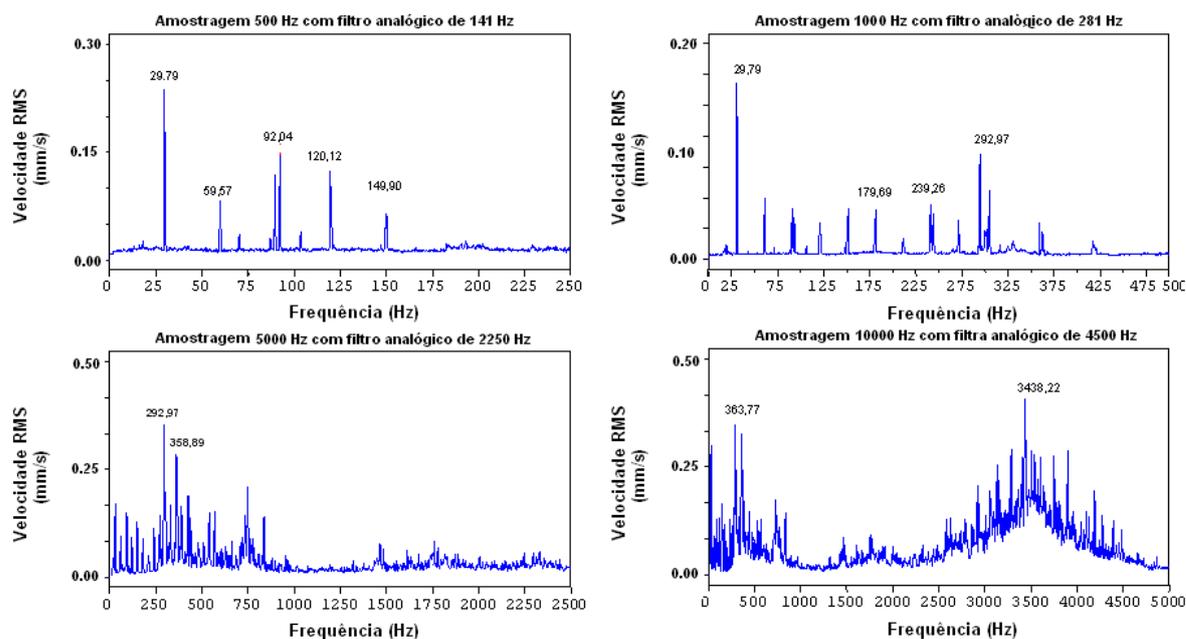


Figura 4.66 – Espectros de vibração obtidos no ponto 2 na primeira semana do Ensaio B.

Ponto 3

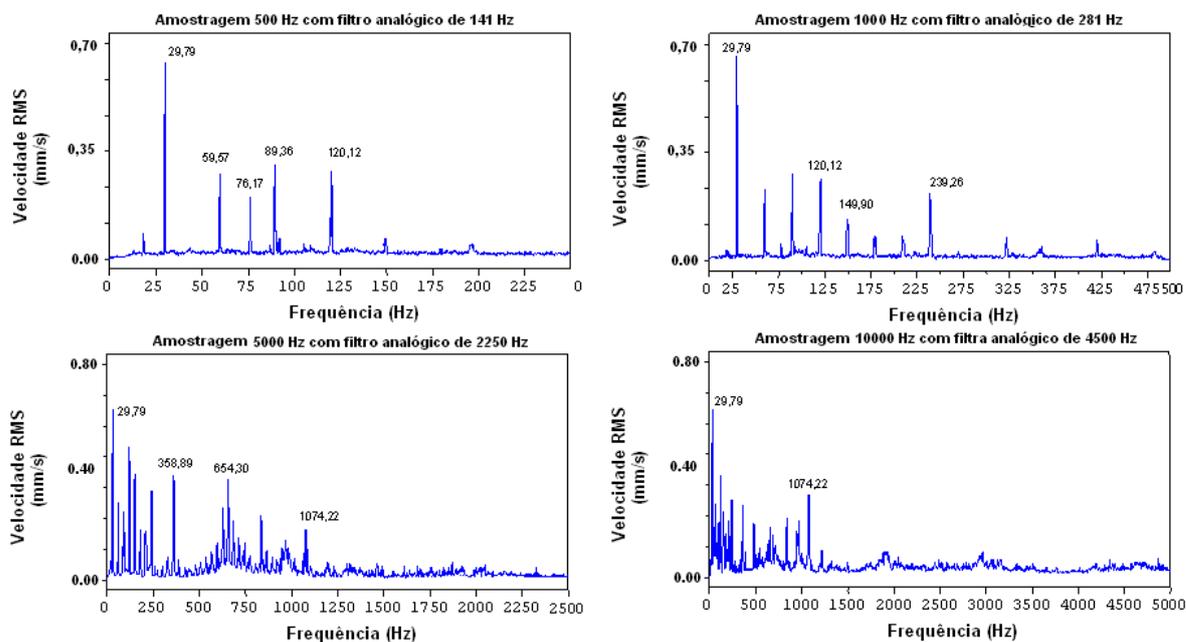


Figura 4.67 – Espectros de vibração obtidos no ponto 3 na primeira semana do Ensaio B.

Ponto 5

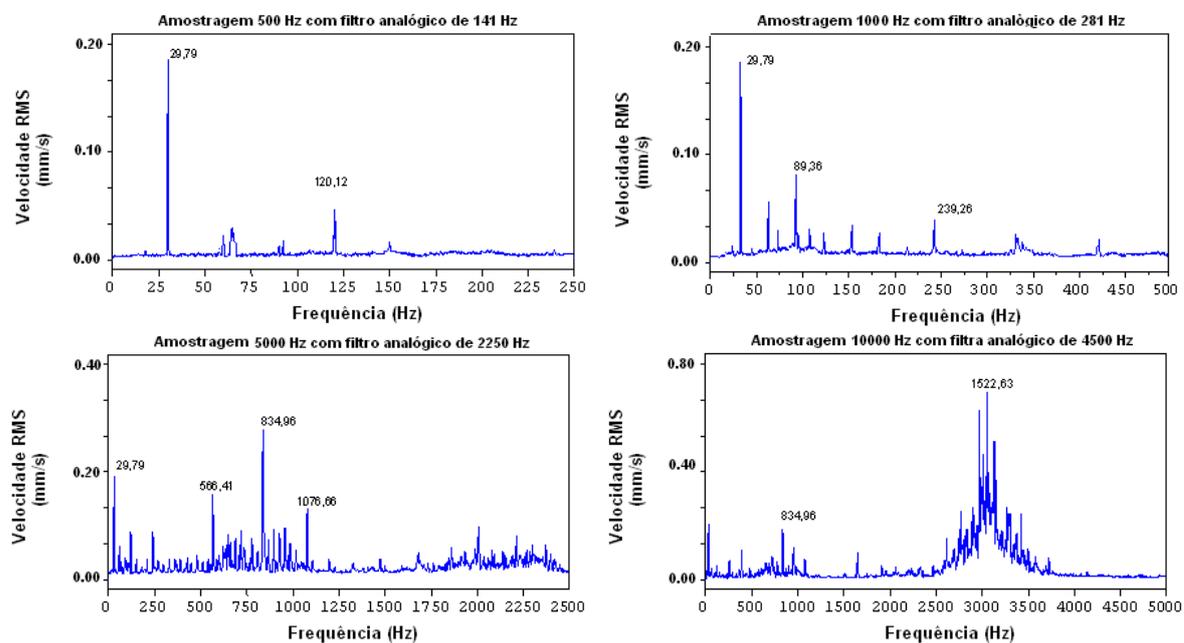


Figura 4.68 – Espectros de vibração obtidos no ponto 5 na primeira semana do Ensaio B.

Ponto 7

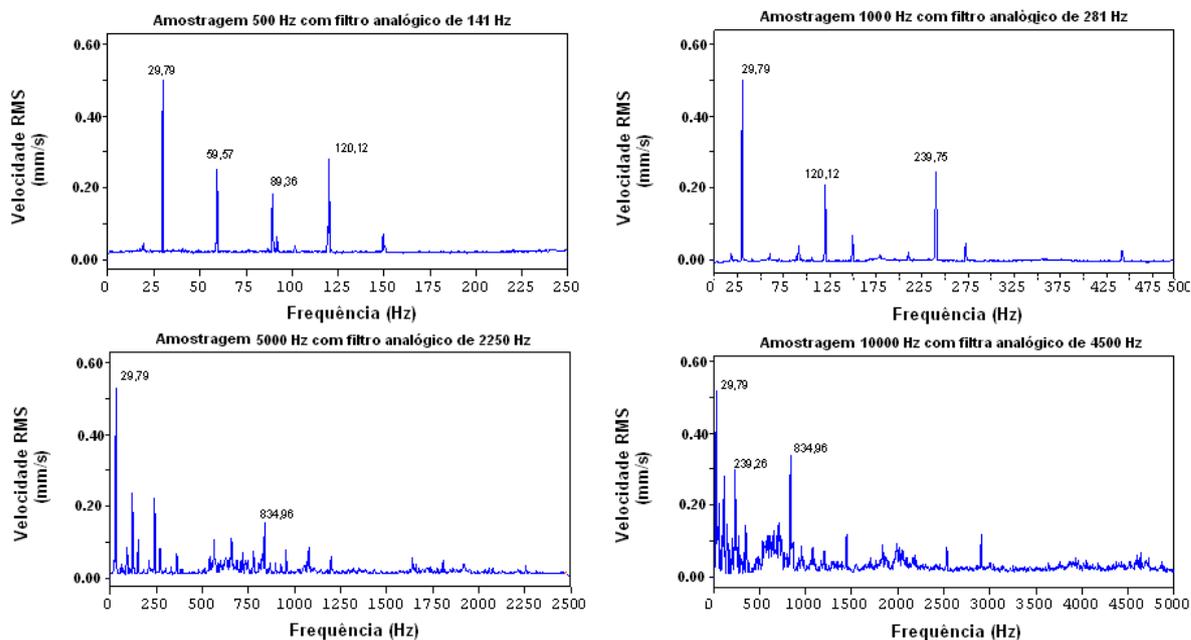


Figura 4.69 – Espectros de vibração obtidos no ponto 7 na primeira semana do Ensaio B.

Na Tabela 4.19, tem-se o valor eficaz das velocidades de vibração (mm/s) e os valores da severidade de vibração pela norma NBR 10082, (10 a 1000Hz) para a primeira semana do Ensaio B.

Tabela 4.19 - Valor eficaz das velocidades de vibração e valores da severidade de vibração para a primeira semana do Ensaio B.

	Valor eficaz de vibração (mm/s)			Severidade de Vibração
	500Hz	5000Hz	10KHz	NBR 10082
Ponto 2	0,31	0,76	1,05	0,67
Ponto 3	0,35	0,46	0,56	0,52
Ponto 5	0,41	0,48	1,11	0,44
Ponto 7	0,50	0,65	0,70	0,65

Ensaio B – segunda semana

Nas Figuras 4.70, 4.71, 4.72 e 4.73, têm-se os espectros de vibração para os pontos 2, 3, 5 e 7 respectivamente na segunda semana do Ensaio B. Para cada ponto utilizou-se frequências amostrais de 500, 1000, 5000 e 10000 Hz com os filtros analógicos de 141, 281, 2250 e 4500 Hz respectivamente.

Ponto 2

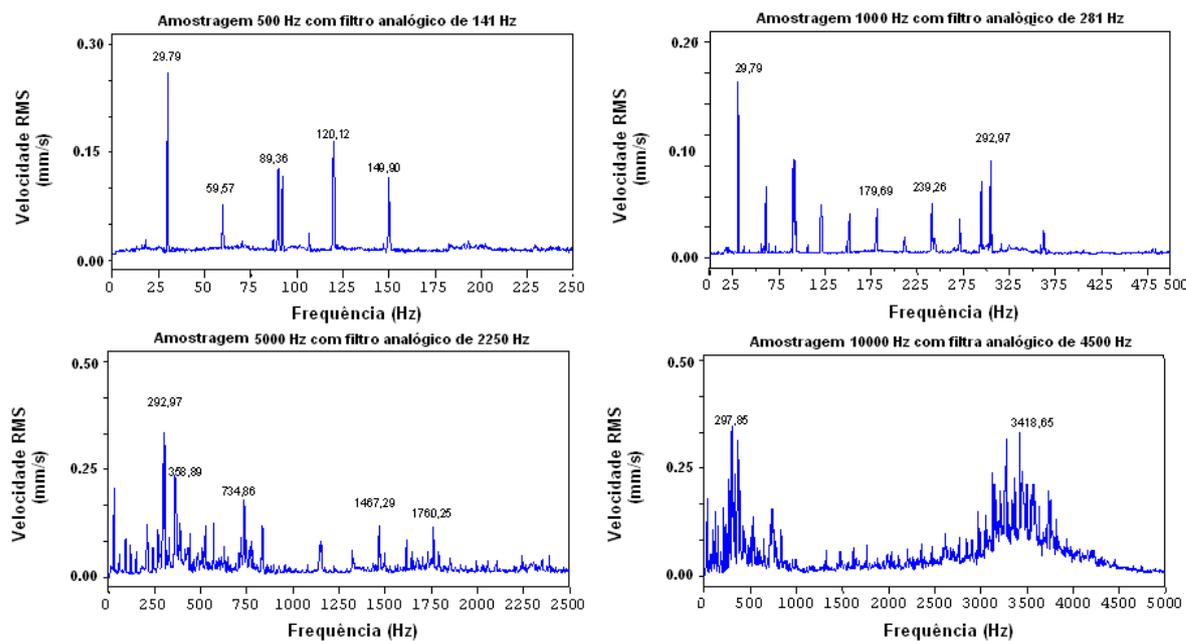


Figura 4.70 – Espectros de vibração obtidos no ponto 2 na segunda semana do Ensaio B.

Ponto 3

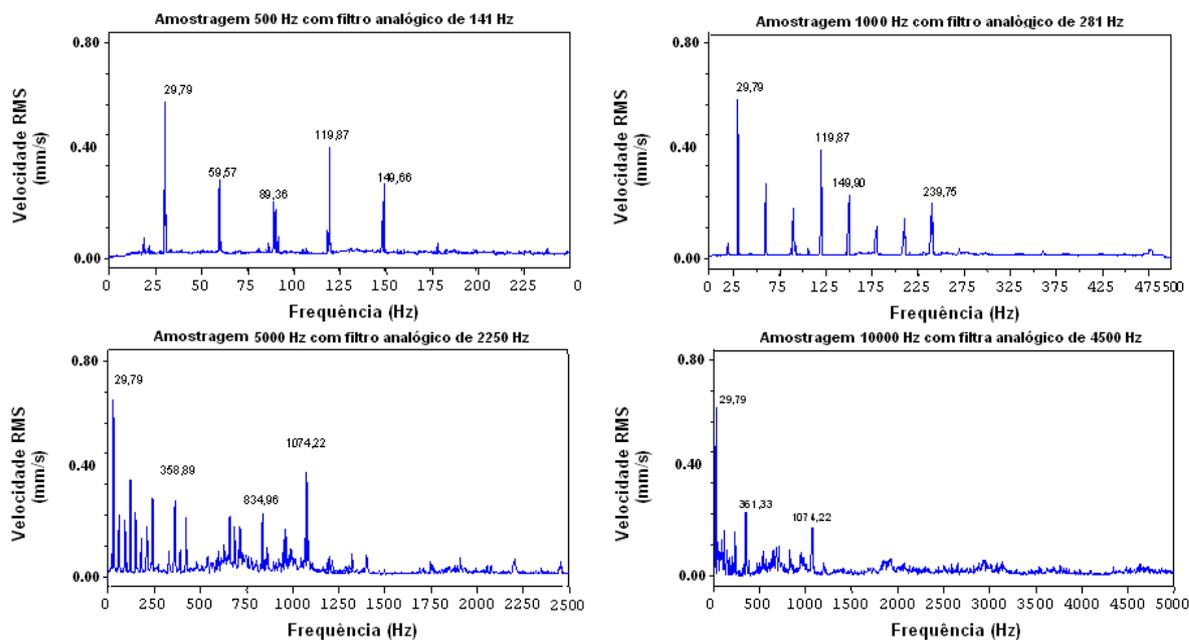


Figura 4.71 – Espectros de vibração obtidos no ponto 3 na segunda semana do Ensaio B.

Ponto 5

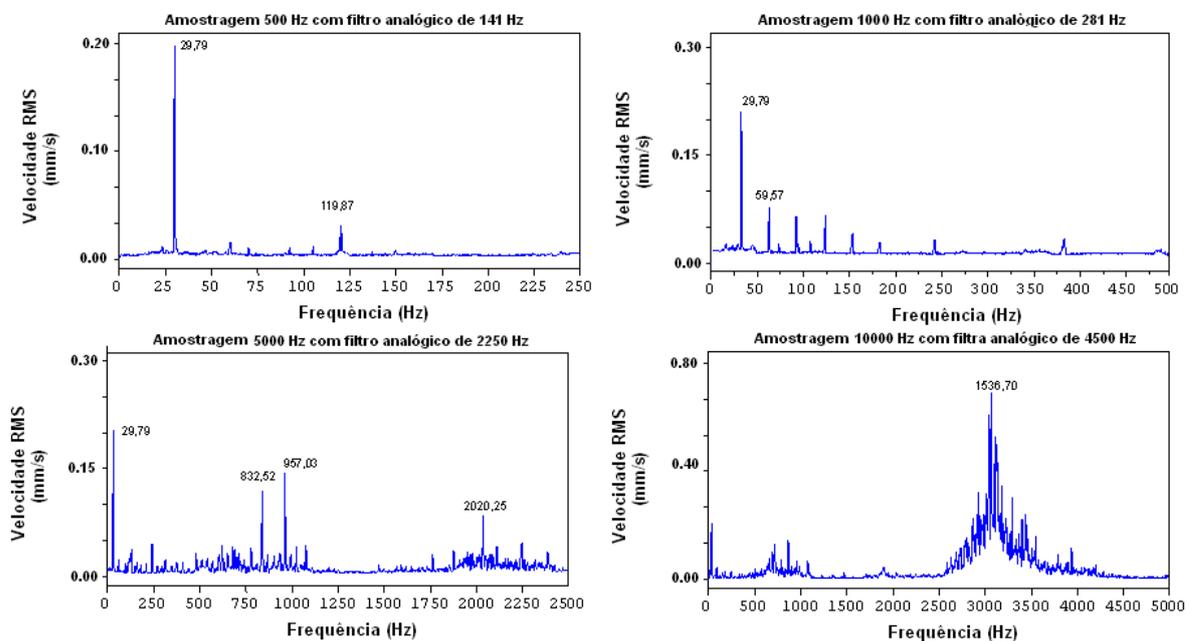


Figura 4.72 – Espectros de vibração obtidos no ponto 5 na segunda semana do Ensaio B.

Ponto 7

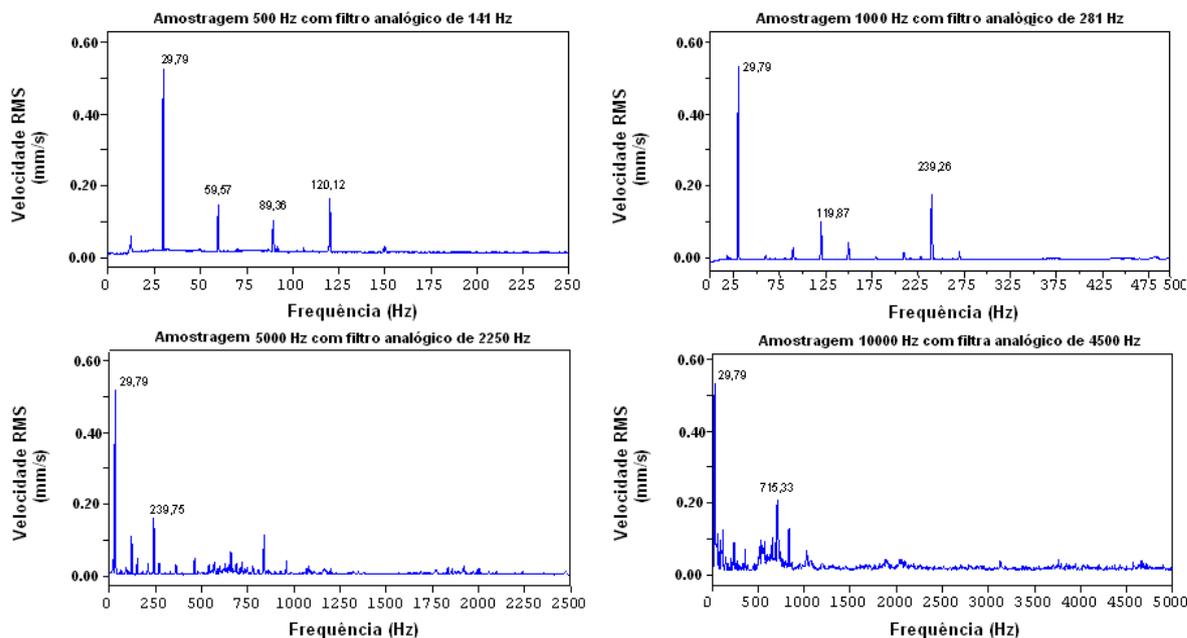


Figura 4.73 – Espectros de vibração obtidos no ponto 7 na segunda semana do Ensaio B.

Na Tabela 4.20, tem-se o valor eficaz das velocidades de vibração (mm/s) e os valores da severidade de vibração pela norma NBR 10082, (10 a 1000Hz) para a segunda semana do Ensaio B.

Tabela 4.20 - Valor eficaz das velocidades de vibração e valores da severidade de vibração para a segunda semana do Ensaio B.

	Valor eficaz de vibração (mm/s)			Severidade de Vibração
	500Hz	5000Hz	10KHz	NBR 10082
Ponto 2	0,32	0,75	1,05	0,68
Ponto 3	0,34	0,46	0,58	0,53
Ponto 5	0,44	0,49	1,14	0,46
Ponto 7	0,52	0,66	0,74	0,68

Ensaio B – terceira semana

Nas Figuras 4.74, 4.75, 4.76 e 4.73, têm-se os espectros de vibração para os pontos 2, 3, 5 e 7 respectivamente na terceira semana do Ensaio B. Para cada ponto utilizou-se frequências amostrais de 500, 1000, 5000 e 10000 Hz com os filtros analógicos de 141, 281, 2250 e 4500 Hz respectivamente.

Ponto 2

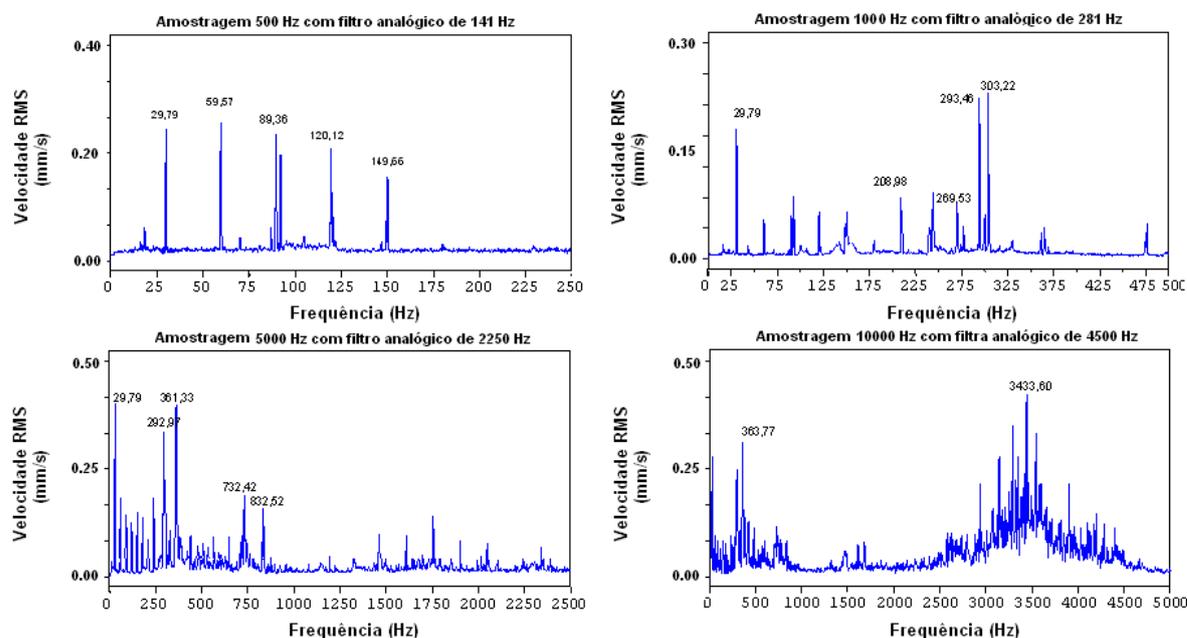


Figura 4.74 – Espectros de vibração obtidos no ponto 2 na terceira semana do Ensaio B.

Ponto 3

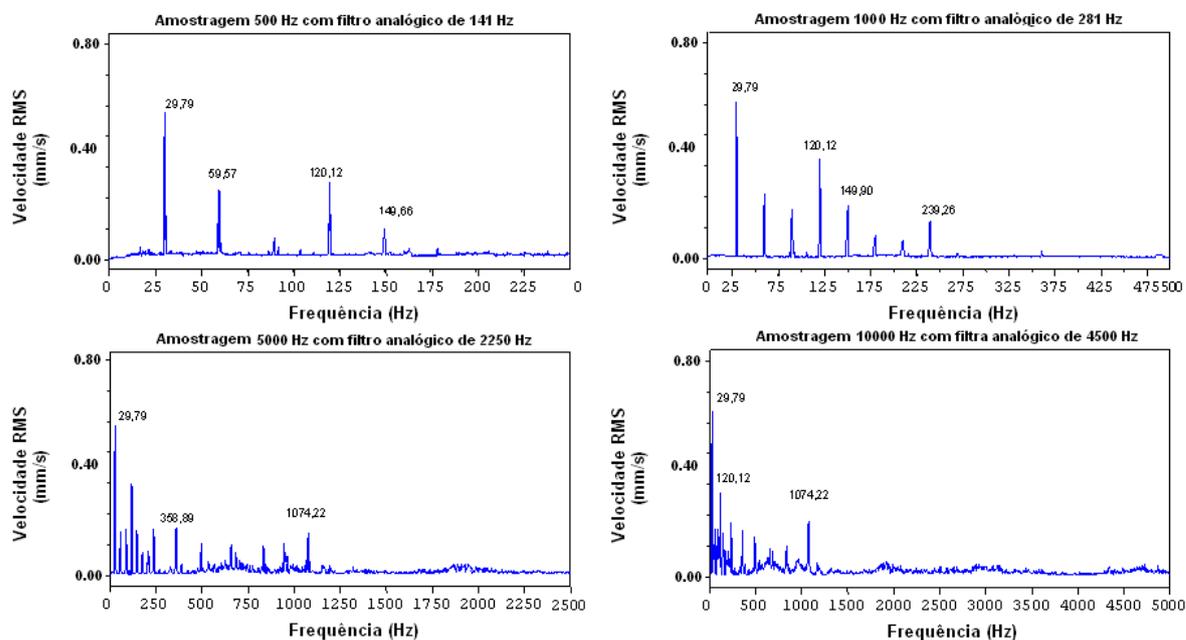


Figura 4.75 – Espectros de vibração obtidos no ponto 3 na terceira semana do Ensaio B.

Ponto 5

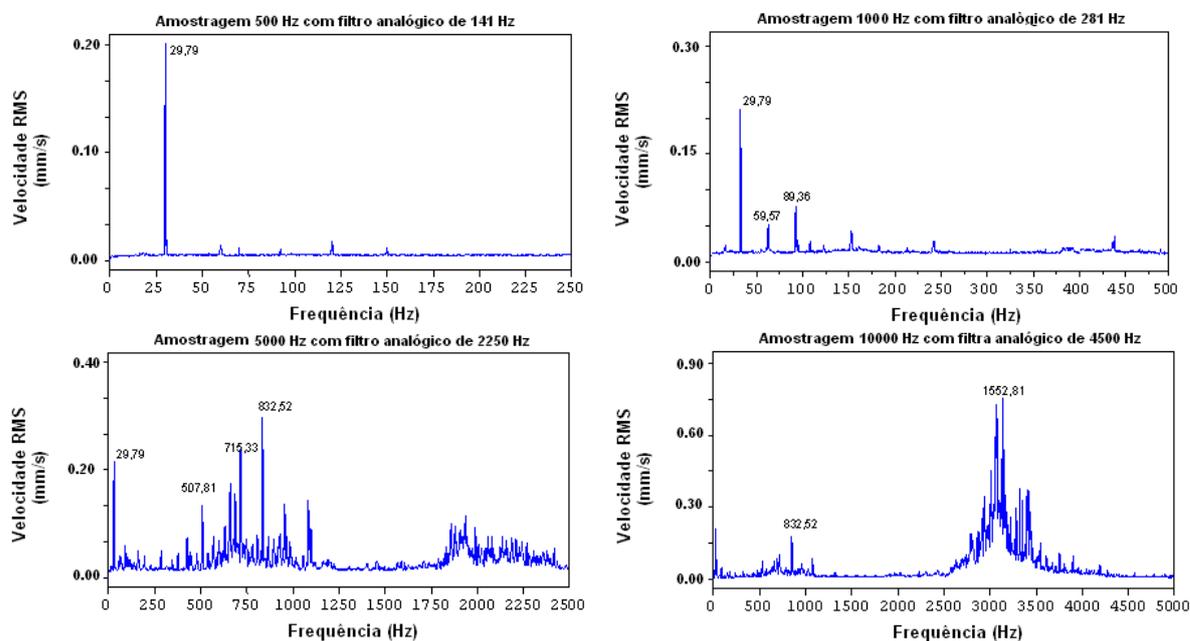


Figura 4.76 – Espectros de vibração obtidos no ponto 5 na terceira semana do Ensaio B.

Ponto 7

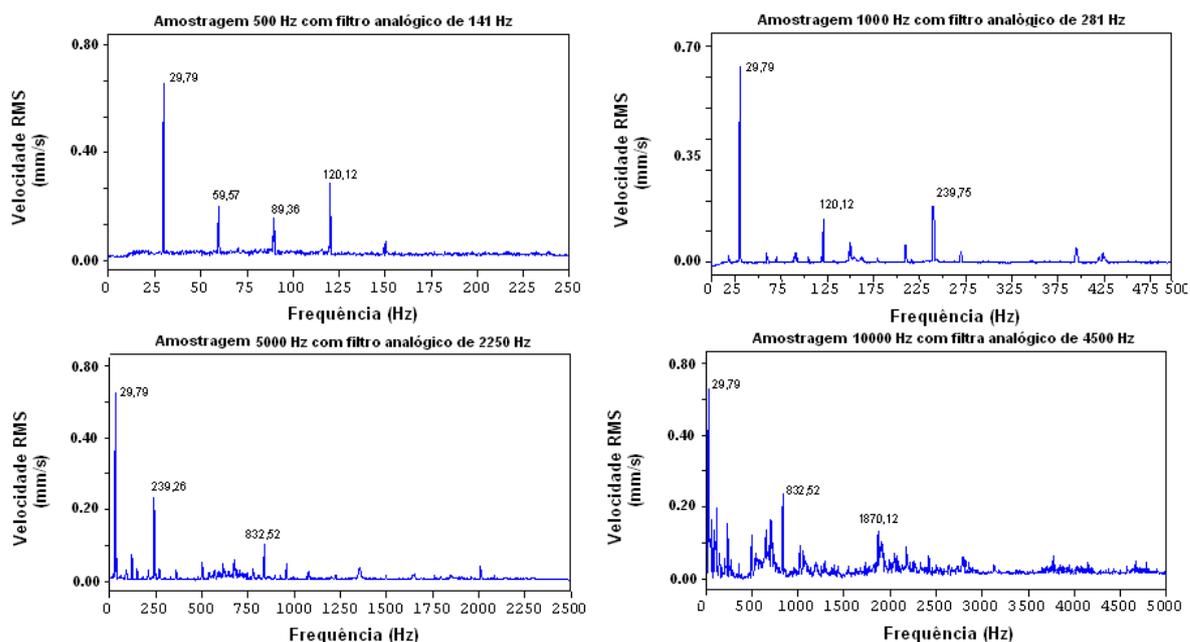


Figura 4.77 – Espectros de vibração obtidos no ponto 7 na terceira semana do Ensaio B.

Na Tabela 4.21, tem-se o valor eficaz das velocidades de vibração (mm/s) e os valores da severidade de vibração pela norma NBR 10082, (10 a 1000Hz) para a terceira semana do Ensaio B.

Tabela 4.21 - Valor eficaz das velocidades de vibração e valores da severidade de vibração para a terceira semana do Ensaio B.

	Valor eficaz de vibração (mm/s)			Severidade de Vibração
	500Hz	5000Hz	10KHz	NBR 10082
Ponto 2	0,32	0,76	1,05	0,69
Ponto 3	0,36	0,47	0,58	0,55
Ponto 5	0,45	0,52	1,15	0,48
Ponto 7	0,53	0,66	0,75	0,70

Ensaio B – quarta semana

Nas Figuras 4.78, 4.79, 4.80 e 4.81, têm-se os espectros de vibração para os pontos 2, 3, 5 e 7 respectivamente na quarta semana do Ensaio B. Para cada ponto utilizou-se frequências amostrais de 500, 1000, 5000 e 10000 Hz com os filtros analógicos de 141, 281, 2250 e 4500 Hz respectivamente.

Ponto 2

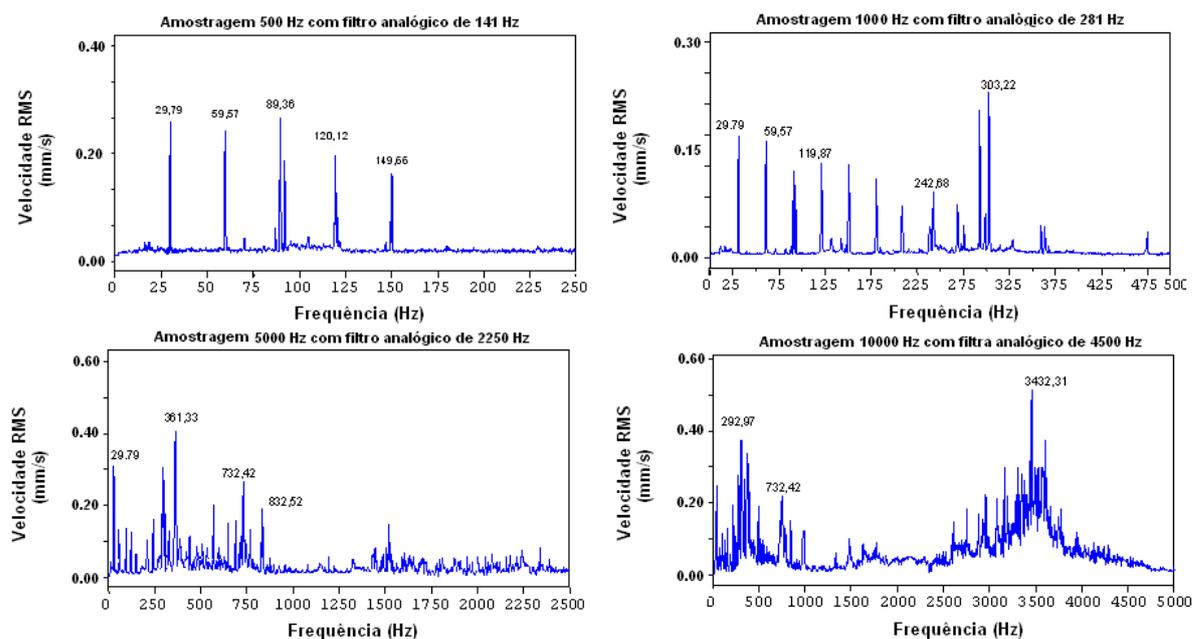


Figura 4.78 – Espectros de vibração obtidos no ponto 2 na quarta semana do Ensaio B.

Ponto 3

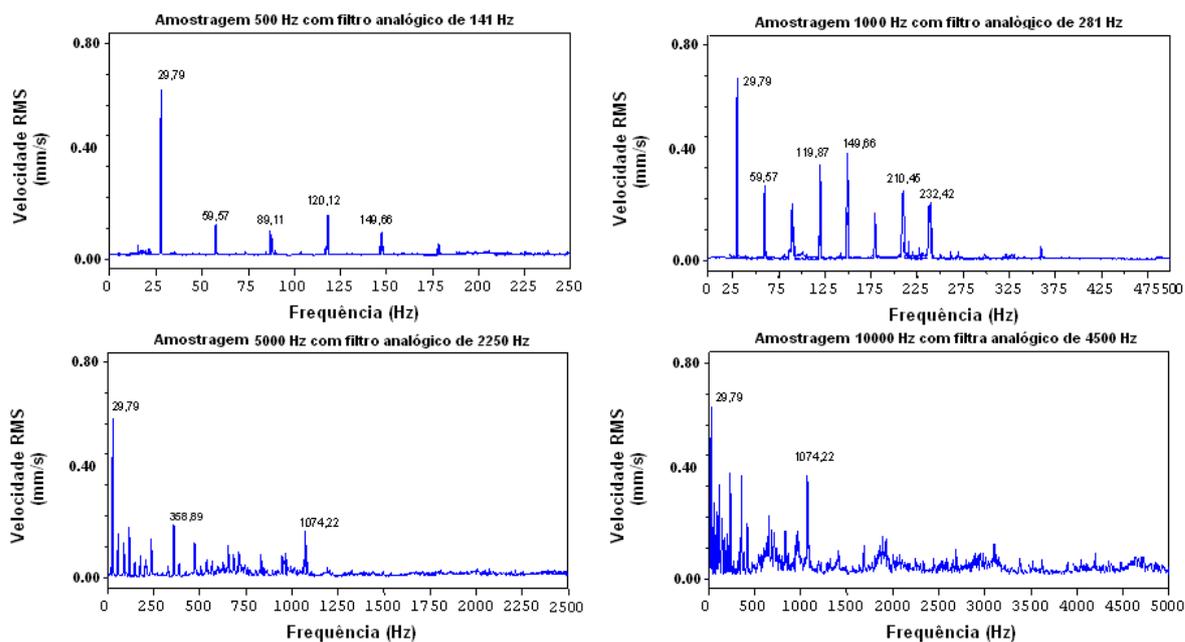


Figura 4.79 – Espectros de vibração obtidos no ponto 3 na quarta semana do Ensaio B.

Ponto 5

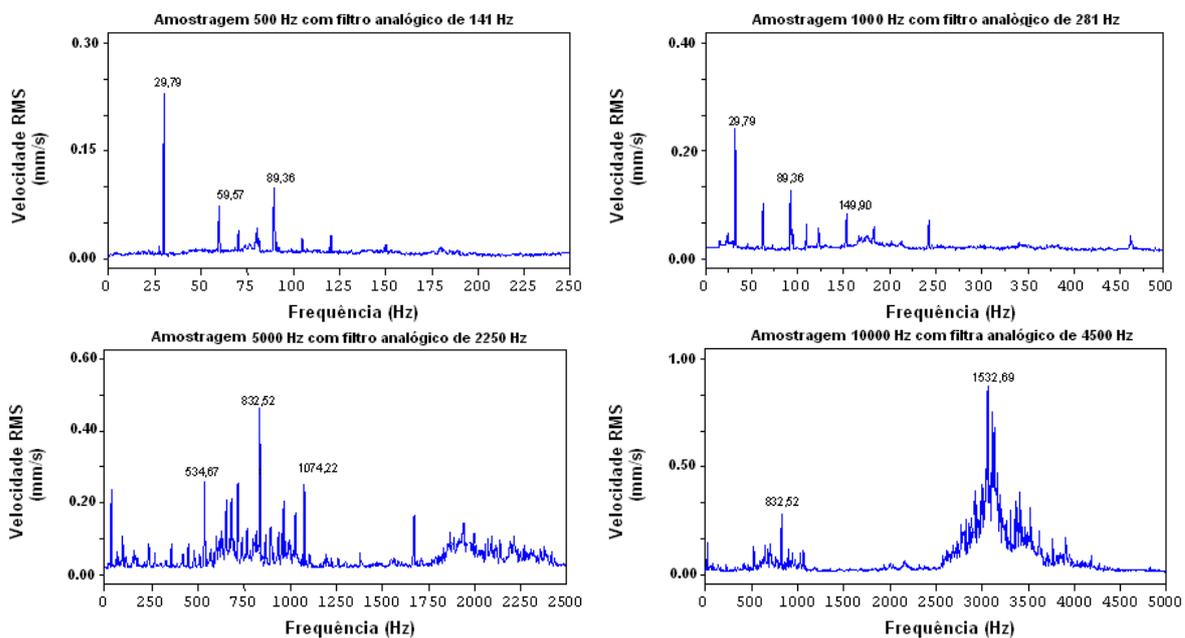


Figura 4.80 – Espectros de vibração obtidos no ponto 5 na quarta semana do Ensaio B.

Ponto 7

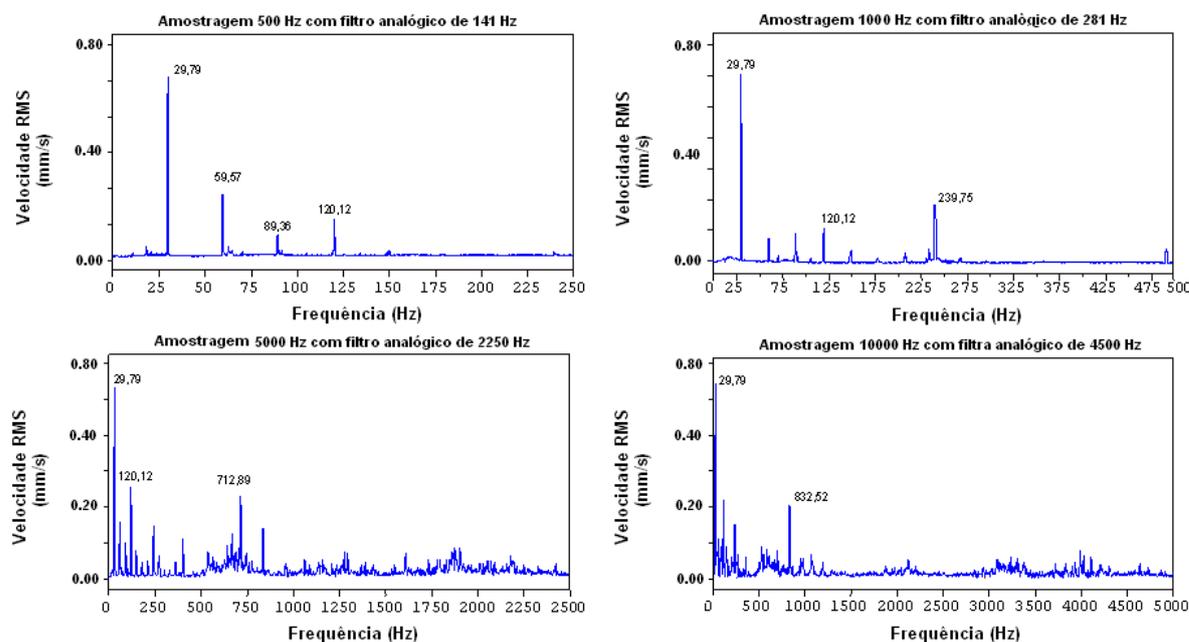


Figura 4.81 – Espectros de vibração obtidos no ponto 7 na quarta semana do Ensaio B.

Na Tabela 4.22, tem-se o valor eficaz das velocidades de vibração (mm/s) e os valores da severidade de vibração pela norma NBR 10082, (10 a 1000Hz) para a quarta semana do Ensaio B.

Tabela 4.22 - Valor eficaz das velocidades de vibração e valores da severidade de vibração para a quarta semana do Ensaio B.

	Valor eficaz de vibração (mm/s)			Severidade de Vibração
	500Hz	5000Hz	10KHz	NBR 10082
Ponto 2	0,33	0,75	1,07	0,71
Ponto 3	0,37	0,49	0,58	0,58
Ponto 5	0,46	0,52	1,14	0,51
Ponto 7	0,54	0,69	0,76	0,72

Ensaio C – primeira semana

Nas Figuras 4.82, 4.83, 4.84 e 4.85, têm-se os espectros de vibração para os pontos 2, 3, 5 e 7 respectivamente na primeira semana do Ensaio C. Para cada ponto utilizou-se frequências amostrais de 500, 1000, 5000 e 10000 Hz com os filtros analógicos de 141, 281, 2250 e 4500 Hz respectivamente.

Ponto 2

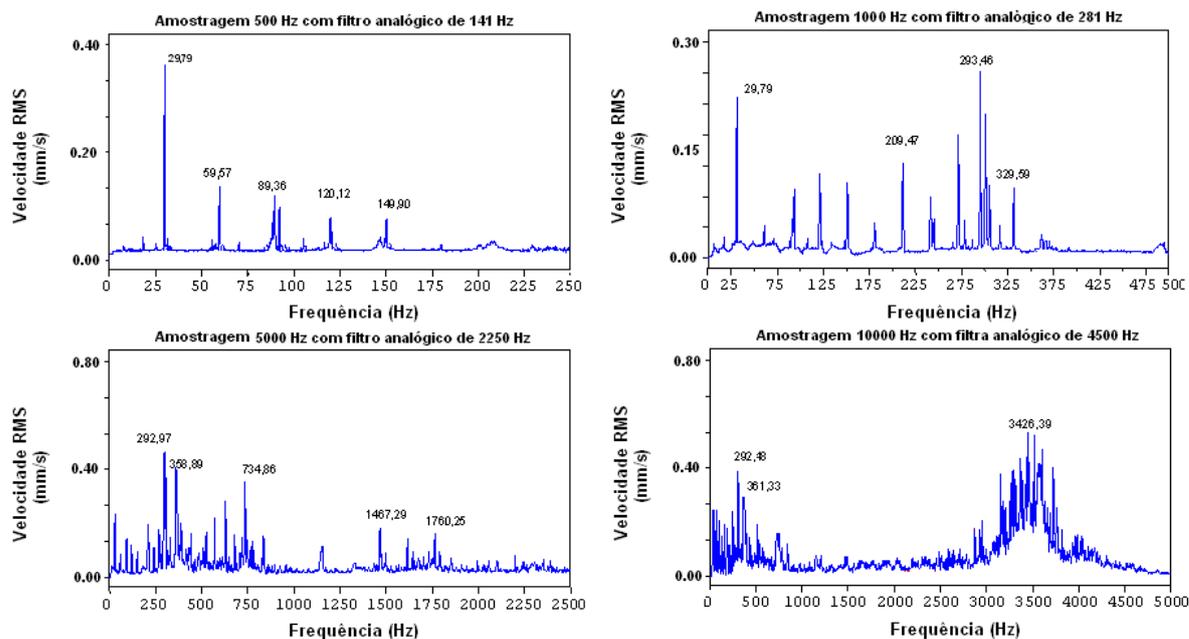


Figura 4.82 – Espectros de vibração obtidos no ponto 2 na primeira semana do Ensaio C.

Ponto 3

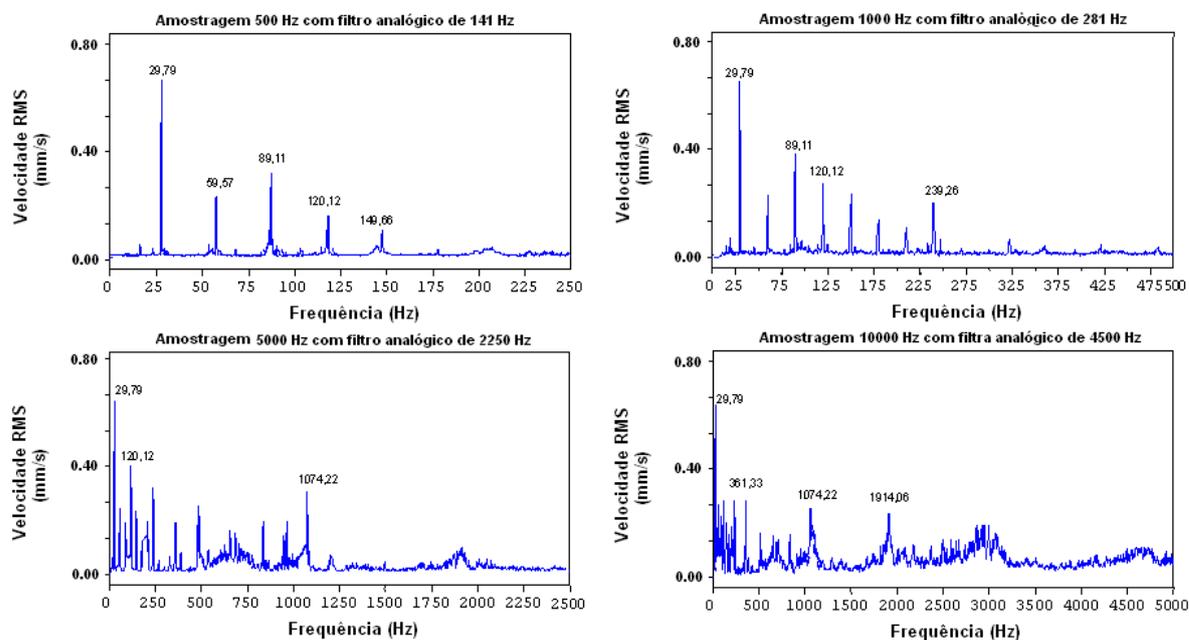


Figura 4.83 – Espectros de vibração obtidos no ponto 3 na primeira semana do Ensaio C.

Ponto 5

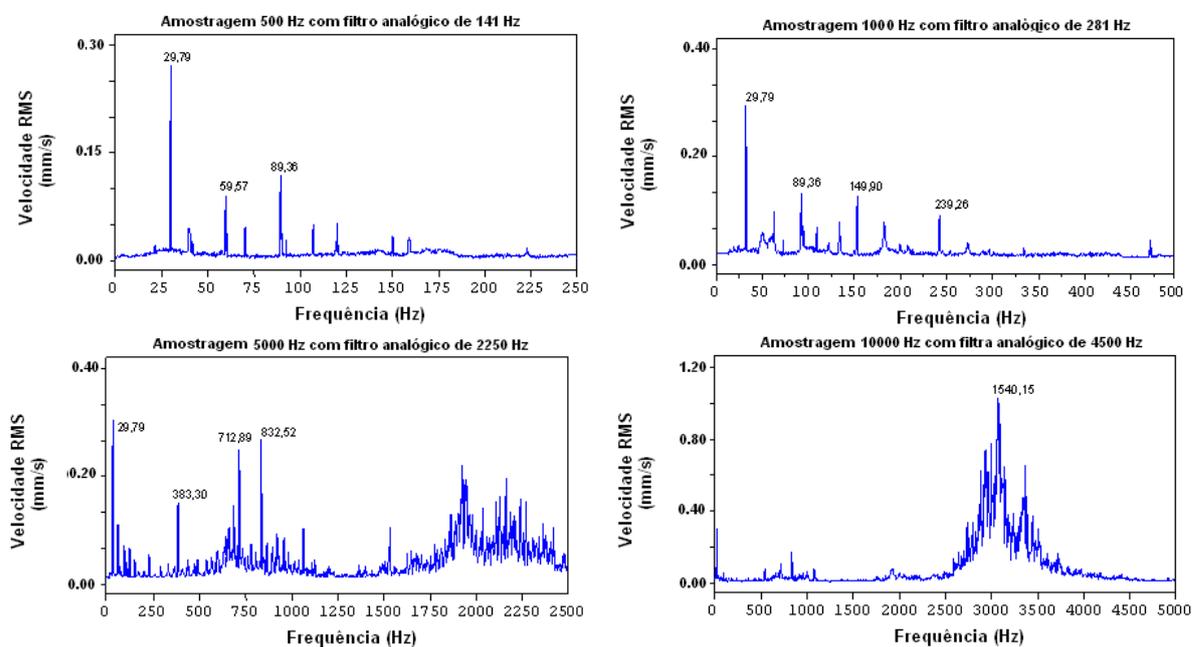


Figura 4.84 – Espectros de vibração obtidos no ponto 5 na primeira semana do Ensaio C.

Ponto 7

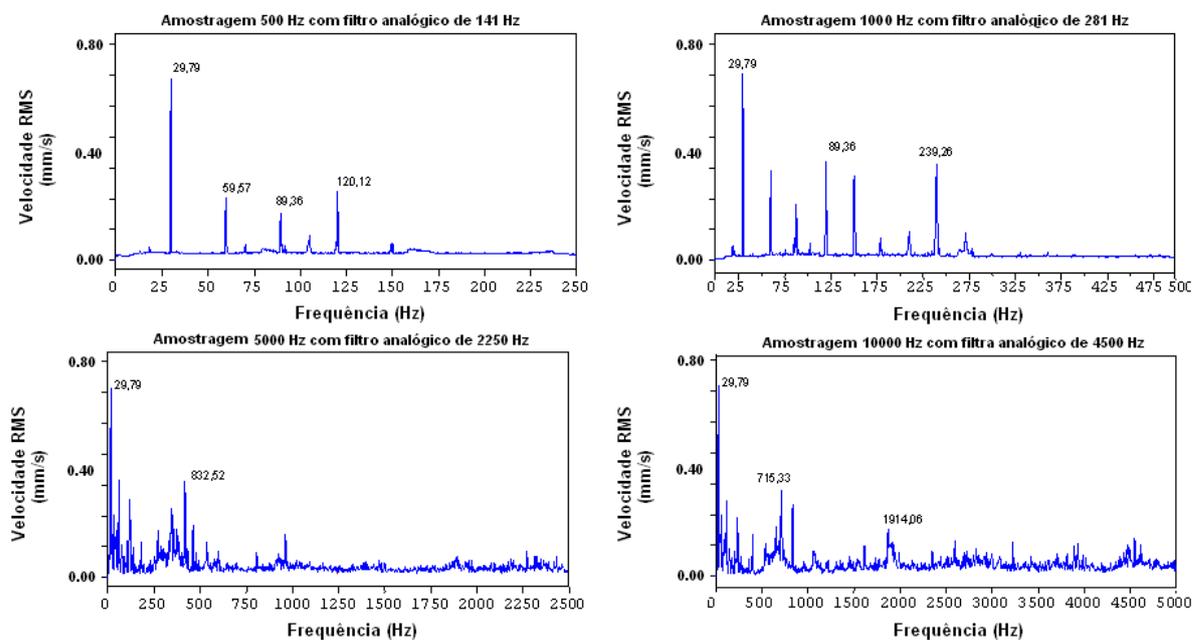


Figura 4.85 – Espectros de vibração obtidos no ponto 7 na primeira semana do Ensaio C.

Na Tabela 4.23, tem-se o valor eficaz das velocidades de vibração (mm/s) e os valores da severidade de vibração pela norma NBR 10082, (10 a 1000Hz) para a primeira semana do Ensaio C.

Tabela 4.23 - Valor eficaz das velocidades de vibração e valores da severidade de vibração para a primeira semana do Ensaio C.

	Valor eficaz de vibração (mm/s)			Severidade de Vibração
	500Hz	5000Hz	10KHz	NBR 10082
Ponto 2	0,40	0,80	1,16	0,76
Ponto 3	0,42	0,53	0,65	0,65
Ponto 5	0,51	0,59	1,22	0,59
Ponto 7	0,59	0,74	0,82	0,76

Ensaio C – segunda semana

Nas Figuras 4.86, 4.87, 4.88 e 4.89, têm-se os espectros de vibração para os pontos 2, 3, 5 e 7 respectivamente na segunda semana do Ensaio C. Para cada ponto utilizou-se frequências amostrais de 500, 1000, 5000 e 10000 Hz com os filtros analógicos de 141, 281, 2250 e 4500 Hz respectivamente.

Ponto 2

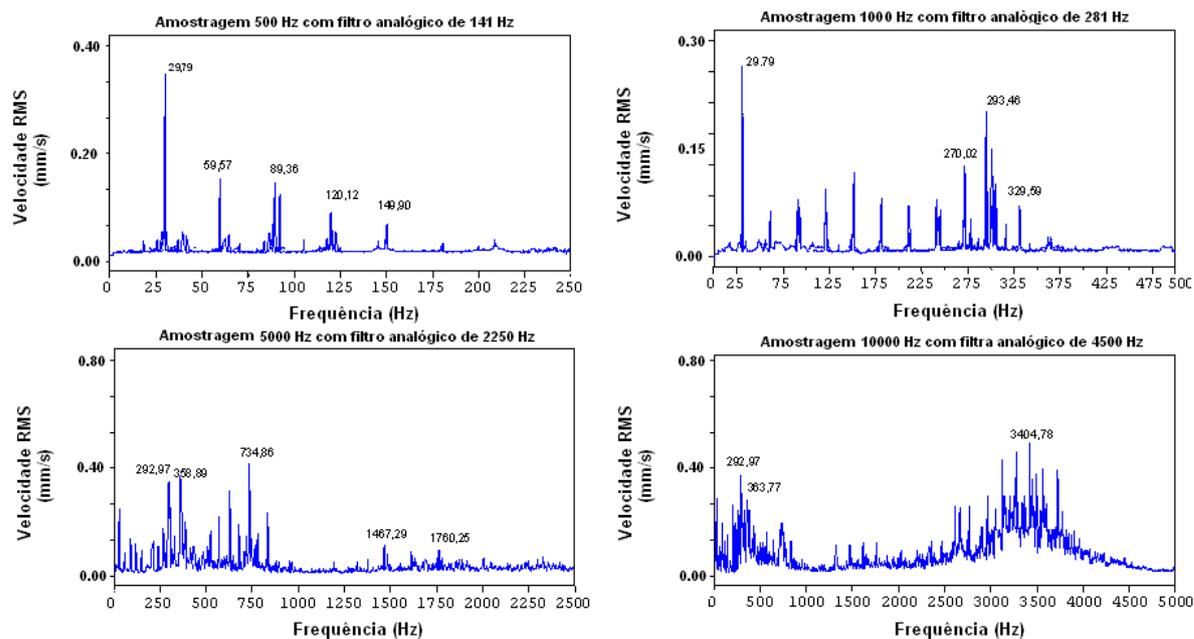


Figura 4.86 – Espectros de vibração obtidos no ponto 2 na segunda semana do Ensaio C.

Ponto 3

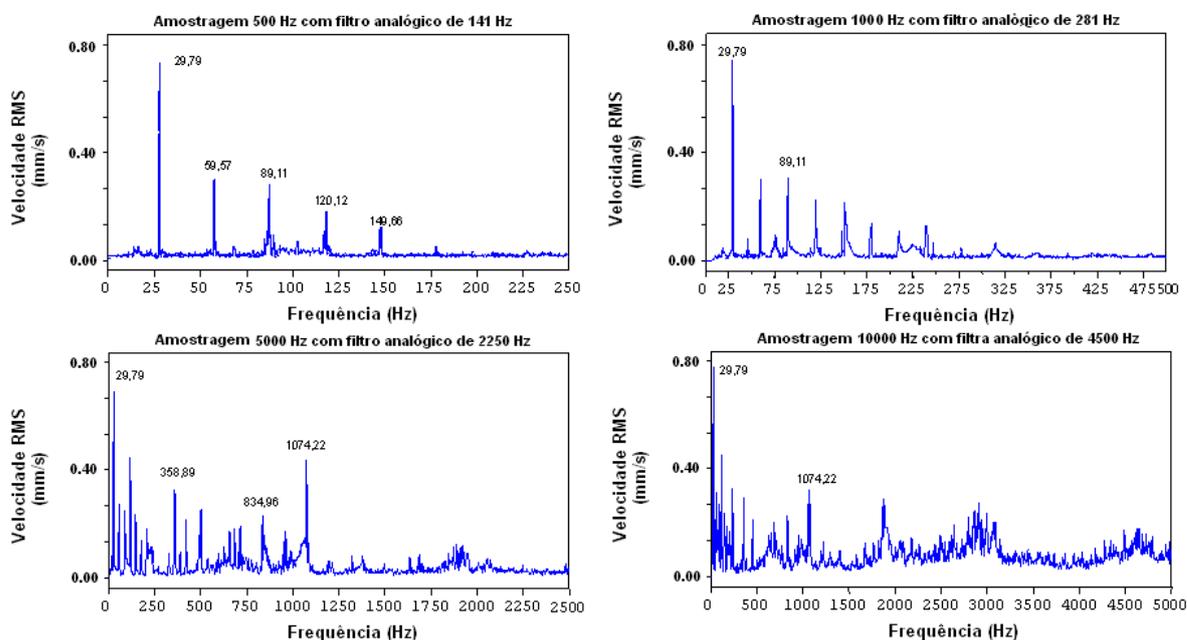


Figura 4.87 – Espectros de vibração obtidos no ponto 3 na segunda semana do Ensaio C.

Ponto 5

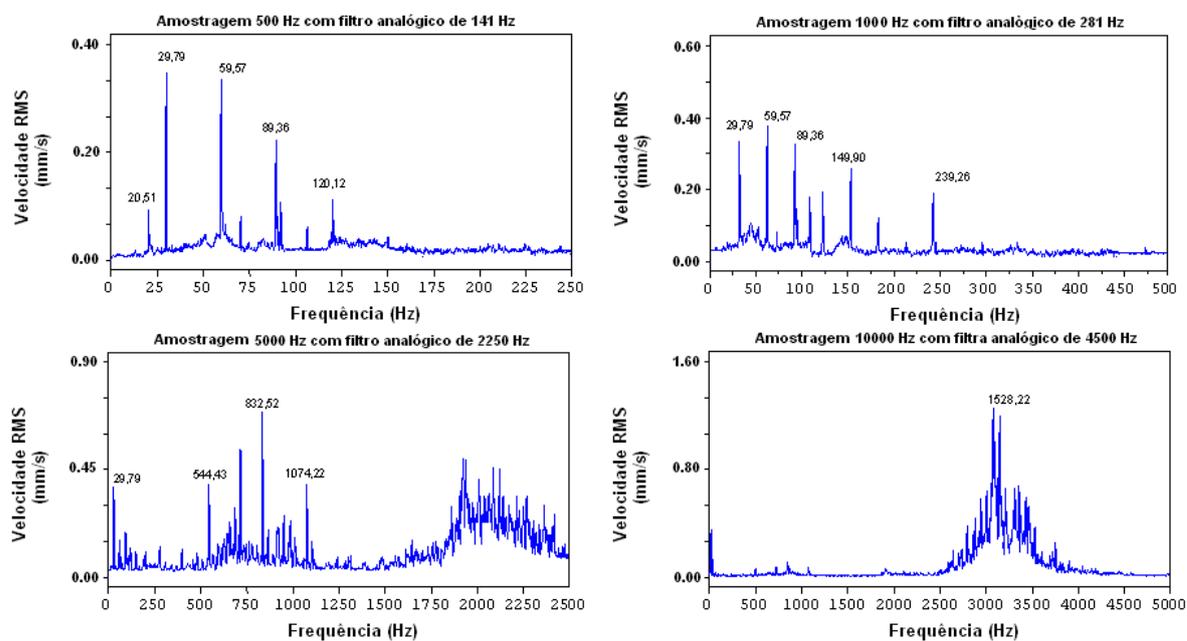


Figura 4.88 – Espectros de vibração obtidos no ponto 5 na segunda semana do Ensaio C.

Ponto 7

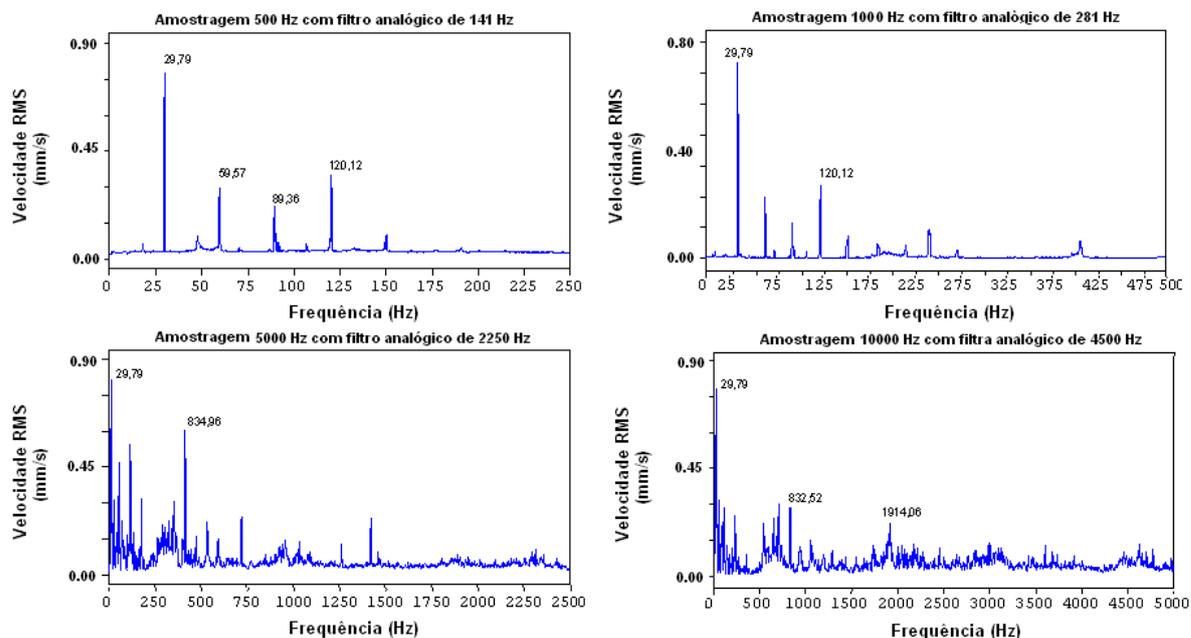


Figura 4.89 – Espectros de vibração obtidos no ponto 7 na segunda semana do Ensaio C.

Na Tabela 4.24, tem-se o valor eficaz das velocidades de vibração (mm/s) e os valores da severidade de vibração pela norma NBR 10082, (10 a 1000Hz) para a segunda semana do Ensaio C.

Tabela 4.24 - Valor eficaz das velocidades de vibração e valores da severidade de vibração para a segunda semana do Ensaio C.

	Valor eficaz de vibração (mm/s)			Severidade de Vibração
	500Hz	5000Hz	10KHz	NBR 10082
Ponto 2	0,42	0,83	1,20	0,81
Ponto 3	0,45	0,57	0,66	0,69
Ponto 5	0,55	0,64	1,24	0,62
Ponto 7	0,64	0,75	0,83	0,79

Na Figura 4.90, tem-se a evolução da severidade de vibração de acordo com a NBR 10082.

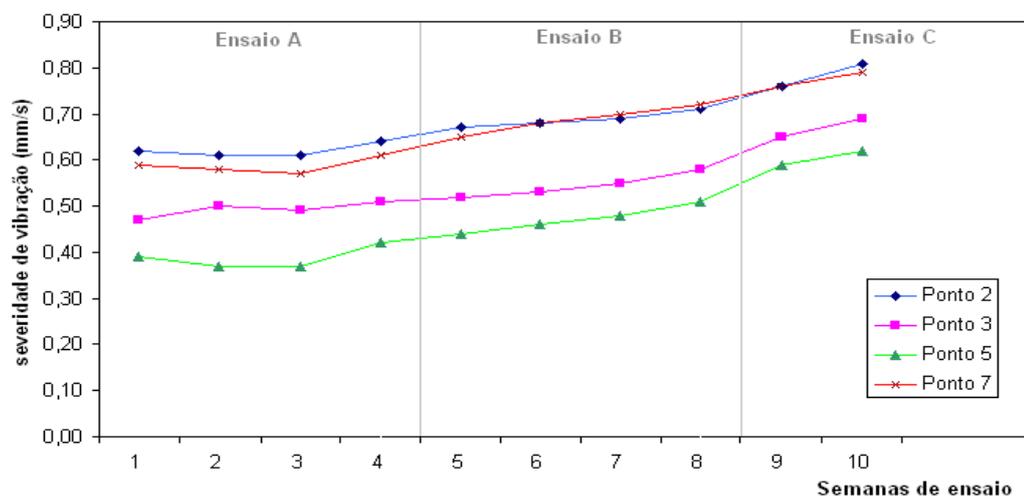


Figura 4.90 – Evolução da severidade de vibração.

C - Freqüências Ressonantes e Demodulação

Foram encontradas freqüências ressonantes nos pontos 2 e 5 do redutor. Estas foram demoduladas quando submetidas a uma freqüência amostral de 10kHz.

Na Figura 4.91, tem-se o ponto 2 com freqüência de corte de 250 e 450Hz. Demodulação feita no sinal amostral de 10 KHz no fim de cada ensaio.

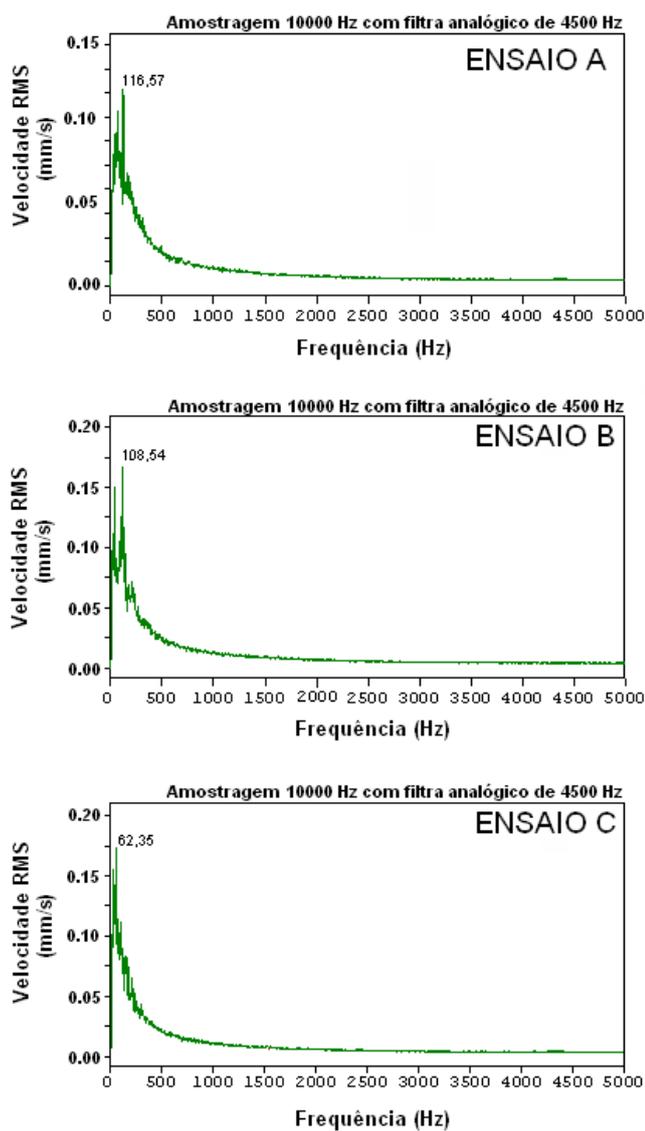


Figura 4.91 –Espectro do sinal demodulado.

Na Figura 4.92, tem-se o ponto 2 com frequência de corte de 3300 e 3800Hz. Demodulação feita no sinal amostral de 10 KHz no fim de cada ensaio.

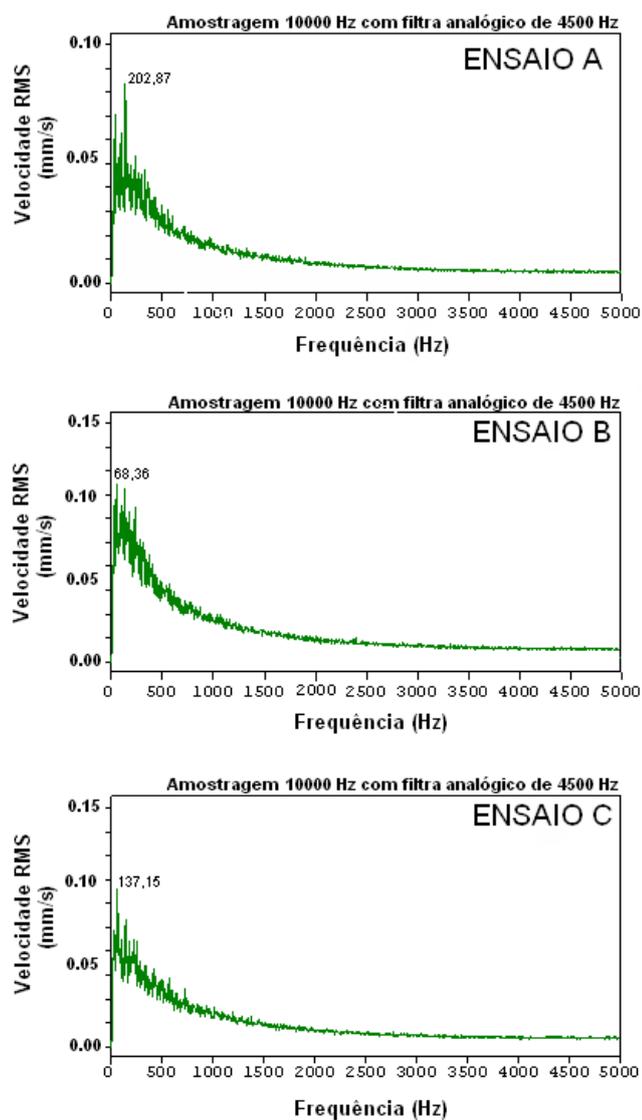


Figura 4.92 – Espectro do sinal demodulado.

Na Figura 4.93, tem-se o ponto 5 com frequência de corte de 2900 e 3300Hz. Demodulação feita no sinal amostral de 10 KHz no fim de cada ensaio.

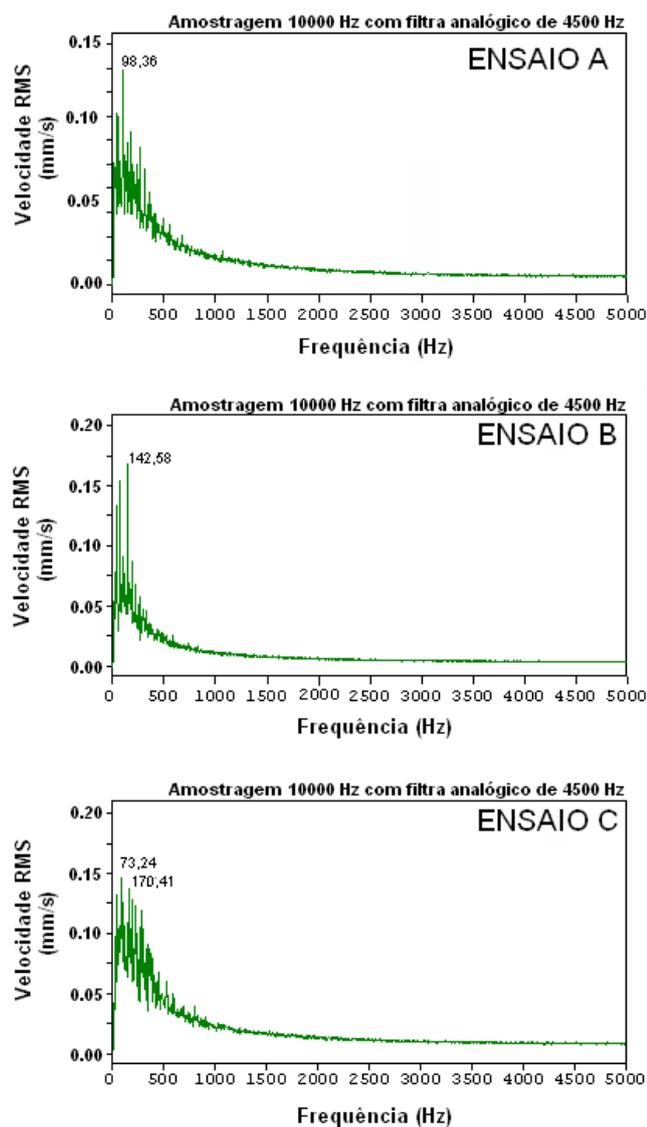


Figura 4.93 – Espectro do sinal demodulado.

Capítulo 5

ANÁLISE DOS RESULTADOS

5.1. ANÁLISE DOS ÓLEOS

Os testes realizados na análise de óleo desde o início nos proporcionaram informações valiosas sobre a operação incorreta do redutor.

Um dos testes mais simples, a contagem de partículas feitas através do monitor automático de partículas PQA, desde a primeira amostra, apontou uma alta geração de partículas magnéticas. Pode-se verificar este fato acompanhando os índices PQ's medidos através das Tabelas 4.8, 4.11 e 4.14. Estes índices começaram em 670 na primeira semana do Ensaio A, abaixaram um pouco no Ensaio B e chegaram a cerca de 20.000 na ultima semana do ensaio C enquanto no experimento anterior este era em torno de 200.

Uma curiosidade verificada nas leituras do índice PQ é que no experimento do óleo acrescido de água, a geração de partículas foi menor do que no óleo sem contaminação. Este fato é bastante estranho, pois esperava-se que o desgaste aumentaria neste caso. A água, ou alguma substância gerada pela reação desta com o óleo ou com as superfícies metálicas, ofereceu ao sistema tribológico um menor desgaste. Podemos verificar este fato comparando as Tabelas 4.8 e 4.11.

Através da Tabela 4.14 verificamos o efeito catastrófico da contaminação por abrasivo (no nosso caso areia).

A absorção atômica realizada ao final de cada ensaio também proporcionou informações importantes sobre a condição tribológica do sistema. Na Tabela 4.7 pode-se verificar grande quantidade de partículas de cobre (provindas da coroa) e de ferro (provindas do sem-fim). Na Tabela 4.10 a presença das partículas de cobre e ferro foi menor, evidenciando mais uma vez o fato da adição de água ter diminuído o desgaste. Na Tabela 4.13 verificamos a presença “catastrófica” de partículas metálicas, inclusive chumbo, cromo e níquel como,

provavelmente, elementos de liga do par engrenado ou dos rolamentos. Um outro dado importante é a presença de silício provindo da contaminação proposital.

Da Tabela 4.9, verificou-se que a presença de água aumentou a viscosidade do óleo, conforme o esperado.

A contagem de partículas pela norma ISO não pode ser realizada pelo alto grau de contaminação dos óleos (partículas metálicas), o que já é um dado de que o sistema estava operando de modo anormal.

Pela visualização das partículas também pode-se verificar a operação incorreta do redutor. Na maioria das fotos pode-se verificar a presença de muitas partículas ferrosas e algumas partículas de cobre. Também encontrou-se muitas partículas de desgaste por atrito (partículas laminares) e partículas de desgaste severo por deslizamento que são partículas com estrias (como por exemplo, as encontradas nas Figuras 4.34 e 4.37).

Na análise microscópica foi verificada a dificuldade em se visualizar partículas em microscópio ótico. Conforme mostrado na Figura 4.15, onde tem-se uma seqüência de fotos tiradas em alturas focais diferentes.

Nas fotos do último ensaio verificou-se a presença de partículas de corte, providas do modo de desgaste abrasivo por três corpos. As lâminas do RPD deste ensaio foram de difícil preparação, pois o óleo formou uma “borra” junto com a areia e metais de desgaste. Nas fotos também verificou-se a grande quantidade de partículas.

A utilização de luz refletida e luz transmitida podem ser verificadas nas Figuras 4.11, 4.23 e 4.30, onde, às vezes, leva-nos a interpretação errônea. Na maioria das fotos foi utilizado uma combinação das duas.

Na Figura 4.41 verificou-se que a adição de água ao óleo causou a oxidação interna da caixa de engrenagem e dos parafusos.

Nas Figuras 4.25, 4.40 e 4.47, têm-se o desgaste progressivo do par coroa sem-fim. Na Figura 4.47 visualiza-se que os elementos estavam a margem de uma falha.

Na Figura 4.48 verifica-se a diferença visual do óleo após os três ensaios.

5.2. ANÁLISE DE VIBRAÇÕES

O tipo de redutor utilizado (coroa sem-fim) é de difícil análise, pois neste caso tem-se um eixo com baixa rotação (0,95 Hz no eixo de saída) e a frequência de engrenamento coincidente com a frequência de giro do eixo (uma vez que o sem-fim é de uma só entrada).

Um aumento da amplitude nesta faixa de frequência e nas suas harmônicas mostra o avanço do desgaste das engrenagens.

Pode-se verificar um aumento dos níveis de vibração tanto nos espectros quanto nos valores da severidade de vibrações pela NBR 10082, principalmente no último ensaio.

Após a desmontagem do redutor verificou-se que os rolamentos do eixo do sem-fim estavam com folga. Segundo a literatura, as folgas nos rolamentos são representadas pela frequência de giro do eixo e suas harmônicas, o que é o mesmo caso do desgaste. Este fato foi difícil de ser verificado por causa da coincidência dessas frequências.

Não foram encontrados defeitos de rolamento nos espectros, devido a falta de carga durante as medições. Na Figura 4.49 podemos observar que não ocorreram defeitos pontuais no rolamento.

Os pontos 2 e 5 apresentaram frequências ressoantes. Os sinais temporais desses pontos foram demodulados e em seguida foram gerados o espectros desses sinais (Figuras 4.91, 4.92 e 4.93). Neste caso também não verificou-se nenhuma frequência de defeito, provavelmente porque essa ressonância é oriunda da carcaça e da má seleção do ponto.

Na Figura 4.90, mostrou-se a evolução da severidade de vibração de acordo com a norma NBR 10082, o que leva a observar que algo de errado estava ocorrendo no redutor.

A vibração causada pela folga do rolamento foi um fato marcante para o grande desgaste ocorrido no último ensaio.

Uma outra falha ocorrida na análise de vibrações foi o fato das medidas terem sido realizadas com a saída do redutor sem carga. Se fosse aplicada uma carga uniforme, as amplitudes de vibrações seriam maiores e ficaria mais fácil a identificação dos problemas.

Destaca-se também que a causa maior de desgaste (a massa desbalanceada colocada para simular uma condição anormal) era retirada durante as coletas dos sinais. Se esta não fosse retirada para as coletas, este desbalanceamento seria verificado desde o início e poderia ser corrigido.

Capítulo 6

CONCLUSÕES E SUGESTÕES

6.1. CONCLUSÕES

Da literatura pode-se concluir que a integração dessas técnicas é a melhor alternativa para uma diminuição dos gastos com manutenção. Neste caso, deve-se utilizar uma das técnicas e, assim que algum problema for detectado, complementar com a utilização da outra técnica, a fim de obter o maior número de informações.

A análise do óleo lubrificante é mais eficaz para se verificar a contaminação por água ou por outros contaminantes e também nos casos de deterioração do lubrificante fazendo uma monitoração do mesmo. Esta também apresenta bons resultados quando a velocidade de rotação é baixa e a análise de vibrações é dificultada. Rolamentos também podem ser monitorados por esta técnica.

A análise de vibrações além de monitorar o redutor poderia monitorar também outras transmissões de movimento deste, como é o caso do alinhamento e desbalanceamento de eixos e o desalinhamento de correias, onde estes, na análise de óleo, poderiam apresentar-se apenas como um aumento do desgaste.

A análise de vibrações também tem a vantagem de que, com o avanço tecnológico dos medidores de vibrações, é possível ter um diagnóstico rápido e preciso do desempenho das máquinas, enquanto a análise de óleo muitas vezes requer tempo para os ensaios.

Dos ensaios, verificou-se a importância de sempre corrigir os defeitos assim que estes são detectados e impedir ao máximo a contaminação do sistema.

Dos experimentos, pode-se concluir também que quando ocorre um evento temporário anormal em um sistema, por exemplo, uma carga extra durante certo tempo, a posterior análise de vibrações poderá não “perceber” esta ocorrência caso não tenha havido um dano permanente; porém, a análise de óleo acusará que houve tal problema durante o funcionamento.

No redutor estudado a análise de óleo teve certa vantagem, pois esta acusou um funcionamento incorreto do redutor desde o início, enquanto a análise de vibrações foi de difícil utilização pelas frequências de giro do eixo e de engrenamento coincidirem.

6.2. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

A partir dos dados apresentados neste trabalho e das verificações feitas durante as etapas deste fica a sugestão da construção de uma bancada experimental para testar redutores constituídos por engrenagens de dentes retos. Neste caso temos alta frequência tanto no eixo de entrada quanto no eixo de saída. Para simular carga no eixo de saída pode-se utilizar um ventilador centrífugo do tipo siroco onde o ar deste é direcionado para resfriar o sistema, tendo em vista que a maior dificuldade para simular uma carga nestes sistemas é por causa da geração de calor de freios, ou então a utilização de bombas que aumentariam a complexibilidade do sistema.

Para esta nova bancada a sugestão seria utilização de pares de engrenamento de outros tipos de materiais, podendo assim também buscar a parceria com algum fabricante de redutores.

Um outro dado que poderia ser levantado seria a geração de calor e consumo de energia com a utilização de diversos tipos de lubrificantes, neste caso a utilização de uma câmera termográfica também forneceria algumas informações importantes.

Capítulo 7

REFERÊNCIAS

ALMEIDA, R. G. T.; PADOVESE, L. R. Detection of oil viscosity variation in a gearbox by vibration analysis. In: CONGRESSO NACIONAL DE ENGENHARIA MECÂNICA, 2, 2002, João Pessoa. **Anais...** João Pessoa: ABCM, 2002. CD-ROM.

ANDERSON, A.; SWEENEY, A.; WILLIAMS G. How to make decisions. In: ____ **Quantitative approaches to decision making**. 9.ed. South Western: College Publishing, 1999. p.666-671.

ARATO JR., A. **Manutenção preditiva usando análise de vibrações**. Barueri: Manole, 2004. 190 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. **NBR 7094**: máquinas elétricas girantes – motores de indução - especificações”, v.3, 2003.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. **NBR 10082**: vibração mecânica de máquinas com velocidades de operação de (600 a 12000) rpm – bases para especificação e padrões de avaliação, 1987.

BARRACLOUGH, T. G.; SPERRING. T. P.; ROYLANCE, B. J.; NOWELL, T., **Generic-based wear debris identification –on the first step towards morphological classification**. In: PROCEEDING OF THE INTERNATIONAL CONFERENCE ON CONDITION MONITORING, 1999, Swansea. **Proceedings...** Oxford: Coxmore Publishing, 1999. p.525-538.

BARONI, T. A. D. ;GOMES, G. F. **A ferrografia como técnica de manutenção preditiva**. Disponível em: <http://www.huno.com.br/tribolab/>. Acesso em: 15 mar. 2004.

BARNES, M., Viscosity-how it is measured and reported. **Practicing Oil Analysis**, Houston, November-december, 2002, p. 46-50.

BIBLIOTECA VIRTUAL DO ESTUDANTE BRASILEIRO - BIBVIRT. **Manutenção Preditiva**. Disponível em: http://www.bibvirt.futuro.usp.br/textos/tem_outros/cursoprofissionalizante/tc2000/manutencao/06manu.pdf>. Acesso em: 20 mar. 2004.

BOOSER, E. R. **CRC handbook of lubrication: theory & design**. Boca Raton: CRC Press, 1984. v.2.

BORIN, A. **Aplicação de quimioterapia e espectroscopia no infravermelho no controle de qualidade de lubrificantes**. 2003. 104 f. Dissertação (Mestrado) – Instituto de Química, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2003.

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. 164 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira, Universidade Estadual Paulista, Ilha Solteira, 2005.

GREEN, A. **The study of the failure modes of a spur gear using vibration an particle analysis techniques**. Melbornel: James Cook University, School of Engineering, 2003.

HUTCHINGS, I. M. **Tribology: friction and wear of engineering materials**. Londres: Edward, 1992.

INTERNATIONAL STANDART ORGANIZATION - ISO 4406. **Hydraulic fluid power – fluids – method for coding the level of contamination by solid particles**. Genève: ISO, 1999. (ISO 4406).

INTERNATIONAL STANDART ORGANIZATION - ISO 11171. **Hydraulic fluid power – calibration of automatic particle counters for liquids**. Genève: ISO, 1999. (ISO 11171).

KARDEK, A.; NASCIF, J.; BARONI, T. **Gestão estratégica e técnicas preditivas**. Rio de Janeiro: Qualitymark, 2002. (Coleção Manutenção – Abramam).

KITTIWAKE - Kittiwake Developments Limited. **Automatic ferrous debris monitor**. Littlehampton: Kittiwake, 2003. (User Manual, MA-K14742-KW).

KITTIWAKE - Kittiwake Developments Limited. **Rotary ferrograph**. Littlehampton: Kittiwake, 2004. (User Manual MA-K14755-KW).

KITTIWAKE - Kittiwake Developments Limited. **Rotary ferrograph**. Littlehampton: Kittiwake, 2004. (Guide to Wear Particles Recognition)

LANTOS, F.; LANTOS, J.; LANTOS, E. An unusual twist to the blotter test - the Lantos Method. **Practicing Oil Analysis Magazine**, Houston, july - august, 2002.

LOCKWOOD, F. E.; DALLEY R. Lubricant analysis. In: HENRY, S. D. et al. (Ed.). **ASM Handbook: friction, lubrication, and wear technology**. Metals Park: The Materials Information Society, 1992. v.18, p.299-312.

LUDEMA, K. **Friction, wear, lubrication: a textbook in tribology**. Boca Raton: CRC Press, 1996.

KATO K.; ADACHI K. Wear mechanisms. In: BHUSHAN, B. (Ed.). **Modern tribology handbook: principles of tribology**. Boca Raton: CRC Press, 2001.

MARU, M. M. **Estudo do desgaste e atrito de um par metálico sob deslizamento lubrificado**. 2003. 254 f. Tese (Doutorado) - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2003.

MARU, M. M.; CASTILHO, R. S.; PADOVESSE, L.R. Study of solid contamination in ball bearing through vibration and wear analyses. **Tribology International**, London,, 40, p. 433-440, 2007.

MOUSA, M. **Monitoring the wear of internal combustion engines, faculty of engineering**. El-Minia University. PN 61111, El-Minia: EGYPT, Industrial Production e Mechanical Technology, 2006.

MYSHKIN, N.K.; KONG, H.; GRIGOIEV, A. Y.; YONN, E. S. The use of color in wear debris analysis. **Wear: An International Journal of Fundamentals**, Amsterdam, v.251, pas 1218-1226, 2001.

NEALE, M. J. **The tribology handbook**. 2ª ed.. Oxford: Butterworth-Heinemann, 1995.

PARKER. **The handbook of hydraulic filtration**. Metamora: Parker, 2000. p 12-19.

PETROBRÁS. **Lubrificantes: fundamentos e aplicações**. Rio de Janeiro: Ed. Petrobrás, 1999.

PROGRAMA DE CERTIFICAÇÃO DE PESSOAL DE MANUTENÇÃO - CPM . **Mecânica de Lubrificação**. 1997, p. 22 - 23.

RAADNUIS, S. Machinery health monitoring through low cost maintenance tribology techniques. **The International Journal of Applied Mechanics and Engineering**, Bangkok, v.8, n.1, p.135-145, 2005.

RABINOWICZ, E. **Friction and wear of materials**. 2ª ed. New York: John Wiley and Sons, 1995.

RABINOWICS E. Wear coefficients – metals. In: PETERSON, M.B.; WINWE, W.O. **Wear control handbook**. New York: ASME, 1980. p.475-506.

SANTOS JUNIOR, J.F. **Monitoramento e avaliação da condição de um sistema propulsor aeronáutico através de técnicas de análise de partículas em óleos lubrificantes**. 2006. 95 f. Dissertação (Mestrado) – Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2006.

SANTOS, T. A.; GOMES, G. F. **Ferrografia controlando o desgaste de máquinas**. São Paulo: Tribolab, 2000. 12p.

SCHAFFEROIL. **Schaefferoil manufacturing company**. “Technical data”. Disponível em: <http://www.schaefferoil.com/data/268.html>>. Acesso em: 12 mar. 2004.

SILVA, D.G. **Detecção de falhas em redutores de velocidade submetido à variação de potência**. 2001. 285 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira, Universidade Estadual Paulista, 2001.

SKF. [Principles of bearing selection and application](http://www.skf.com/skf/productcatalogue/calculation/newcalculationTransformer.jsp?pafurl=iec_catalogue.jsp&lang=en&newlink=&action=Calc6). Disponível em: http://www.skf.com/skf/productcatalogue/calculation/newcalculationTransformer.jsp?pafurl=iec_catalogue.jsp&lang=en&newlink=&action=Calc6, Acesso em: 10 jun. 2004.

STACHOWIAK, G.W.; BATCHELOR, A.W. **Engineering tribology**. 3.ed. New York: Elsevier, 2005.

STOETERAU, R. L. **Apostila de tribologia**. Florianópolis: Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina. p.71 – 92. 2004.

TOMANIK, E. **Modelamento do desgaste por deslizamento em anéis de pistão de motores de combustão interna**. 213 f. Tese (Doutorado) - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2000.

VAHAOJA, P. **Oil analysis in machine diagnostics Faculty of Science**. Oulu: Department of Chemistry, University of Oulu, P.O.Box 3000, FI-90014 University of Oulu, Finland, Department of Mechanical Engineering, University of Oulu, P.O.Box 4200, FI-90014 University of Oulu, Finland Acta Univ. Oul. A 458, 2006.