

CONSULTA
FD-3782
Ed.rev.

OK

Sao Paulo
2003

Dissertação apresentada à Escola Politécnica
da Universidade de São Paulo para obtenção
do Título de Mestre em Engenharia

**AValiação DA CONTAMINAÇÃO EM ÓLEOS LUBRIFICANTES
DE ROLAMENTOS ATRAVÉS DA ANÁLISE DO ÓLEO E DA
ASSINATURA DOS SINAIS DE VIBRAÇÕES**

MARCELLO ATTILIO GRACIA

MARCELLO ATTILIO GRACIA

**AVALIAÇÃO DA CONTAMINAÇÃO EM ÓLEOS LUBRIFICANTES
DE ROLAMENTOS ATRAVÉS DA ANÁLISE DO ÓLEO E DA
ASSINATURA DOS SINAIS DE VIBRAÇÕES**

Dissertação apresentada à Escola Politécnica
da Universidade de São Paulo para obtenção
do Título de Mestre em Engenharia

Área de concentração:
Engenharia Mecânica

Orientador:
Límlson Rodrigues Padovese
Prof. Associado

São Paulo
2003

Este exemplar foi revisado e alterado em relação à versão original, sob responsabilidade única do autor e com a anuência de seu orientador.

São Paulo, 09 de 01 de 2004

Assinatura do autor

Assinatura do orientador

FICHA CATALOGRÁFICA

Gracia, Marcello Atílio
Avaliação da contaminação em óleos lubrificantes de rolamentos através da análise do óleo e da assinatura dos sinais de vibrações / Marcello Atílio Gracia -- São Paulo, 2003.
182 p.
Dissertação (Mestrado) -- Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia de Mecânica.
1. Contaminação (avaliação) 2. Óleos lubrificantes 3. Rolamentos (diagnóstico) 4. Vibrações (análise) I.
Universidade de São Paulo. Escola Politécnica. Departamento de Engenharia de Mecânica II.t

Paulinho da Viola – Interp. Marisa Monte

PARA VERAS MENINAS

Para ver as meninas, e nada mais nos braços”.....

“Hoje eu quero apenas, uma valsa de mil compassos

cobiçado projeto. Muito obrigado, meninas !

A querida Rose e minhas filhas Maria Clara e Marília, que entre tantas outras coisas, abdicando de
minha companhia, contribuíram de maneira fundamental para que eu conseguisse concluir este

AGRADECIMENTOS

Antes de tudo agradeço a mim mesmo. Me parablenizo. Uma meta traçada que tinha que ser atingida. Um objetivo almejado que teve início há cerca de dez anos atrás. Uma escolha que acima de tudo demandou esforços e desprendimentos insuspeáveis, só possíveis de serem avaliados por quem de fato se propôs a enfrentá-los. Investimentos totalmente recompensados pelo saboroso prazer de poder dizer, com inconfundível alegria e auto-orgulho: Deu certo ! Eu consegui ! Eu cheguei lá !

A Deus agradeço por conduzir-me neste caminho, principalmente nos momentos de fraqueza e insegurança, auxiliando a retomar minha serenidade, a minha concentração e a minha força de vontade que tanto me foram úteis ao longo dessa empreitada.

Ao Professor Linsion, por muitas coisas, mas principalmente pela oportunidade concedida e pela confiança depositada em mim e no teor da pesquisa.

Aos colegas do LFS – Laboratório de Fenômenos de Superfície, que me auxiliaram no início e no final deste trabalho, em especial ao Prof. Arnilton Sinator, que me acompanhou desde o início desta empreitada sendo sempre um incentivador constante.

Aos colegas do Ladin – Laboratório de Análises Dinâmicas e Instrumentação da Poli, formado por Rui Gomes, Rodrigo Fujimoto, Elvys Cury, Wilson Carlos, Claudia Serna, Silmara Vicente, Luiz Fernando Rocha e Marcos Imão (PB), em especial ao Rui, por sua importantíssima ajuda e apoio no Matlab além de discussões gerais sobre os sinais de vibrações.

A NSK pela cortesia na cessão dos rolamentos de teste e pelas valiosas informações prestadas pelo Eng. Marcos Campanha.

Ao prof. Dr. Henrique Kahn e sua equipe, do LCT da Eng. de Minas e do Petróleo, pelas importantes orientações para a preparação tanto dos contaminantes sólidos como para as amostras de óleos contaminados.

A Hydac pelas discussões sobre contagem de partículas em óleos.
A Márcia Marti, crítica e incentivadora, agradeço entre outras coisas pelas profundas e proveitosas abordagens sobre lubrificação e seus fenômenos.

Ao amigo Baroni pelas produtivas discussões sobre resíduos de desgaste.
Ao prof. Pedro Stuijys, que com sua morte repentina em junho deste ano, observa de algum outro lugar a conclusão deste trabalho.

A Fundação CAPES pelo parcial suporte financeiro desta pesquisa, através do projeto nº 0136/01-8 PROCAD “Monitoramento e Diagnóstico de Falhas em Sistemas Mecânicos”.
A todas as pessoas que de uma forma ou de outra se envolveram comigo durante todo esse tempo, seja apoiando, sugerindo, criticando, questionando, em fim agradeço sinceramente pelos momentos compartilhados e pelas contribuições recebidas.

Dentro dos campos de desenvolvimento da lubrificação proativa de componentes de máquinas, a possibilidade de detecção antecipada da contaminação de lubrificantes têm ganhado cada vez interesse entre usuários e fabricantes de máquinas. Este trabalho sugere a possibilidade de se avaliar a contaminação de origem física em óleos lubrificantes de mancais de rolamentos lubrificados por banho através de técnicas que correlacionam o grau de contaminação com a assinatura dos sinais de vibração, comparando dados de óleos lubrificantes isentos de partículas com outros contaminados. Para tanto, foram realizadas aquisições simultâneas do nível de contaminação ISO 4406 e dos sinais de vibrações de rolamentos em banhos de óleo limpo e contaminados. Executaram-se comparações do nível de contaminação com o RMS dos sinais em diversas faixas de frequências. São feitas também avaliações envolvendo os efeitos de diversos tamanhos e concentrações de contaminantes nas folgas internas, rugosidades, impactos nas superfícies e avaliação dos resíduos de desgaste encontrados nos óleos. Algumas hipóteses dos mecanismos de contato que podem ocorrer no contato pista-esfera-contaminante são realizadas. O estudo sugere que existe a possibilidade efetiva de se detectar níveis diferenciados de contaminação em óleos através da análise da assinatura de sinais de vibrações.

RESUMO

ABSTRACT

In what concerns the development of proactive lubrication in machine components, there has been an increasing interest, in the last years, in earlier lubricant contamination detection. This work suggests the possibility of evaluating physical contamination of lubricant oils in lubricated rolling bearings, employing techniques that correlate the degree of contamination with the vibration signal signatures and comparing data from lubricants particle-free oils with that from contaminated ones. In order to accomplish this objective, simultaneous acquisition of ISO 4406 contamination level and of bearing vibration signals, in both clean oil baths and contaminated oil baths, were made. The contamination level was compared with the signal RMS in several frequency bands. In addition, this study evaluates the effects of different contamination concentration and particle size in internal bearing clearances as well as those of roughness and impact on surfaces. It also evaluates the wear residues found in the oils. Some hypotheses on the contact mechanisms governing the iteration races-balls-contaminant-lubricant are proposed. The study suggests that there is an effective possibility of detecting oil contamination levels by analyzing the vibration signal signatures.

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS

LISTA DE TABELAS

LISTA DE ABREVIATURAS

LISTA DE SÍMBOLOS

1	INTRODUÇÃO GERAL.....	1
---	-----------------------	---

2	CONTEXTO DO ESTUDO.....	6
---	-------------------------	---

2.1	Introdução.....	6
-----	-----------------	---

2.2	Contaminação, desgaste e perdas tribológicas.....	6
-----	---	---

2.3	Contaminação sólida em óleos lubrificantes.....	7
-----	---	---

2.4	Impactos da contaminação nas vibrações.....	8
-----	---	---

2.5	Objetivos do trabalho.....	8
-----	----------------------------	---

2.5.1	Geral.....	8
-------	------------	---

2.5.2	Específicos.....	8
-------	------------------	---

2.5.3	Justificativas.....	13
-------	---------------------	----

2.6	Organização do trabalho.....	14
-----	------------------------------	----

3 MEDIÇÃO, AVALIAÇÃO E IMPACTO DA CONTAMINAÇÃO EM LUBRIFICANTES.....

3.1	A contaminação nos lubrificantes.....	16
-----	---------------------------------------	----

3.1.1	Tipos e fontes de contaminação.....	17
-------	-------------------------------------	----

3.1.2	Contaminantes sólidos.....	21
-------	----------------------------	----

3.2	Técnicas de avaliação da contaminação e desgaste em óleos lubrificantes.....	24
-----	--	----

3.2.1	Visão geral.....	24
-------	------------------	----

3.2.2 Análises Físico Químicas	26
3.2.3. Contagem de partículas	26
3.2.4 Análise de resíduos de desgaste	33
3.3. Efeitos da contaminação no desempenho dos rolamentos	37
4 PARTÍCULAS NO CONTATO DE LUBRIFICAÇÃO ELASTO	
HIDRODINÂMICO	43
4.1. Introdução	43
4.2 A lubrificação de rolamentos	43
4.3 Regimes de lubrificação	45
4.4. Lubrificação Elasto hidrodinâmica	48
4.5. Espessura de filmes em lubrificação E-H	50
4.6. Partículas no contato de lubrificação E-H	51
4.6.1. Efeitos dos resíduos em contatos de lubrificação E-H	52
4.6.2. Experiências com aparelho ótico de lubrificação E-H	53
4.6.3. Conclusões	55
5 LUBRIFICAÇÃO ATRAVÉS DA ANÁLISE DE VIBRAÇÃO	56
5.1. Técnicas de detecção e monitoramento das condições dos componentes	56
5.2. Avaliação da lubrificação através de vibrações	58
5.2.1. Utilização de emissão acústica na detecção da lubrificação	60
5.2.2. Utilização de acelerometria na detecção da lubrificação	62
5.3. Monitoramento da contaminação em lubrificantes através de vibrações	63

6	METODOLOGIA EXPERIMENTAL	66
	6.1 Bancada de testes	66
	6.2 Principais componentes da bancada.....	70
	6.3. Contaminantes.....	71
	6.4 Oleos lubrificantes e procedimentos de contaminação	79
	6.5. Montagem do conjunto de teste.....	82
	6.6. Cadeia de medidas.....	83
	6.7. Procedimentos de ensaios.....	85
	6.7.1. Início da aquisição de dados	85
	6.7.2. Parâmetros de aquisição	85
	6.7.3. Procedimentos de aquisição.....	90
	6.7.4. Abordagens experimentais.....	92
	6.8. Processamento de sinais	94
	6.9. Avaliação das superfícies após ensaios	96
7	RESULTADOS EXPERIMENTAIS	99
	7.1. 1ª Fase Experimental: Medições de contagem de partículas e de vibrações realizadas em condição de lubrificante isento de contaminante	99
	7.1.1. Resultados das medidas do nível ISO de contaminação pelo contador de partículas	99
	7.1.2. Resultados do RMS da aceleração	102
	7.1.3. Correlação de resultados entre nível ISO de contaminação e vibração	106
	7.1.4. Discussão dos resultados	108
	7.2. 2ª Fase Experimental: Medições de contagem de partículas e de vibrações utilizando óleos com contaminação controlada: tamanho de partícula variável e concentração constante	109
	7.2.1. Resultados das medidas do nível de contaminação pelo contador de partículas	110

ANEXOS

REFERÊNCIAS

9	TRABALHOS FUTUROS.....	170
8	CONCLUSÕES.....	167
	7.6.1. Resultados dos ensaios de ferografia.....	163
	7.6.1. Resultados dos ensaios de espectometria.....	160
	7.6. Resultados das análises de resíduos de desgaste nos óleos.....	159
	7.5.3. Avaliação das superfícies.....	156
	7.5.2. Avaliação das rugosidades superfícies.....	154
	7.5.1. Avaliação das folgas internas.....	154
	7.5. Avaliação das folgas radiais, rugosidades e superfícies.....	153
	7.4.2. Óleos sem contaminantes e com contaminantes entre 75 e 53 µm.....	152
	7.4.1. Óleos sem contaminantes e com contaminantes menores que 20 µm ..	149
	7.4. Fase Experimental: Avaliação do comportamento da taxa de contaminação (g/l) X RMS da aceleração para óleos limpos e contaminados.....	149
	7.3.4. Discussão dos resultados.....	142
	7.3.3. Correlação de resultados entre nível ISO de contaminação e vibração	138
	7.3.2 Resultados do RMS da aceleração.....	128
	partículas.....	125
	7.3.1 Resultados das medidas do nível ISO de contaminação pelo contador de tamanho constante e concentração variável.....	124
	7.3. Fase Experimental: Medições de contagem de partículas e de vibrações utilizando óleos com contaminação controlada: faixa de	
	7.2.4. Discussão dos resultados.....	119
	7.2.3. Correlação entre nível ISO de contaminação e vibração.....	117
	7.2.2. Resultados do RMS da aceleração.....	113

LISTA DE FIGURAS

3	Detalhes da formação da curva da banheira	Figura 1-1
5	Partículas contaminantes do fluido são laminadas dentro das folgas críticas	Figura 1-2
7	Partículas de contaminação encontradas num óleo novo	Figura 2-1
10	Primeiras indicações de problemas em rolamentos	Figura 2-2
11	Diagrama explicativo do fluxo de informações de contaminação através do uso da análise de resíduos do óleo e análise de vibrações	Figura 2-3
17	Porcentagem de causas de falhas de rolamentos	Figura 3-1
18	Porcentagem de componentes danificados por sujeira no lubrificante	Figura 3-2
21	Entalhamento de partícula dura num contato	Figura 3-3
23	Formas das partículas	Figura 3-4
24	Exemplos de contaminação de anel interno e externo de rolamentos com impurezas	Figura 3-5
24	Exemplo de anel externo de rolamento desgastado por partícula abrasiva e endentação por sujeira	Figura 3-6
28	Princípio de funcionamento de um contador de partículas óptico	Figura 3-7
28	Contador de partículas Hydac modelo FCU 2010	Figura 3-8
29	Dados de contagem de partículas plotados num gráfico \log^2	Figura 3-9
37	Exemplos de contaminantes sólidos em lubrificantes vistos por ferrografia	Figura 3-10
39	Fluxo de lubrificante num rolamento de rolos	Figura 3-11
41	Mapeamento de regiões de dano e segura	Figura 3-12
50	Parâmetro de elipticidade em contato de lubrificação E H	Figura 4-1
54	Diagrama esquemático do processo pelo qual materiais cerâmicos frágeis entram em um contato de lubrificação E H	Figura 4-2

60	Pulsos de choque de vibrações da bomba de óleo de um compressor	Figura 5-1
62	Valores de "SEF" em função da película lubrificante	Figura 5-2
64	Valor de vibração X Tempo em função do tamanho do contaminante na graxa	Figura 5-3
65	Valor de vibração X Tipo e tamanho de contaminante	Figura 5-4
67	Esquema da bancada de teste – vista frontal	Figura 6-1
68	Esquema da bancada de teste – vista lateral	Figura 6-2
69	Bancada experimental	Figura 6-3
70	Conjunto mancal-garto e reservatório do banho de óleo	Figura 6-4
71	Detalhe superior da bancada de testes	Figura 6-5
73	Duas das formas cristalinas do SiO ₂ , mostrando as ordenações dos tetraedros Si-O	Figura 6-6
74	Quartzo em lascas e após moagem	Figura 6-7
78	Resultados de análise de partículas de quartzo > 20 µm	Figura 6-8
79	Resultados de análise de partículas de quartzo entre 53 e 75 µm	Figura 6-9
80	Sistema de filtragem do óleo lubrificante	Figura 6-10
85	Cadeia de medidas	Figura 6-11
90	Aquecimento do banho de óleo por termostato	Figura 6-12
91	Registro da contaminação com contador de partículas	Figura 6-13
95	Espectro do sinal com 60 Hz rotação – definição freq. corte	Figura 6-14
97	Folga interna do rolamento	Figura 6-14
98	Rugosidade Média (R _a)	Figura 6-15
102	Gráfico de qtde. de partículas por faixa de tamanho X condição experimental sem contaminante ("sq")	Figura 7-1
103	Gráfico de RMS SI X rotação do eixo – 3 cargas	Figura 7-2
104	Gráfico de RMS AF X rotação do eixo – 3 cargas	Figura 7-3
105	Gráfico de RMS BF X rotação do eixo – 3 cargas	Figura 7-4
107	Gráfico comparativo entre contaminação e vibração – condição "sq"	Figura 7-5

111	Gráfico de qtde. de partículas por faixa de tamanho X condição experimental "3d"	Figura 7-6
112	Gráfico de qtde. de partículas por faixa de tamanho X condição experimental "7d"	Figura 7-7
113	Gráfico de qtde. de partículas por faixa de tamanho X condição experimental "1d"	Figura 7-8
114	Gráficos de RMS SI X rotação do eixo – 3 cargas	Figura 7-9
115	Gráficos de RMS AF X rotação do eixo – 3 cargas	Figura 7-10
116	Gráficos de RMS BF X rotação do eixo – 3 cargas	Figura 7-11
118	Gráfico comparativo entre contaminação e vibração – condições "3d,7d,1d"	Figura 7-12
121	Detalhes da zona descarregada do rolamento	Figura 7-13
122	Partículas menores que a folga e filme lubrificante	Figura 7-14
123	Partículas maiores que a folga e filme lubrificante	Figura 7-15
129	Gráficos de RMS nas três faixas de frequência X rotação do eixo – 3 cargas	Figura 7-16
130	Gráficos de RMS SI X rotação do eixo – Carga de 36,58 kg	Figura 7-17
131	Gráficos de RMS SI X rotação do eixo – Carga de 85,78 kg	Figura 7-18
132	Gráficos de RMS SI X rotação do eixo – Carga de 136,45 kg	Figura 7-19
133	Gráficos de RMS AF X rotação do eixo – Carga de 36,58 kg	Figura 7-20
134	Gráficos de RMS AF X rotação do eixo – Carga de 85,78 kg	Figura 7-21
135	Gráficos de RMS AF X rotação do eixo – Carga de 136,45 kg	Figura 7-22
136	Gráficos de RMS BF X rotação do eixo – Carga de 36,58 kg	Figura 7-23
137	Gráficos de RMS BF X rotação do eixo – Carga de 85,78 kg	Figura 7-24
138	Gráficos de RMS BF X rotação do eixo – Carga de 136,45 kg	Figura 7-25
139	Gráfico comparativo entre contaminação e vibração – carga de 36,58 kg	Figura 7-26
140	Gráfico comparativo entre contaminação e vibração – carga de 85,78 kg	Figura 7-27

141	Gráfico comparativo entre contaminação e vibração – carga de 136,45 kg	Figura 7-28
144	Possível mecanismo ocasionado por partículas de quartzo	Figura 7-29
147	Gráfico comparativo entre contaminação e vibração – condições “1a, 1b, 1c”	Figura 7-30
148	Gráfico comparativo entre contaminação e vibração – condições “1d, 1e, 1f”	Figura 7-31
151	Gráficos de RMS SI, AF, BF X rotação do eixo – 3 cargas com óleo limpo - < 20 µm	Figura 7-32
153	Gráficos de RMS SI, AF, BF X rotação do eixo – 3 cargas com óleo limpo – 75 a 53 µm	Figura 7-33
157	Fotos de esferas dos rolamentos	Figura 7-34
162	Gráfico de metais por espectrometria – condições “sc”a “2g”	Figura 7-35
162	Gráfico de metais por espectrometria – condições “sc”a “7g”	Figura 7-36

39	Fontes de contaminantes em diversas situações	Tabela 3-1
41	Efeitos dos contaminantes por ação do meio	Tabela 3-2
43	Problemas de desgaste comumente relacionados a	Tabela 3-3
	lubrificantes e óleos hidráulicos	
44	Forma das partículas	Tabela 3-4
52	Alocação dos números da escala	Tabela 3-5
55	Norma NAS 1638	Tabela 3-6
56	Correlação entre níveis de limpeza	Tabela 3-7
71	Sumário dos cinco principais regimes de lubrificação com	Tabela 4-1
	espessuras típicas de filme e coeficientes de atrito	
57	Aplicação de controles e técnicas no acompanhamento de	Tabela 5-1
	tipos de falhas e componentes	
76	Sequência de malhas de peneiras para classificação	Tabela 6-1
	granulométrica do pó de quartzo	
77	Resultados da análise granulométrica do quartzo pulverizado	Tabela 6-2
81	Descrição das amostras de óleo utilizado nos experimentos	Tabela 6-3
86	Parâmetros experimentais	Tabela 6-4
88	Parâmetros para cálculo da espessura do filme de óleo	Tabela 6-5
89	Valores teóricos calculados de espessura de filme lubrificante	Tabela 6-6
	para cada condição experimental	
101	Dados de aquisição para óleo sem contaminante	Tabela 7-1
110	Dados de aquisição para óleo com contaminante – condição	Tabela 7-2
	“3d”	
111	Dados de aquisição para óleo com contaminante – condição	Tabela 7-3
	“7d”	
112	Dados de aquisição para óleo com contaminante – condição	Tabela 7-4
	“1d”	
120	Comportamento das partículas ao longo dos registros	Tabela 7-5
125	Dados de aquisição para óleo com contaminante – condição	Tabela 7-6
	“1a”	

LISTA DE TABELAS

126	Dados de aquisição para óleo com contaminante – condição “1b”	Tabela 7-7
126	Dados de aquisição para óleo com contaminante – condição “1c”	Tabela 7-8
127	Dados de aquisição para óleo com contaminante – condição “1d”	Tabela 7-9
127	Dados de aquisição para óleo com contaminante - condição “1e”	Tabela 7-10
128	Dados de aquisição para óleo com contaminante – condição “1f”	Tabela 7-11
143	Comportamento das partículas ao longo dos registros	Tabela 7-12
166	Valores de folga interna radial e nível de ruído	Tabela 7-13
167	Valores médios de rugosidade medidos após ensaios	Tabela 7-14
168	Novos cálculos de λ e regimes de lubrificação	Tabela 7-15
170	Micro fotos das esteras e pistas do rolamento	Tabela 7-16
173	Valores dos metais em ensaios de espectrometria no óleo	Tabela 7-17
177	Principais fotos dos ferrogramas das condições “2g” e “7g”	Tabela 7-18

LISTA DE ABREVIATURAS

Ladin	Eng. Mecânica – Poli - USP	
	Laboratório de Análises Dinâmicas e Instrumentação –	
RMS	“Root Mean Square” ou Raiz Quadrática da Média	mm/s ²
	Equivalente a 0,707 x valor de pico (sinal senoidal)	
E-H	Elasto – Hidrodinâmica (o)	
ISO	Organização Internacional de Padronização	
R _a	Rugosidade Média	µm
FVA	Conselho de Pesquisa Alemão para a Tecnologia de	
	Acionamentos	
ASTM	Sociedade Americana de Testes de Materiais	
NSK	Nippon Seiko K.K. – Fabricante de rolamentos japones	
SKF	Svenska Kuggelaggar Fabriken – Fabricante de	
	rolamentos sueco	
ABEC	Comité Anual de Engenheiros de Rolamentos (USA)	
E A	Emissão Acústica	
SEE	Energia Espectral Emitida – Tecnologia exclusiva e	
	patenteada pela SKF	
EFSD	Distribuição Padrão de Igual Espaçamento de Freqüência	
LCT	Laboratório de Caracterização Tecnológica – Eng. de	
	Minas e Petróleo – Poli – USP	
LFS	Laboratório de Fenômenos de Superfície – Eng.	
	Mecânica – Poli - USP	
I.V.	Índice de Viscosidade	
s q	Cond. Exper. sem contaminante (contaminação natural	
	do óleo)	
3 d	Cond. Exper. com partículas de quartzo entre 38 e 32 µm,	
	concentração de 1,0 g/l	
7 d	Cond. Exper. com partículas de quartzo entre 75 e 53 µm,	
	concentração de 1,0 g/l	
1 d	Cond. Exper. com partículas de quartzo entre 105 e 75	
	µm, concentração de 1,0 g/l	

-	1 a	Cond. Exper.com partículas de quartzo entre 105 e 75 µm, concentração de 0,010 g/l
-	1 b	Cond. Exper.com partículas de quartzo entre 105 e 75 µm, concentração de 0,020 g/l
-	1 c	Cond. Exper.com partículas de quartzo entre 105 e 75 µm, concentração de 0,10 g/l
-	1 d	Cond. Exper.com partículas de quartzo entre 105 e 75 µm, concentração de 1,0 g/l
-	1 e	Cond. Exper.com partículas de quartzo entre 105 e 75 µm, concentração de 2,0 g/l
-	1 f	Cond. Exper.com partículas de quartzo entre 105 e 75 µm, concentração de 5,0 g/l
-	2 c	Cond. Exper.com partículas de quartzo menores que 20 µm, concentração de 0,10 g/l
-	2 d	Cond. Exper.com partículas de quartzo menores que 20 µm, concentração de 1,0 g/l
-	2 f	Cond. Exper.com partículas de quartzo menores que 20 µm, concentração de 5,0 g/l
-	2 g	Cond. Exper.com partículas de quartzo menores que 20 µm, concentração de 10,0 g/l
-	7 c	Cond. Exper.com partículas de quartzo entre 75 e 53 µm, concentração de 0,10 g/l
-	7 d	Cond. Exper.com partículas de quartzo entre 75 e 53 µm, concentração de 1,0 g/l
-	7 f	Cond. Exper.com partículas de quartzo entre 75 e 53 µm, concentração de 5,0 g/l
-	7 g	Cond. Exper.com partículas de quartzo entre 75 e 53 µm, concentração de 10,0 g/l
-	N.A.	Não Aplicável
-	RMS SI	RMS do Sinal Inteiro

RMS AF RMS de Alta Frequência -
RMS BF RMS de Baixa Frequência -
V_{BF} Valor Eficaz -

LISTA DE SÍMBOLOS

β_x	Classificação β_x de um filtro: n.o de partículas maiores que x microns antes do filtro / n.o de partículas maiores que x microns depois do filtro	
λ	Relação entre espessura de filme lubrificante e rugosidade superficial dos corpos em contato	
μm	Mícron	10^{-6} m
X	Nº de partículas > 5 μm	-
Y	Nº de partículas > 15 μm	-
D_L	Densidade de partículas > 5 μm	D_R / ml
D_S	Densidade de partículas < 5 μm	D_R / ml
L_{10}	Vida nominal dos rolamentos com 90 % de confiabilidade	hs ou revoluções
h_0	Espessura mínima do filme lubrificante	μm
σ_c	RMS composta das duas superfícies em contato	μm
Z_1, σ_A	Rugosidade da superfície 1, A	μm
Z_2, σ_B	Rugosidade da superfície 2, B	μm
k	Parâmetro de elipticidade	-
D_y	Diâmetro do contato elíptico na direção y, transversal	μm
D_x	Diâmetro do contato elíptico na direção x, do movimento	μm
H	Espessura de filme adimensional	-
U	Parâmetro adimensional de velocidade	-
W	Parâmetro adimensional de carga	-
G	Parâmetro adimensional de materiais	-
H_{min}	Espessura mínima do filme lubrificante E-H duro	μm
C	Capacidade de Carga Dinâmica do rolamento	N
P	Carga Dinâmica que atua sobre o rolamento	N
d_i	Diâmetro da pista Interna do rolamento	mm
d_o	Diâmetro da pista Externa do rolamento	mm
d	Diâmetro da Esfera	mm
R_i	Raio Interno do furo do rolamento	mm
R_o	Raio Externo do furo do rolamento	mm

β	Ângulo de Contato		$^{\circ}$
Δb	rms de acabamento da superfície das esferas		μm
Δa	rms de acabamento da superfície das pistas		μm
E	Módulo Elasticidade Pista-Esfera		N/m^2
ν	Relação de Poisson Pista-Esfera		-
η_0	Viscosidade Dinâmica do lubrificante		$\text{N}\cdot\text{s}/\text{m}^2$
ν_0	Coefficiente Pressão-Viscosidade do lubrificante		m^2/N
Fr	Carga Radial sobre o rolamento		N
β_I	Velocidade Angular Pista Interna		rad/s
β_o	Velocidade Angular Pista Externa		rad/s
h_I mm	Espessura mínima do filme lubrificante: Conjunção Esfera-Pista-Interna		μm
h_o mm	Espessura mínima do filme lubrificante: Conjunção Esfera-Pista-Externa		μm

I INTRODUÇÃO GERAL

“...Eu fico com a pureza da resposta das crianças,
É a vida, é bonita e é bonita
Viver e não ter a vergonha de ser feliz,
Cantar e cantar e cantar
A beleza de ser um eterno aprendiz
Eu sei, que a vida devia ser bem melhor e será
Mas isso não impede que eu repita
“É bonita, é bonita e é bonita”
O QUE É O QUE É
Música e interpretar de : Gonzaguinha

O acionamento confiável de componentes de precisão como rolamentos vem há muito tempo sendo objeto de estudo e pesquisa por fabricantes e usuários. Ioannides et al. (1989) e Ioannides et al. (1993) reportam que melhorias nos métodos de produção e mais particularmente, na redução das inclusões nos aços dos rolamentos, além de melhorias de projeto, fabricação e programas de qualidade assegurada, aumentaram o desempenho e a confiabilidade dos rolamentos. Em uso, entretanto, modernos rolamentos podem perder as vantagens dessas melhorias através de danos que atingiam a superfícies das pistas ou dos corpos rolantes. Ou seja, rolamentos ainda falham devido a mecanismos envolvendo fenômenos de superfície. Hutchings (1992) cita entre eles o *pitting*, a fadiga de início de superfície e vários modos de desgaste que envolvem defeitos na superfície original dos componentes, relacionados tanto a lubrificação inadequada, contaminação por partículas abrasivas, ou ainda devido a resíduos de desgaste.

Neste texto, o termo *pitting* ou *pits* será sempre referenciado como um tipo de desgaste caracterizado pela presença de cavidades na superfície formada por processos como fadiga, adesão local ou cavitação (ASM Handbook, 1992).

Ioannides, Jacobson (1989) relatam que a cerca de 40 anos atrás, os ensaios com rolamentos de esferas eram realizados através da lubrificação a graxa, tornando-se difícil eliminar-se dos rolamentos as partes desprendidas pelo desgaste e pelas contaminações.

Há cerca de dez anos, critérios anteriormente ignorados como lubrificação e condições de contaminação do lubrificante, passaram a ser considerados fundamentais na expectativa de vida de rolamentos.

Práticas de controle da contaminação de lubrificantes podem ser incorporadas a diversas fases da lubrificação industrial, desde a aquisição e transporte dos lubrificantes, o correto armazenamento e aplicação inicial no ponto, passa por rigorosos controles de relubrificação isentos de contaminantes, até os procedimentos de troca de óleo e monitoramento da lubrificação. Entre as práticas existentes capazes de manter sob controle a contaminação dos óleos lubrificantes, podemos citar a instalação adequada de filtros absolutos para lubrificantes com elevada taxa de retenção (aqueles com menos relação $\beta_x \geq 75$ e baixa micragem) e um adequado programa de monitoramento da contaminação e desgaste dos lubrificantes.

A contaminação esta diretamente relacionada com a expectativa de vida de uma máquina. Wolk (1991) apresenta a chamada curva da banheira, aplicada ao ciclo de vida de um equipamento, onde registra três fases distintas, chamadas de mortalidade infantil, operação normal e fase de obsolescência.

Correlação similar faz Stulgys (2001), que apresenta um outro modelo de curva da banheira, mostrada na figura I-1. Na figura, percebe-se que a região da curva chamada de **amaciamento**, a qual corresponde a seta localizada no lado esquerdo inferior, é aquela caracterizada por falhas prematuras, que atacam componentes fracos, e que são oriundas de defeitos de fabricação e montagem e que ocorrem durante a posta em marcha de equipamentos. Observa-se pelo gráfico que essa taxa de falhas é inicialmente elevada e depois passa a ser decrescente. Como consequência natural, as falhas devido a **sujeiras, impurezas e contaminações diversas encontradas nos lubrificantes** costumam se manifestar nessa fase.

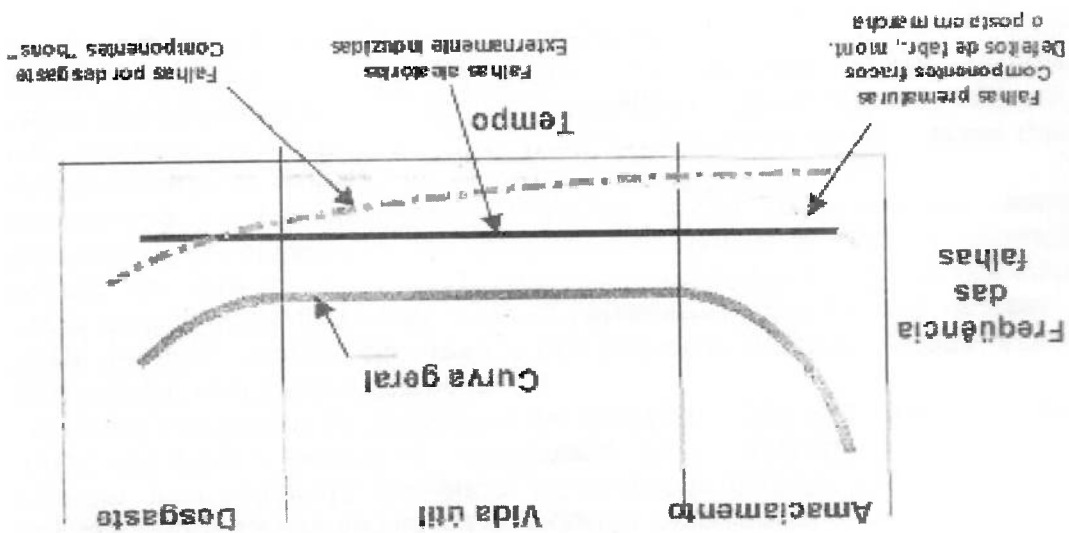


Figura 1-1 Detalhes da formação da curva da banheira (Stulgys, 2001)

O estudo aqui apresentado envolverá a utilização de duas técnicas preditivas ligadas a lubrificação e a contaminação de lubrificantes, que são a análise de óleos usados, (ênfase em ensaios de contagem de partículas e análise de resíduos de desgaste) e a análise de vibrações de rolamentos, principalmente através de medições comparativas dos valores de RMS da aceleração.

É sabido que contaminantes físicos podem, dependendo de suas características, tamanhos e quantidade, modificar as condições de lubrificação, tanto degradando propriedades físico-químicas dos lubrificantes, como na forma de partículas abrasivas, potencializar processos de desgaste.

Em consulta realizada a usuários de lubrificantes, fabricantes de lubrificantes e filtros, tribologistas, profissionais de análises preditivas por análises de óleo e vibrações e finalmente a pesquisadores acadêmicos, a unanimidade das respostas revelou ser forte a suposição que a contaminação de origem sólida tendia a incrementar o nível de vibração de rolamentos em banho de óleo. Referência bibliográfica consultada, envolvendo contaminação sólida em graxas, (Komya, 1992) registrou que de fato níveis de ruído e de vibração de rolamentos são alterados quando são introduzidos contaminantes sólidos nos lubrificantes.

Nesse contexto, surgem questões que pretendemos investigar e discutir neste trabalho, tais como:

- A contaminação em óleos de rolamentos intensifica ou atenua a assinatura do sinal de vibrações de rolamentos?
- O nível de contaminação de óleos medidos pela norma ISO 4406 têm alguma relação com o nível de vibração medido?
- O tamanho e a concentração das partículas de contaminação influenciam numa eventual correlação contaminação-vibrações?
- O tempo de operação contínua de um rolamento e as condições de agitação do banho têm influência nos sinais de vibração com óleos contaminados ?
- Partículas de contaminação em condição de lubrificação Elasto-Hidrodinâmica (que neste texto quando citada será abreviada como E-H) podem amortecer vibrações mecânicas de rolamentos?
- Contaminantes no óleo em curto espaço de operação modificam a superfície de trabalho dos componentes dos rolamentos ?
- Técnicas de análise de resíduos de desgaste presentes em óleos podem descrever o comportamento de contaminantes em contatos lubrificados?
- As duas técnicas utilizadas podem ter a mesma efetividade na detecção de problemas do contaminação numa fase primária ?

A figura 1-2 procura ilustrar o momento em que contaminantes sólidos entram em contato com a superfície de trabalho dos rolamentos. Através de condições experimentais previamente fixadas, presume-se que partículas contaminantes quando em contato com a zona de carga sejam esmagadas e/ou laminadas. Esse comportamento será estudado para um determinado tipo de contaminante, variando-se seu tamanho e concentração. Registros da contaminação através da norma ISO 4406 serão realizados. Sinais de vibrações dos rolamentos serão simultaneamente registrados e posteriormente comparados, inicialmente com a contaminação e posteriormente com sinais de óleos limpos. Pretende-se observar e discutir comparativamente os resultados, tanto do comportamento da contaminação como de sua influência nos sinais de vibrações.

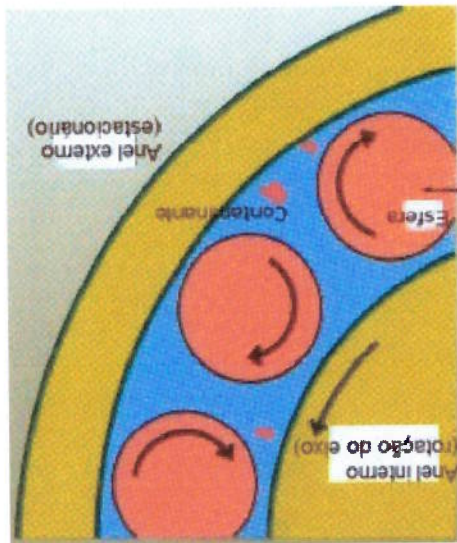


Figura 1-2 Partículas contaminantes do fluido são laminadas dentro das folgas
 críticas (Vickers, 1996) * adaptado e traduzido pelo autor

O trabalho em si possui algumas limitações práticas e experimentais que fazem com que alguns pontos sejam impossíveis de serem avaliados. A principal delas é que sendo rolamentos componentes de geometria precisa e comportamento dinâmico complexos, não há como se avaliar o que realmente acontece com partículas contaminantes na região de carga do rolamento. Vários fenômenos podem ocorrer de forma isolada ou conjunta. Não há como precisar se partículas se alojam no interior da espessura do filme lubrificante, se são moídas e em seguidas laminadas na zona de carga, ou se ainda se movimentam aleatoriamente entre as esferas, pistas e gaiolas na região oposta, que se mantém descartada. Algumas dessas possibilidades serão abordadas e discutidas ao longo do trabalho.

A partir de resultados experimentais que retratam algumas dessas condições, pretende-se discutir os resultados obtidos dentro de abordagens práticas e teóricas, sugerindo prováveis hipóteses que tenham ocorrido nos fenômenos e nos resultados que foram observados.

A questão da contaminação física do lubrificante e seus impactos na lubrificação e nas vibrações dos rolamentos será portanto a principal vertente deste trabalho.

2 CONTEXTO DO ESTUDO

2.1. Introdução

Para um bom entendimento da leitura, apresentamos um contexto inicial para conhecimento do escopo do trabalho e quais pontos que serão abordados. Neste capítulo falaremos brevemente sobre impactos da contaminação na triboologia, com ênfase para a contaminação de origem sólida, correlações entre contaminação, desgaste e vibrações além dos objetivos e justificativas do estudo.

2.2. Contaminação, desgaste e perdas tribológicas

Bloch (2000) relata que a contaminação de sistemas circulatórios de óleo é responsável por significativos números e tipos diferentes de falhas em máquinas. Allen (1989) *apud* Bloch (2000) reporta a viabilidade de operações de *flushing*¹ em turbinas a gás documentadas em escala mundial por plantas químicas, as quais têm mantido em serviço 22000 galões de óleo americanos por mais de dez anos, sem substituição da carga por nenhuma planta. O *flushing*¹ inicial numa posta em marcha de um equipamento considerado crítico é considerado um método completo, seguro e essencial para aumentar a disponibilidade global dos equipamentos.

A questão da contaminação têm forte vínculo com problemas tribológicos, entre eles a lubrificação. Segundo Ball (1998), dados relatados da Fundação para Estratégia da Indústria indicam que os custos anuais de manutenção na Austrália eram cerca de 30 a 50 % maiores que os das empresas europeias e japonesas, e 15 % superiores aos das Norte Americanas. Esses custos poderiam ser diretamente relacionados com desgaste e reposição de peças, mas também com a perda de produção e paradas não programadas. Durante a metade dos anos 80, esses custos foram cautelosamente estimados na Austrália como sendo cerca de 6 % do Produto Interno Bruto, ao passo que para o ano 2000 estimava-se que boas práticas tribológicas (entre elas o controle da contaminação) poderiam economizar cerca de 3 bilhões de dólares em um ano.

¹ *flushing*: operação de lavagem de sistema no interior de tubulações, com fluido a elevadas velocidades, com N.º Reynolds > 4000), conforme norma NFPA/T2.9.9, 1979

2.3. Contaminação sólida em óleos lubrificantes

Vickers (1996) aponta quatro fontes primárias de contaminação sólida em

lubrificantes:

- Contaminação do óleo novo, verificada através da foto mostrada na figura 2-1;

- Contaminação remanescente da construção e montagem ;

- Ingresso de contaminantes no sistema;

- Contaminação gerada internamente pela máquina.

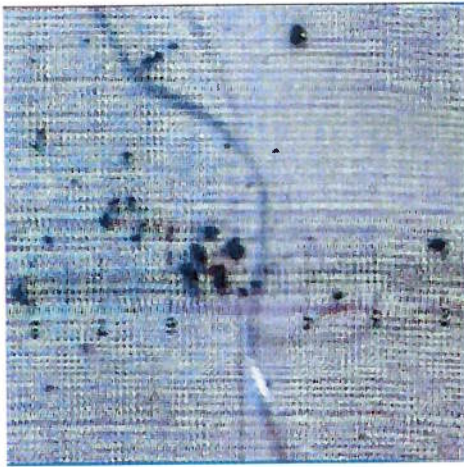


Figura 2-1 Partículas de contaminação encontradas num óleo novo: aumento de

100 X (Vickers, 1996)

A publicação explica que se fluidos novos forem mantidos em condições

razoáveis de armazenamento, os principais contaminantes presentes serão metais,

silica e fibras. Amostras de óleos sem uso tomadas de embalagens de fornecedores

de marca apresentaram níveis de contaminação ISO 4406 (1987) igual a 17/16/14,

que dependendo da aplicação podem dar início imediato a processos de desgaste em

componentes sensíveis. A codificação ISO, que costuma ser reportada pelo ensaio de

Contagem de Partículas, será melhor explicada no item 3.2.3..

Vickers (1996) também relata que contaminantes são encontrados em várias

formas e tamanhos, e são constituídos por uma larga variedade de materiais. A

maioria são abrasivos, uma vez que quando interagem com as superfícies, eles

riscam e cortam fragmentos de superfícies críticas de componentes.

A questão da contaminação sólida em lubrificantes será melhor discutida no

item 3.1.

2.4. Impactos da contaminação nas vibrações

Poucas correlações entre presença de contaminantes em contatos lubrificadores e impactos nas vibrações dos rolamentos são encontradas na literatura. Hutchings (1992) escreve que sempre que superfícies se movem umas contra as outras, em detrimento ao desgaste outros fenômenos podem ocorrer nos contatos. Ele cita aumento de folgas entre componentes em movimento, graus de liberdade indesejáveis e perda de precisão, vibração frequente, aumento de carregamentos mecânicos e desgaste ainda mais rápido, além do que em algumas vezes falha por fadiga.

Um resumo do material bibliográfico pesquisado será apresentado através da revisão bibliográfica realizada no item 5.2.

2.5 Objetivos do trabalho

Os objetivos do trabalho são classificados em duas categorias:

2.5.1 Geral

O objetivo deste projeto de mestrado é o de se avaliar a contaminação de origem física em óleos lubrificantes de rolamentos e seus impactos na assinatura dos sinais de vibração .

2.5.2.Específicos

Constituem objetivos específicos do trabalho:

- Investigar correlações entre nível de contaminação ISO 4406 de um óleo lubrificante com os sinais globais de vibração dos rolamentos;
- Estudar e avaliar se existem limitações na correlação entre esses dois métodos de análise;
- Investigar se os sinais de vibrações de um rolamento lubrificado em banho de óleo com contaminação conhecida variam com o tempo de operação contínua do componente nesse meio;
- Avaliar se existem metodologias que permitam uma confiável e eficiente correlação entre os dois métodos, a partir de parâmetros pré fixados;
- Investigar se para condições de contaminação conhecida, carga e rotação modificam as vibrações dos rolamentos;

- Através de análise comparativa, observar se informações de contaminação e sinais de vibrações podem ser associados a alterações na folga interna, rugosidade, marcas superficiais e presença de resíduos de desgaste no óleo;
- Discutir a efetividade da detecção de condições de operação anormais em rolamentos operando em óleos lubrificantes contaminados, fazendo uso da técnica de análise de vibrações e da técnica de análise de resíduos de desgaste;

A questão de qual das técnicas representa maior efetividade na detecção de falhas de componentes ainda envolve certa polémica no meio da manutenção preditiva. Garvey (2001) em seu artigo expõe um pouco de sua experiência em programas de monitoramento preditivo utilizando os conceitos de RCM (manutenção centrada em confiabilidade). O autor coloca que a análise de vibração tem oferecido maior efetividade para tipos de máquinas mais complexos como compressores de ar centrífugos e a parafuso, “blowers”, caixas de engrenagem com múltiplos estágios, motores de corrente alternada e contínua, turbo-geradores e máquinas ferramentas. Por outro lado, o autor registra que equipamentos como compressores de ar, motores a diesel e de combustão interna, prensas e bombas hidráulicas a pistão, não poderiam ainda ser adequadamente monitoradas apenas por análise de vibrações. A análise de óleo teria detectado certos problemas com algumas máquinas anteriormente ao surgimento de um alarme por vibrações, principalmente em caixas de engrenagens de múltiplos estágios, mancais de deslizamento, compressores de parafuso, sopradores e alguns mancais de rolamento.

O autor faz interessante correlação entre os diagnósticos mais frequentes detectados por análise de vibrações e correlaciona os quatro estágios de falha dominantes em rolamentos (Charlotte, 1996 *apud* Garvey, 2001) e suas eventuais correlações com resíduos de desgaste observados por técnicas de ferrografia (Berry, 1999 *apud* Garvey, 2001). A figura 2-2 registra aquele que seria o estágio inicial de falha em um rolamento.

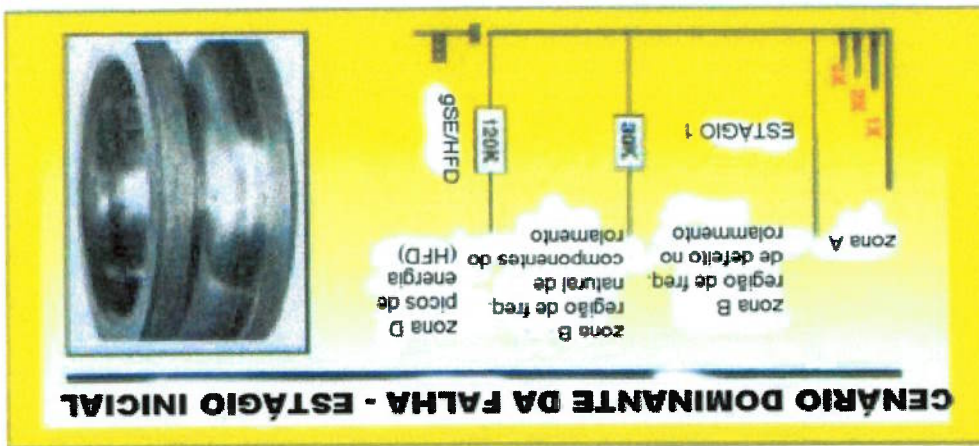


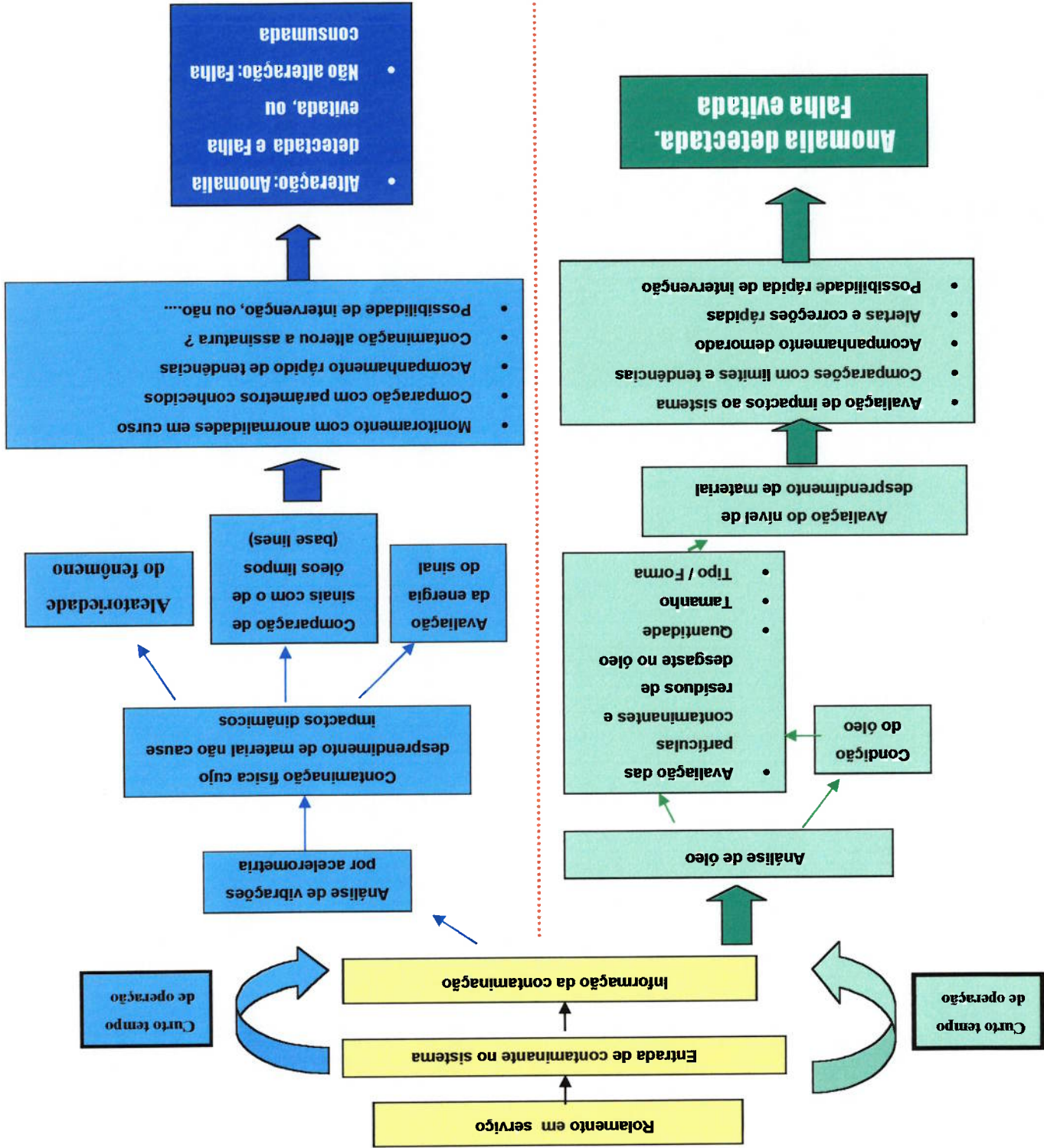
Figura 2-2 Primeiras indicações de problemas em rolamentos (Charlotte 1996 *apud* Garvey, 2001) * adaptado e traduzido pelo autor

O autor registra também as seguintes colocações:

- “Quando as duas técnicas estão “amarradas” dentro do mesmo programa de monitoramento, as fraquezas de uma técnica podem ser compensadas pelo fortalecimento da outra”;
- “Quando ambas as técnicas detectam o mesmo problema, a diagnose e as recomendações seguintes são raramente imprecisas”;
- “Um programa combinado das técnicas torna-se mais efetivo que as somas das efetividades das técnicas de formas isoladas”.

O diagrama da figura 2-3 sugere como se manifesta a relação entre a presença de contaminantes em lubrificantes e possíveis impactos no desempenho dos rolamentos, partindo-se da premissa que as duas técnicas preditivas estariam disponíveis (análise de óleo e análise de vibrações), e que o tempo de utilização do componente na condição contaminada foi pequeno.

Figura 2-3: Diagrama explicativo do fluxo de informações de contaminação através do uso de análise de resíduos do óleo e análise de vibrações



O diagrama da figura 2-3 sugere duas formas de como a contaminação em óleos lubrificantes de rolamentos pode ser investigada.

O diagrama considera um rolamento em serviço operando numa condição inicial, com curto tempo de operação. Supondo-se que haja entrada de contaminantes no sistema a informação da contaminação poderia ser detectada através de análise de óleo. Isto geralmente se faz através da tomada de uma amostra do óleo lubrificante. Laboratórios portáteis ou especializados podem ser utilizados, conforme a necessidade e a criticidade. No laboratório, além de serem checadadas as principais características físicas e químicas do óleo, serão investigados os resíduos de desgaste presentes no óleo, avaliando se esse contaminante têm tamanho, quantidade e morfologia potenciais para provocar uma anomalia na condição do componente

Supondo-se uma situação onde o contaminante está presente mas ainda não ocasionou um desprendimento expressivo de material do rolamento. É razoável supor que a ferramenta análise de resíduos de desgaste irá identificar e quantificar adequadamente a contaminação, sendo eficaz para diagnosticar uma eventual alteração na condição do contato contaminante-rolamento. Isto é, a análise de óleo diz que o óleo está sujo, informa com precisão o tipo e o tamanho da sujeira, informa a magnitude dos resíduos de desgaste do rolamento que já foram gerados e é capaz de oferecer dados para uma tomada de ação preventiva rápida antes que esse contaminante seja o causador de uma falha catastrófica no rolamento. Resultado da metodologia conduziria para a detecção da anomalia e não ocorrência da falha.

Veamos agora o mesmo monitoramento fazendo uso da acelerometria através da análise de vibrações. Mesmo com pequeno tempo de operação a ferramenta é capaz de monitorar dinamicamente o rolamento e registrar rapidamente a assinatura de seus sinais de vibrações. Supondo que existam históricos disponíveis do rolamento operando em condições de óleo lubrificante limpo, pode se fazer por comparação, uma avaliação precisa das características do sinal. A contaminação do lubrificante poderia ser assim identificada e juntamente com todas as outras avaliações possíveis, seria possível detectar com razoável precisão uma situação anormal de contaminação e até monitorá-la por algum tempo, predizendo com alguma antecedência o momento provável da alteração da condição do contato lubrificado.

Entretanto, se a contaminação não alterasse de forma expressiva a assinatura dos sinais de vibração, a possibilidade de intervenção ficaria prejudicada e a anormalidade presente no lubrificante fatalmente conduziria o componente para uma falha catastrófica.

Ao decorrer do trabalho veremos de que forma essa contaminação afeta a assinatura dos sinais de vibrações e a formação dos resíduos de desgaste.

2.5.3. Justificativas

A primeira justificativa deste trabalho é de caráter pessoal, pois reflete um pouco da vivência e experiência do pesquisador na área de lubrificantes, lubrificação e monitoramento preditivo de componentes industriais, na qual atua há 13 anos.

Sabe-se que normalmente a detecção de problemas de contaminação em

lubrificantes é demorada, pois em geral, demanda metodologia e procedimentos específicos para coleta, envio e análises de óleo em laboratórios, diagnose e emissão de laudos nem sempre conclusivos. Anon (1987) registra que nos Estados Unidos, custos podem variar desde U\$ 7,00 por amostra para algumas análises de óleos de motor, até mais de U\$ 100,00 por amostra para alguns extensos programas aplicados em óleos hidráulicos. O tempo envolvendo envio de amostra e realização de testes costuma variar entre 3 e 10 dias. Há situações onde esse intervalo é extremamente elevado, principalmente em máquinas críticas e sensíveis, onde muitas vezes quando esse tipo de problema é diagnosticado, a degradação do fluido, os desgastes de componentes e falhas catastróficas já estão em curso, inviabilizando de certo modo a eficiência na tomada de ações corretivas.

Isto faz com que algumas vezes investimentos preditivos em análise de óleos se tornam inviáveis, pois não conseguem ser amortizados e justificados em curto espaço de tempo.

Inexiste hoje no mercado uma ferramenta que consiga apurar com confiabilidade e a tempo real, simultaneamente a contaminação de um lubrificante e seu grau de comprometimento dinâmico ao componente. Uma eventual correlação de análises envolvendo a contaminação de lubrificantes com a técnica de análise de vibrações seria preciosa e serviria como base para a tomada de decisões mais confiáveis.

Sabendo-se que o desempenho dos óleos lubrificantes em serviço é fortemente influenciado por contaminações diversas, o trabalho tentará avaliar e identificar eventuais correlações com vibrações que se manifestem devido a presença maior ou menos contaminação física no óleo.

Além disso, o trabalho conta com um caráter de ineditismo tecnológico, visto que até o momento não existem registros efetivos de trabalhos envolvendo a correlação e a interação precisa destas técnicas preditivas.

Sabe-se que adoção de estratégias de detecção antecipada de contaminantes na lubrificação de componentes têm sido valorizadas pela indústria. A possibilidade do desenvolvimento de uma metodologia eficiente de correlação entre informações de contaminação de lubrificantes e a respectiva análise de sinais de vibrações adquire assim caráter inovador.

2.6. Organização do trabalho

A ideia do trabalho foi de se realizar uma revisão profunda de tópicos envolvendo contaminação, lubrificação de rolamentos e técnicas preditivas de detecção de contaminação em óleos, com ênfase em análise de óleo e de vibrações para em seguida, de posse dos resultados da parte prática, tentar se buscar referências que pudessem ter correlação com os fenômenos observados.

Dessa forma, o primeiro capítulo, como foi visto, tratou de introduzir resumidamente o tema.

Este capítulo, denominado “Contexto do estudo”, pretende situar e abordar rapidamente os tópicos gerais da pesquisa, tratando a respeito dos impactos tribológicos da contaminação no meio industrial, rolamentos em condição E-H, exemplos de contaminação sólida em lubrificantes, além de descrever os objetivos do trabalho e suas justificativas.

O capítulo 3 abordará especificamente a contaminação nos lubrificantes e as técnicas utilizadas para medir e avaliar essa contaminação.

O capítulo 4 se destina a abordar o comportamento de partículas em contatos elasto-hidrodinâmicos.

O capítulo 5 abordará uma revisão de literatura direcionada para a utilização de técnicas que utilizem vibração para diagnosticar anormalidades de lubrificação e contaminação.

O capítulo 6 refere-se a toda a parte experimental do trabalho, abordando os detalhes da metodologia utilizada, desde o preparo dos materiais, os procedimentos de ensaios, registros e aquisições, a cadeia de medidas além do processamento dos sinais.

Dando continuidade ao texto, o capítulo 7 foi destinado a mostrar e discutir os resultados experimentais e os principais gráficos e tabelas relativas à parte experimental.

No capítulo 8 serão resumidas as principais conclusões obtidas no trabalho.

Por fim o capítulo 9 se destina a sugerir outros pontos da pesquisa que possam vir a ser abordados em uma futura continuidade do presente trabalho.

3 MEDIÇÃO, AVALIAÇÃO E IMPACTO DA CONTAMINAÇÃO EM LUBRIFICANTES

Esta capítulo visa dar uma visão geral de vários conceitos relacionados com a contaminação de lubrificantes e suas influências, métodos de medição da contaminação e avaliação dos resíduos de desgaste através de análise de óleos usados. Finalmente será abordado como a contaminação afeta o desempenho nos rolamentos.

3.1. A contaminação nos lubrificantes

Contaminantes podem ser partículas sólidas, líquidos, ou gases de qualquer tipo que causam mudanças químicas ou físicas nos sistemas. Godfrey; Herguth (1996) definiram contaminante como qualquer material não originário do óleo novo, ou que é gerado dentro do sistema ou nele ingressa.

Segundo Godfrey (1989), estima-se que cerca de 70 a 85 % das falhas e problemas de desgaste em máquinas lubrificadas são causadas pela contaminação nos óleos. Contaminantes diminuem a vida das máquinas, especialmente aquelas com acabamentos e folgas apertadas e que operam a elevadas velocidades e temperaturas. A manutenção de óleos limpos agrega os seguintes benefícios:

- Estende a vida da máquina;
- Aumenta a confiabilidade e a produtividade;
- Diminui custos de manutenção;
- Aumenta a vida do óleo;
- Permite a utilização de óleos de menor viscosidade.

Em função do objetivo da pesquisa, nos próximos tópicos será dada maior ênfase aos impactos da contaminação dos lubrificantes em componentes por meio sólido e abrasivo.

3.1.1. Tipos e fontes de contaminação

Glantz (1992) fornece dados interessantes sobre a contaminação existente em lubrificantes para rolamentos e caixas de engrenagens. Em uma investigação entre as empresas que fazem parte do conselho de pesquisa alemão (FVA) para a tecnologia de acionamentos, foi mostrado que 90 % das companhias participantes atribuíam a problemas tribológicos as causas de falhas em seus mancais. Esta investigação foi concentrada em redutores industriais lubrificadas por sistema de circulação ou banho de óleo. O gráfico da figura 3-1 apresenta os resultados da investigação.

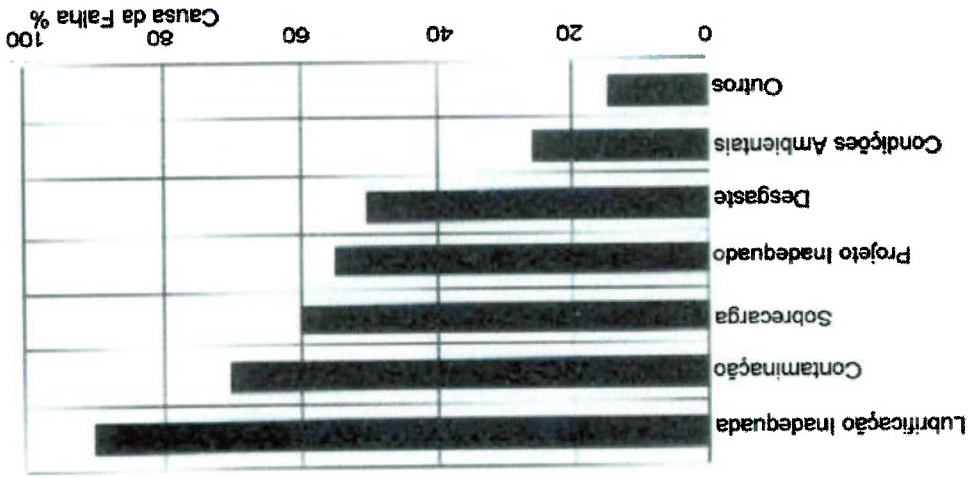
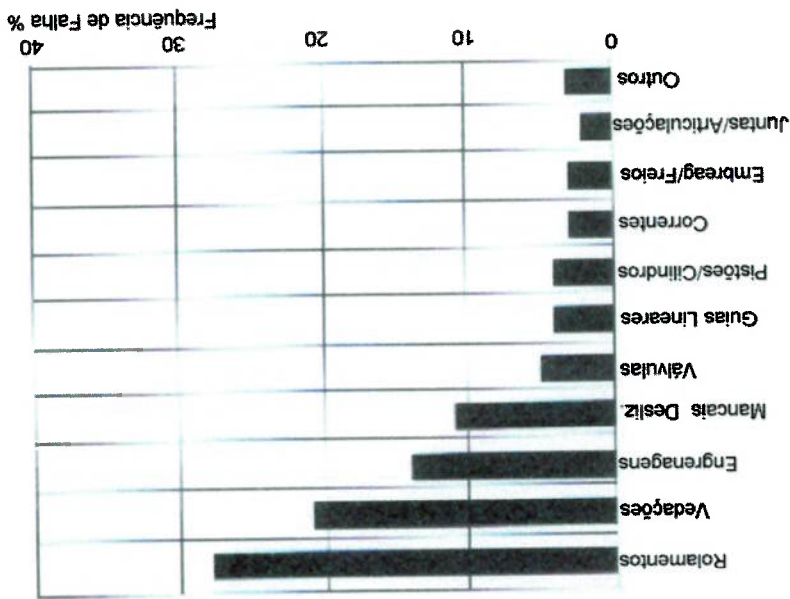


Figura 3-1 Porcentagem de causas de falhas de rolamentos (Glantz, 1992) * adaptado e traduzido pelo autor

Em 70 % dos casos, as causas da falha dos rolamentos foi atribuída ao ingresso de sujeira. A mesma investigação mostrou que rolamentos foram os componentes mais frequentemente danificados pela contaminação do lubrificante, com cerca de 28% dos casos.

A figura 3-2 apresenta graficamente esses resultados.

Figura 3-2 Porcentagem de componentes danificados por sujeira no lubrificante (Glantz, 1992) * adaptado e traduzido pelo autor



Glantz (1992) coloca que em geral, as fontes de contaminação de rolamentos podem ser divididas em três grupos:

1. Contaminantes primários, os quais são originados dos processos de fabricação e montagem, assim como do enchimento inicial com óleo lubrificante novo. A água é um contaminante primário cuja presença em óleos lubrificantes pode diminuir a vida dos rolamentos a abaixo de 1 % ou menos, dependendo da quantidade presente;
2. Contaminantes secundários, partículas produzidas durante os amaciamentos, que se desprendem durante a posta em marcha, partículas que são introduzidas ao lubrificante durante as manutenções, assim como produtos de oxidação resultantes do envelhecimento do lubrificante;
3. Contaminantes externos, os quais adentram através dos orifícios dos respingos inadequadamente dimensionados ou por vedações danificadas, como também durante reparos executados inadequadamente.

Segundo ele, para uma completa análise dos contaminantes em sistemas lubrificadas, devem ser determinados:

Também a respeito de contaminantes gerados durante a operação de componentes, encontra-se em Parker (1998), que os mesmos seriam gerados por seis diferentes modos de desgaste, ou seja, desgaste abrasivo, por cavitação, por fadiga, erosivo, adesivo e corrosivo.

Godfrey (1989) sugere através da tabela 3-1 as principais fontes de contaminação encontradas em ambientes industriais:

Tabela 3-1: Fontes de contaminantes em diversas situações

(Godfrey, 1989) * adaptado e traduzido pelo autor

FONTES DE CONTAMINANTES EM		
ÓLEO SEM USO	MAQUINAS NOVAS E REPARADAS	MAQUINAS EM OPERAÇÃO
<ul style="list-style-type: none"> . Fabricação do óleo . Finos de catalise, debris de containers, fibras . Manuseio . Sujeira de limpeza e estocagem mal realizada . Containers . Contaminados . Agua de containers abertos . Adição de óleo errado 	<ul style="list-style-type: none"> . Resíduos de fundição . Restos de soldas . Escamas e areia . Produtos de corrosão . Fibras . Resíduos de usinagem . Restos de abrasivos . Cavacos . Restos de vidro . Solventes . Agua 	<ul style="list-style-type: none"> . Gerados . Fragmentos de desgaste . Produtos de corrosão . Partículas de borracha . Fragmentos de plásticos . Produtos de oxidação do óleo . Produtos de hidrólise dos aditivos . Introduzidos . Sujeira . Agua, fluidos refrigerantes, combustível . Contaminantes do óleo novo . Processamentos químicos

O autor também cita que partículas metálicas e principalmente os ions ferro e cobre são catalizadores da oxidação dos óleos, sendo que seus ácidos orgânicos corrompem metais e formam lodos e vernizes.

No mesmo artigo, Godfrey (1989) descreve três tipos de contaminantes e seus efeitos nos lubrificantes líquidos, conforme tabela 3-2.

Tabela 3-2 - Efeitos dos contaminantes por ação de meio (Godfrey, 1989)
 * adaptado e traduzido pelo autor

EFEITOS DOS CONTAMINANTES POR		
Meio Sólido	Meio Líquido	Meio Gasoso
<ul style="list-style-type: none"> . Partículas duras, maiores que 3 µm . Desgaste abrasivo, severo, . adesivo, "scuffing", fadiga de contato . Aumento do atrito; . Quebra do filme de óleo 	<ul style="list-style-type: none"> . Fadiga de contato . Corrosão . Quebra do filme de óleo . Redução da viscosidade . Promove oxidação do óleo . Formação de borra . Degradação de aditivos . Incompatibilidade de óleos 	<ul style="list-style-type: none"> . Aeração . Espuma . Cavitação . Corrosão . Aumento da compressibilidade . Quebra do filme de óleo . Promove oxidação do óleo
<ul style="list-style-type: none"> . Partículas moles, menores que 3 µm . Formação de borra e ferrugem; . Redução do fluxo de óleo; . Desgaste por polimento; . Quebra do filme de óleo; . Aumento do atrito; . Promovem oxidação do óleo; . Provocam retenção de ácidos. 		

Da tabela 3-2 o autor destaca os efeitos representados pelos contaminantes sólidos, inicialmente os representados tanto por partículas duras, como a areia, compostos de retífica, metais e óxidos metálicos, cujo tamanho sendo maior que a espessura do filme lubrificante causa desgaste abrasivo a três corpos, onde a ação de corte produzirá fragmentos metálicos perigosos.

Partículas metálicas podem atravessar folgas, aumentando a adesão entre metais levando ao *scuffing* e a falhas catastróficas. Partículas duras também endentam e se entalham nas superfícies dos rolamentos, criando picos de tensão, trincas e deslocamentos, diminuindo a vida a fadiga, conforme figura 3-3. Neste texto, o termo *scuffing* quando citado deverá ser interpretado como uma forma de desgaste adesivo que produz riscos superficiais ou um alto polimento das superfícies em contato (Metals Handbook, 1985).

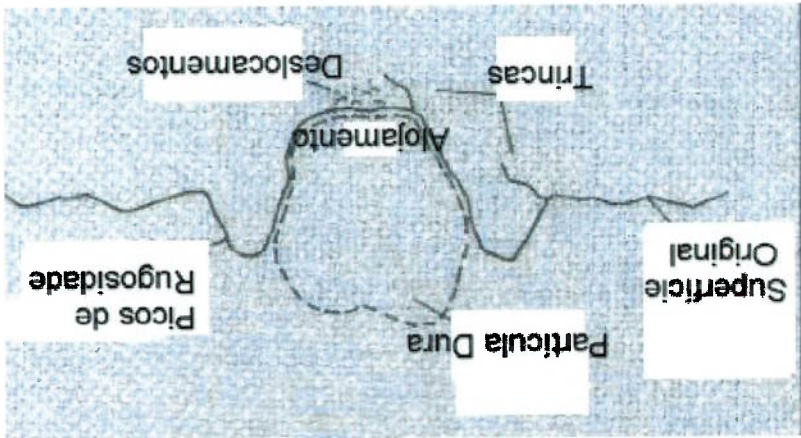


Figura 3-3 Entalhamento de partícula dura num contato

(Nedleman 1980 *apud* Godfrey 1989) * adaptado e traduzido pelo autor

Partículas pequenas e menos duras também provocam desgaste, principalmente na presença de agentes ácidos corrosivos, presentes em alguns óleos usados, podendo causar polimento.

3.1.2. Contaminantes sólidos

A influência negativa dos contaminantes sólidos nos componentes de máquinas é conhecida. Existem diversas referências que relacionam confiabilidade e longa vida a boas práticas de manutenção de lubrificantes sempre limpos e secos. Por óleo lubrificante seco entende-se um óleo que avaliado pelo método de Karl Fischer (ASTM D 1744) apresenta no máximo 300 ppm de água dissolvida. Certamente a pior consequência da contaminação sólida nos lubrificantes é o desgaste.

Em uma das referências consultadas, Godfrey (1987) faz pequeno histórico de autores que se dedicaram a definir os modelos clássicos de modo de desgaste.

Ele apresenta uma tabela bastante completa onde correlaciona os diversos modos de desgaste com sua definição, partes suscetíveis das máquinas onde ocorrem, condições operacionais para a ocorrência do desgaste, aspectos das superfícies a olho nu, aspectos microscópicos, detecção através de análise de óleo e aspectos relativos a como prevenir a ocorrência dos mesmos, abordando mudanças mecânicas e do lubrificante.

Os principais modos de desgaste são citados na tabela 3-3.

Tabela 3-3 Problemas de desgaste comumente relacionados a lubrificantes e óleos hidráulicos (Godfrey, 1987)
* adaptado e traduzido pelo autor

Modo de desgaste	Componentes	Modo de desgaste	Componentes
Adesão moderada	Todos	Corrosão	Todos os rolamentos, paredes de cilindros, engrenagens, vedações
Adesão severa	Anéis de pistão, mancais de rolamento e deslizamento, engrenagens, ferramentas de corte, vedações, correntes	Corrosão por "Fretting"	Máquinas vibradoras, contatos de alojamento de mancais, parafusos
Abrasão	Todas as superfícies em movimento relativo	Eletrocorrosão	Válvulas hidráulicas de aviões, bombas e motores hidráulicos
Erosão	Mancais de deslizamento, válvulas	Descargas elétricas	Rolamentos em altas velocidades, máquinas rotativas como compressores, atomizadores
Polinamento	Furos de cilindros de motores, engrenagens	Danos por cavitação	Partes hidráulicas, bombas, válvulas, dentes de engrenagens, cilindros e anéis de pistão
Fadiga de contato	Mancais de rolamento e deslizamento, engrenagens		

Outra referência importante sobre a presença de contaminantes sólidos em rolamentos é encontrada em Ville (1998), que estudou efeitos da endentação e fadiga de superfície por eles provocados. Hunt (1993) *apud* Ville (1998) sugere a divisão em sete classes de partículas sólidas encontradas em lubrificantes, cujos tamanhos variam de 1 até no máximo 2 µm. Elas são mostradas na figura 3-4 e definidas na tabela 3-4, designadas pelos números das classes, sendo a classe 1 referente a figura ao alto e a classe 7, referente a figura inferior do conjunto:

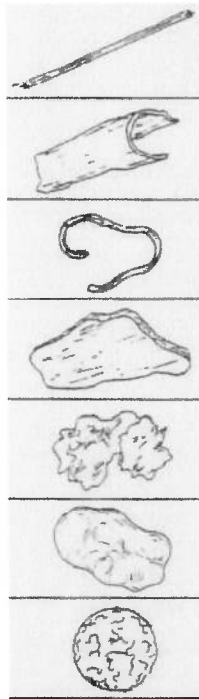


Figura 3-4: Forma das partículas (Hunt 1993 *apud* Ville 1998)

* adaptado e traduzido pelo autor

Tabela 3-4: Nome e origem das partículas (Hunt 1993 *apud* Ville 1998)

Classe	Forma	Origem
1	Esteras	Aglomeração e fusão de resíduos metálicos de desgaste
2	Partículas lisas deformadas e ovaladas (galets)	Pós introduzidos do exterior
3	Pedagos grandes empedrados	Partículas metálicas, produzidas pela fadiga de superfície
4	Plaquetas e cascas	Partículas metálicas produzidas devido a rotação ou do desgaste normal
5	Anéis, tiras e lamelas	Partículas produzidas da usinagem ou por trabalhos da superfície
6	Rolos	Partículas na forma de tiras ou cascas
7	Cordões e fibras	Partículas não metálicas em geral geradas de uma atmosfera poluída

Partículas sólidas visualizadas pelo método de ferrografia serão mostradas no

item 3.2.4.2.

Retiradas de NSK (2001) e SKF (1988), são mostradas em seguida duas fotografias, apresentadas nas figuras 3-5 e 3-6, típicas de componentes de rolamentos danificados por impurezas sólidas.

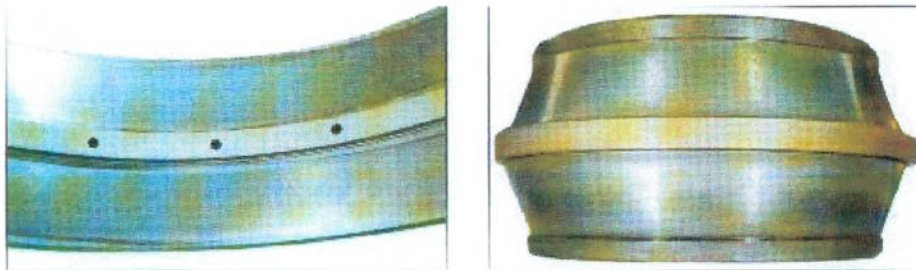


Figura 3-5 Exemplos de contaminação de anel interno e anel externo de rolamentos com impurezas sólidas (NSK, 2001)

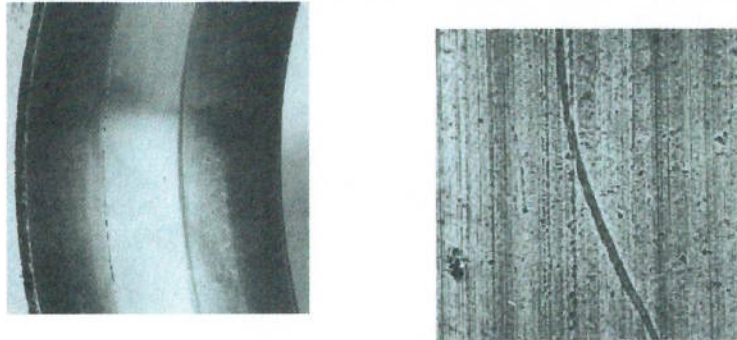


Figura 3-6 Exemplo de anel externo de rolamento desgastado por partícula abrasiva(esq.) e endentação por sujeira(dir.)(SKF,1988)

3.2 Técnicas de avaliação da contaminação e desgaste em óleos lubrificantes

A seguir serão abordadas algumas técnicas mais utilizadas para a avaliação da contaminação em óleos lubrificantes.

3.2.1 Visão geral

Scott (1970) descreve em seu artigo que falhas tribológicas associadas a rolamentos envolvem na maioria das vezes elevados custos e paradas de produção imprevisíveis, acarretando elevadas perdas operacionais. Faz extensa descrição de métodos usados na investigação de componentes falhados, citando a inspeção visual, avaliação de detalhes construtivos além de técnicas mais refinadas, como avaliação por microscópio ótico e interferometria, além de testes de microdureza, micrografia, avaliação dos contaminantes e de espessuras de filmes lubrificantes.

Também relata que a contaminação no lubrificante por material estranho pode indicar manutenção em filtros. Sugere que em casos onde a espectrometria não se justifica, a simples colocação de bujões magnéticos nos drenos das máquinas podem indicar a existência de mecanismos de desgaste. Por fim, registra que o desempenho de mancais pode vir a ser facilmente detectável por temperatura, vibrações e registros acústicos, no entanto simples alertas precisam ser rapidamente investigados para que não se transformem em manutenções corretivas de emergência.

Será apresentado a seguir uma breve revisão de técnicas usuais de análise de óleos que foram utilizados na parte experimental do trabalho: análises físico-químicas, contagem de partículas, e avaliação dos resíduos de desgaste, através das técnicas de espectrometria e ferrografia.

Lockwood, Dalley (1992) colocam que a análise de óleo e das partículas de desgaste para a determinação da condição do lubrificante compreende tanto a inspeção física como o exame químico dos resíduos de desgaste, dos contaminantes e dos produtos de reação dos lubrificantes para motores, fluidos hidráulicos, fluidos de corte, graxas e em fluidos sinuiais de seres humanos e animais. Uma vez que o desgaste é uma inevitável e antecipada consequência do contato superficial entre partes de máquinas que interagem como eixos, mancais, engrenagens e buchas em sistemas adequadamente lubrificados, a análise das partículas de óleo e de resíduos de desgaste podem potencialmente ser aplicadas para todos os equipamentos lubrificados.

Os autores colocam que os mais comuns testes físicos que são solicitados em conjunto com a espectrometria e a análise de metais de desgaste são a avaliação da viscosidade, do número de acidez total e a determinação do teor de água. Métodos ASTM são normalmente utilizados nesses ensaios, sendo comum utilizar a ASTM D 445 para viscosidade, a ASTM D 974 ou 664 para a acidez e a ASTM D 1744 para determinação de baixas concentrações de água pelo método de Karl Fischer.

Anon (1987) faz importantes considerações sobre critérios a serem adotados em programas periódicos de monitoramento por análise de óleos usados. Entre eles podemos destacar, coletas periódicas, tempos rápidos para a chegada e análise da amostra pelo laboratório, coleta de óleo se possível com a máquina em funcionamento, identificação correta da amostra, método e ponto de coleta

padronizados, purga e limpeza prévia do ponto de coleta ou utilização de bomba sugadora com mangueira plástica, rasco com limpeza certificada, informações detalhadas da aplicação, envio de óleo novo para comparação, seleção adequada dos ensaios na amostra, correta diagnose e interpretação dos resultados, se possível utilizando dados estatísticos, limites e tendências.

3.2.2 Análises Físico Químicas

Wiseman; Ah-Sue (1992) reportam em seu artigo a utilização do espectro de infravermelho como ferramenta confiável para detectar a degradação de lubrificantes e a presença de contaminantes não metálicos, através da comparação com espectros de óleos lubrificantes novos, recurso esse bastante usual na indústria.

Sasaki et all (1989) elaboraram artigo a respeito da identificação de contaminantes em óleos hidráulicos de injetoras fazendo-se uso de ensaios comparativos dos espectros infravermelhos dos lubrificantes.

Runge; Duarte (1989) e Carreiro, Moura (1998) tecem explicações sobre diversos ensaios físico químicos disponíveis para a avaliação tanto de óleos lubrificantes novos (sem uso), como para produtos em uso e especiais. Informam sugestões de seqüências de ensaios em lubrificantes em serviço a serem utilizados no monitoramento de alguns componentes encontrados em equipamentos industriais.

Em relação a identificação de contaminação sólida, também o teste de insolúveis em n-heptano em membrana (ABNT P-MB 325, ASTM D 4055) costuma ser bastante utilizado para indicar o percentual em peso de materiais insolúveis que possam ser separados facilmente por misturas de óleo e solvente através de centrifugação.

3.2.3. Contagem de partículas

Lockwood, Dalley (1992) descrevem que o ensaio de contagem de partículas é largamente utilizado para monitorar sistemas hidráulicos, onde partículas de desgaste maiores que 10 µm são de principal interesse. Relatam que esse ensaio é mais adequado quando mecanismos de fadiga são os modos de falha primários, ou quando partículas contaminantes causam abrasão. Este cenário, onde a relação entre espessura do filme lubrificante e a rugosidade da superfície excede

aproximadamente 1, é passível de ser evitado pelo monitoramento por contagem de partículas ou detecção de partículas por plugs magnéticos.

A questão da avaliação da contaminação em óleos lubrificantes é descrita por Yamaguchi et al. (2002), que registra a existência de dois padrões para o registro da limpeza em lubrificantes. O primeiro, baseada na contagem de partículas, segue as normas NAS 1638, ISO 4406, SAE AS4059 e JIS B9930, pode informar o número de partículas em certas faixas de tamanho. O outro método, chamada de análise gravimétrica, segue as normas ASTM D 4898 e JIS B9931, mede o peso bruto do contaminante em um certa quantidade de fluido. No entanto, em ambas as técnicas não se consegue saber com exatidão quais são esses contaminantes. Em função dos produtos de oxidação de contaminantes serem de tamanho molecular, e portanto de difícil avaliação pelos métodos tradicionais, os autores desenvolveram uma técnica de investigação da cor de contaminantes coletados através de membranas de filtros. Através da utilização de “scanner” de alta resolução e feixes de luzes sobre as membranas, mapearam em coordenadas cartesianas os contaminantes contidos nas membranas em função das cores fundamentais vermelho, verde e azul. Após técnicas de lavagem com solventes, concluíram que a cor marrom que permanecia nas membranas indicava a presença de produtos de oxidação.

Eleftherakis; Shelton; Long (1995) registram em seu artigo que a remoção completa de partículas sólidas de óleos hidráulicos ou de laboratório é extremamente difícil de ser obtida. Apesar de que em muitas aplicações a isenção total de contaminantes não ser uma necessidade, a maioria dos sistemas não têm ou têm insuficiente controle sobre a contaminação. A inspeção visual de frascos de amostra contra a luz não pode oferecer uma medida real da contaminação. Mesmo porque a visão humana é incapaz de distinguir partículas menores que 40 µm de tamanho. Colocam também que processos manuais para a contagem microscópica de contaminantes apesar de básicos, são demorados e suscetíveis a erros de medição.

Por isso, foram introduzidos os contadores automáticos de partículas, que são instrumentos dotados de sensores óticos que fazem cruzar através do óleo feixes de luz branca ou laser. Um sensor posicionado no lado oposto ao fluxo do fluido, registra a intensidade da variação da luz que colidem com as diferentes partículas que passam através dela. Um fator crítico no uso e aplicação de qualquer resultado de

contagem de partículas é a certeza que o contador esteja consistentemente calibrado, de modo reproduzível, sendo reconhecido pela norma ISO 4402. Além disso, a presença de água ou espuma na amostra podem comprometer a leitura dos resultados. A figura 3-7, retirada de Stulgys (1998), ilustra o princípio de funcionamento de um contador de partículas que opera com sensor óptico de escurecimento.

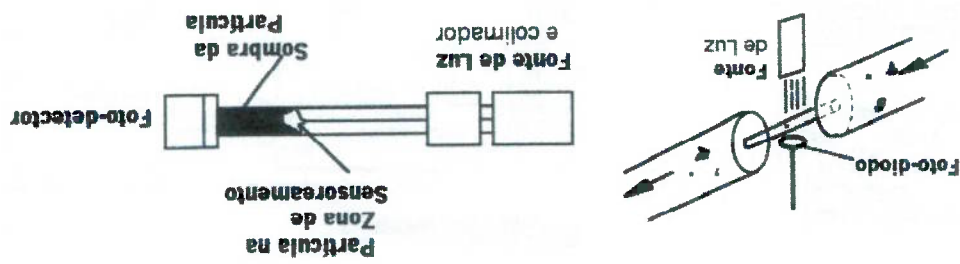


Figura 3-7: Princípio de funcionamento de um contador de partículas óptico

(Stulgys, 1998)

A figura 3-8 ilustra um contador de partículas automático que funciona pelo método a laser, e que foi utilizado em algumas das aquisições experimentais durante a parte prática deste trabalho.

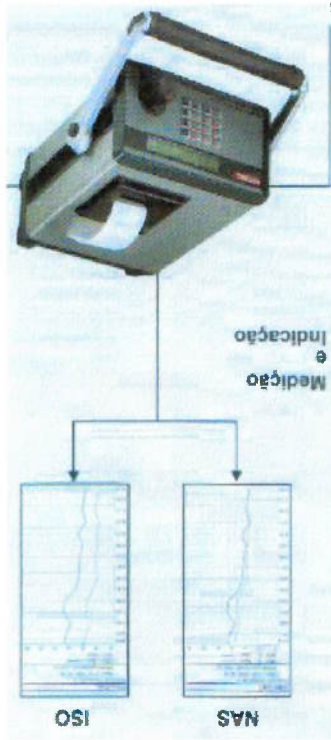


Figura 3-8: Contador de partículas Hydac modelo FCU 2010

(Hydac, 2002)

Eleftherakis; Shelton; Long (1995), registram a criação na Suécia em 1987 do código ISO 4406, um método internacionalmente aceito para a codificação do nível de contaminação de fluidos em aplicações industriais.

A norma ISO 4406 abrange dois códigos, X e Y, onde X representa o nível de partículas maiores que 5 microns (μm) e Y representa o nível de partículas maiores que 15 microns (μm), conforme gráfico log-log², mostrado na figura 3-9.

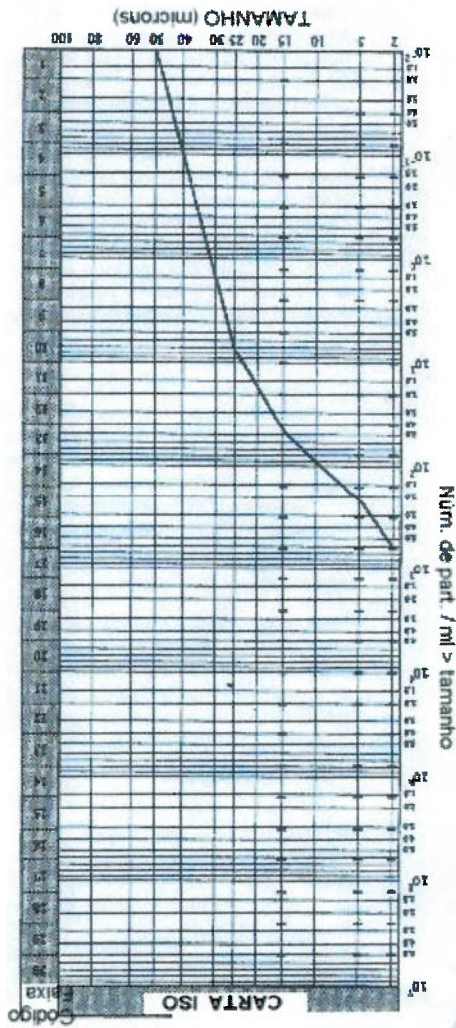


Figura 3-9 Dados de Contagem de Partículas plotados num gráfico log-log² com as coordenadas do Código ISO (Eleftherakis, Shelton, Long, 1995)

* adaptado e traduzido pelo autor

Os autores colocam que algumas organizações estenderam os dois padrões convencionais de medição e incorporaram um terceiro nível de contaminação ($> 2 \mu\text{m}$) a ser utilizado em sistemas de lubrificação com elevada criticidade. Conforme se observa na figura 3-9, se os valores de contaminação referentes aos tamanhos

forem plotados num gráfico log-log, será possível avaliar-se o comportamento geral da contaminação de um fluido em todas as suas faixas de contaminação. Retirada de ISO 4406 (1999), mostramos através da tabela 3-5, as faixas de códigos ISO que variam de 1 a 28 e representam a análise de partículas contadas de 0,01 a 2.500.000 partículas por mililitro de fluido.

Tabela 3-5: Alocação dos números da escala (ISO 4406, 1999)

* adaptado e traduzido pelo autor

N. da escala	N.º de Partículas por mililitro	
	Menor que e até	Maior que
> 28	2.500.000	2.500.000
28	2.500.000	1.300.000
27	1.300.000	640.000
26	640.000	320.000
25	320.000	160.000
24	160.000	80.000
23	80.000	40.000
22	40.000	20.000
21	20.000	10.000
20	10.000	5.000
19	5.000	2.500
18	2.500	1300
17	1.300	640
16	640	320
15	320	160
14	160	80
13	80	40
12	40	20
11	20	10
10	10	5
9	5	2,5
8	2,5	1,3
7	1,3	0,64
6	0,64	0,32
5	0,32	0,16
4	0,16	0,08
3	0,08	0,04
2	0,04	0,02
1	0,02	0,01
0	0,01	0,00

Segundo a ISO 4406 (1999), o objetivo deste código é simplificar a informação dos dados de contagem de partículas através da conversão do número de

partículas em classes amplas ou códigos, nas quais o aumento de um código equivale a duplicação do nível de contaminação.

Com a criação dos contadores ópticos automáticos de partículas, as faixas de tamanhos de partículas tiveram que ser modificadas. Na revisão da norma, executada em 1999, os novos tamanhos informados pelo equipamento deveriam ser $\geq 4 \mu\text{m}$, $\geq 6 \mu\text{m}$ e $\geq 14 \mu\text{m}$, os dois últimos destes sendo equivalentes aos antigos valores de $5 \mu\text{m}$ e $15 \mu\text{m}$ usados na antiga norma. O método de calibração do equipamento também foi alterado, sendo que o uso da notação μm significa que medições do tamanho da partícula foram realizadas utilizando um contador de partículas automático, o qual foi calibrado de acordo com a norma de calibração ISO 11171.

A norma ISO 4406 (1999) revisada explica como se determina a contaminação de um óleo fazendo-se uso de um contador automático de partículas. O primeiro número da escala deverá representar o número de partículas iguais ou maiores do que $4 \mu\text{m}$. O segundo número da escala deverá representar o número de partículas iguais ou maiores do que $6 \mu\text{m}$. O terceiro número da escala deverá representar o número de partículas iguais ou maiores do que $14 \mu\text{m}$. Os três números deverão ser escritos um após o outro e separados por um traço transversal. Por exemplo, um óleo lubrificante que apresentou um código ISO 22/18/13, significa que:

- existem mais do que 20.000 e até no máximo 40.000 partículas iguais ou maiores que $4 \mu\text{m}$;
- existem mais do que 1.300 e até no máximo 2.500 partículas iguais ou maiores que $6 \mu\text{m}$;
- existem mais do que 40 e até no máximo 80 partículas iguais ou maiores que $14 \mu\text{m}$ em 1 ml de uma amostra de óleo;

Apesar da norma específica de contadores de partículas ópticos automáticos especificarem a medição de partículas > que $4, 6$ e $14 \mu\text{m}$, na prática essa determinação não é aplicada. A maioria dos aparelhos ópticos existentes no mercado, inclusive o utilizado na parte experimental deste trabalho reportam resultados conforme a norma ISO 4406 de 1987, ou seja, medem partículas $> 5, > 15$ e $> 25 \mu\text{m}$. O próprio contador automático de partículas utilizado na parte experimental deste trabalho reportou 5 faixas de tamanho de partículas:

- > 2 µm, > 5 µm, > 15 µm, > 25 µm e número total de partículas em 100 ml de fluido.

Em Glantz (1992), é citado que para a determinação de graus de limpeza de fluidos hidráulicos e lubrificantes é também possível fazer uso da norma NAS 1638 (National Aerospace Standard), mostrada através da tabela 3-6. Esta norma possui 14 diferentes classes de limpeza baseadas em 100 ml de fluido. Cada classe especifica um dado número de partículas em cada um dos cinco grupos: de 5 a 15 µm, 25 a 50 µm, 50 a 100 µm e maior que 100 µm. No entanto, a norma ISO 4406 é mais frequentemente usada.

Tabela 3-6. Norma NAS 1638 (NAS 1638, 1964)
* adaptado e traduzido pelo autor

Classe NAS	Número de Partículas / 100 ml					Qtde. de Contam. (ACTD) mg/l
	2-5 µm	5-15 µm	15-25 µm	25-50 µm	50-100 µm > 100 µm	
00	625	125	22	4	1	0
0	1.250	250	44	8	2	0
1	2.500	500	88	16	3	1
2	5.000	1.000	178	32	6	1
3	10.000	2.000	356	63	11	2
4	20.000	4.000	712	126	22	4
5	40.000	8.000	1.425	253	45	8
6	8.000	16.000	2.850	506	90	16
7	160.000	32.000	5.700	1.012	180	32
8	320.000	64.000	11.400	2.025	360	64
9	640.000	128.000	22.800	4.050	720	128
10	1.280.000	256.000	45.600	8.100	1.440	256
11	2.560.000	512.000	91.200	16.200	2.880	512
12	5.120.000	1.024.000	182.400	32.400	5.760	1.024

Glantz (1992) cita que não existe uma relação direta entre as norma NAS 1638 e ISO 4406. A comparação só pode ser realizada quando a NAS 1638 é convertida na forma acumulativa. Encontra-se na SAE J 1165 (1979) uma tabela de correlação entre as diversas metodologias de contagem do nível de contaminantes em fluidos, conforme mostrado na tabela 3-7.

Tabela 3-7 Correlação entre níveis de limpeza (SAE J 1165, 1979) * adaptado e traduzido pelo autor

Código ISO	Partículas por ml > 10 um	ACFTD Nível Gravim. mg/l	Padrão MIL 1248 A (1967)	MAS 1638 (1964)	Nível SAE (1963)
26/23	140 000	1000	1000	10	6
25/23	86 000	100	1000	10	6
23/20	14 000	100	1000	10	6
21/18	4500	100	1000	10	6
20/18	2400	100	1000	10	6
20/17	2300	10	1000	10	6
20/16	1400	10	1000	10	6
19/18	1200	10	1000	10	6
18/15	580	10	1000	10	6
17/14	280	1	1000	10	6
16/13	140	1	1000	10	6
15/12	70	1	1000	10	6
14/12	40	0,1	1000	10	6
14/11	35	0,1	1000	10	6
13/10	14	0,1	1000	10	6
12/9	9	0,1	1000	10	6
11/8	5	0,1	1000	10	6
10/8	3	0,01	1000	10	6
10/7	2,3	0,01	1000	10	6
10/6	1,4	0,01	1000	10	6
9/6	1,2	0,01	1000	10	6
8/5	0,6	0,01	1000	10	6
7/5	0,3	0,01	1000	10	6
6/3	0,14	0,001	1000	10	6
5/2	0,04	0,001	1000	10	6
2/3	0,01	0,001	1000	10	6

A interpretação do resultado de contagem de partículas têm interesse prático para estabelecer níveis de limpeza objetivo para equipamentos. Conforme pode ser verificado na figura 3-9, a mudança do ângulo da reta que mostra a distribuição das partículas por faixas de tamanho, a avaliação da inclinação da distribuição das partículas grandes e o nivelamento geral da distribuição têm influência geral na interpretação dos resultados e auxilia na tomada de ações corretivas.

3.2.4 Análise de resíduos de desgaste

Resíduos de desgaste, dependendo de seu tamanho, podem ser analisados tanto por espectrometria, como por ferrografia como por ambas as técnicas.

Dados de 1992 retirados de Lockwood; Dalley, registram que a utilização da ferrografia em conjunto com análise espectrométrica fornecem previsões antecipadas e mais confiáveis, comparando-se com a utilização única da espectrometria. Entretanto, ao passo que uma análise espectrométrica custa da ordem de US\$ 10,00 por amostra, uma análise ferrográfica é mais cara, cerca de US\$ 25,00 por amostra.

Laskowski (1984) cita a introdução dessa técnica numa refinaria japonesa no ano de 1982. A ferrografia não só acrescentou estabilidade aos métodos de análise

utilização dos equipamentos em serviço. Isto proporcionava alterações satisfatórias de projetos antes da inaccessíveis. do seu uso nos anos 80, permitindo o monitoramento *in situ* de mecanismos Scott; Seifert; Westcott (1975) descrevem a técnica, registrando a importância movimentos de deslizamento.

Reda; Bowen; Westcott (1975) conseguiram através da ferrografia, classificar faixas de seis modos de desgaste analisando a interface de superfícies de aço em condições da máquina analisadas pela ferrografia.

Lubrificantes, seus aditivos e seus contaminantes podem ter sua influência na desmontagem corretiva de máquinas e componentes.

ocorrência de falhas e permitem prolongar os geralmente caros períodos gastos na utilização dessa técnica no monitoramento de equipamentos previne a desgaste e as partículas contaminantes são separadas do lubrificante e analisadas. A Scott (1977) define ferrografia como uma técnica na qual os resíduos de

3.2.4.2. Ferrografia

frequentemente registradas como evidências da contaminação por sujeira. contaminação como silício, ou a combinação do silício com alumínio e titânio, são desgaste por *scuffing* geralmente são superiores a 10 µm. A presença de partículas de superiores a 10 µm. Partículas de desgaste anormal como deslizamento severo e determina a concentração de metais solúveis e partículas metálicas em tamanhos realização de medições especiais para pesquisas, a análise espectrométrica de metais populares devido ao menor custo, maior velocidade e outros fatores. Exceção-se a emissão atômica e o plasma que detectam a luz emitida pelos elementos são os mais atômica, emissão de plasma induzido acoplado e raio x fluorescente. Destes, a Métodos espectrométricos incluem absorção atômica, espectrometria por emissão ferroviária iniciou a realização de testes de metais de desgaste em lubrificantes. Lockwood, Dalley (1992) registram que ao final do ano de 1940, a indústria

3.2.4.1. Espectrometria

de vibrações e espectrometria por análise de óleos usados, como também tornou-se a ferramenta mais importante para a predição de falhas de bombas e compressores. Jones (1979) reporta também boas correlações conseguidas na prática do monitoramento de motores diesel em conjunto com valores de metais de desgaste observados por espectrometria de absorção atômica.

Yardley (1979) faz considerações sobre as limitações da técnica. Registra que durante o monitoramento experimental de caixas de engrenagens sujeitas a contaminação com partículas de desgaste, em quatro falhas ocorridas durante os experimentos, todas foram diagnosticadas por espectrometria, porém apenas três foram detectadas por ferrografia. Além de discutir sobre vantagens e restrições, ressalta que as duas técnicas devem sempre ser consideradas como complementares.

Numari; Dalley (1991) definem ferrografia como um método de avaliação utilizado para analisar partículas separadas de fluidos. Desenvolvido em 1971, ele foi usado inicialmente para precipitar magneticamente partículas de desgaste ferroso suspensas nos óleos lubrificantes. Existem dois tipos básicos de ferrografia, a ferrografia de leitura direta e o sistema de ferrografia analítica. Os autores colocam que a ferrografia de leitura direta é utilizada para se obter valores numéricos médios de desgaste normal. Quando aumentos repentinos ocorrem nesse tipo de leitura, a ferrografia analítica permite analisar visualmente as partículas de desgaste por ordem de tamanho. Partículas de 5 µm e maiores são confinadas da entrada para o fim do campo de deposição, sendo que seus tamanhos vão ficando progressivamente menores ao longo dessa faixa. As concentrações de partículas são medidas através de luz na entrada e numa distância de cerca de 4 mm ao longo da lâmina. Baseados nos valores de densidade de partículas grandes D_L (< 5 microns) e densidade de partículas pequenas D_S (> 5 microns), pode-se determinar os valores das concentrações de partículas de desgaste e as porcentagens entre os tamanhos das partículas. Continuando o artigo, os autores colocam quando os valores de ferrografia direta indicam desgaste anormal, técnicas de ferrografia analítica podem ser utilizadas para se estudar a origem do desgaste. Costuma-se fazer uso de um ferrosópio, que é um microscópio bicomático dotado de câmeras e lentes de aumento de 100 a 800 vezes, que utiliza também fontes coloridas de luz transmitidas e refletidas. Através de ataques na amostra e filtros de polarização, permite-se

distinguir o tamanho, a composição, a forma e a textura de partículas de desgaste metálicas e não metálicas.

Partículas de contaminação e desgaste foram originariamente reportadas e compiladas por Anderson (1982) em seu Atlas, usualmente utilizado como meio comparativo em diagnósticos tribológicos.

Baroni (2000) incrementou essa classificação, acrescentando com ineditismo outras partículas, componentes e definições. Fotos de algumas dessas partículas são mostradas na figura 3-10.

Existe vasta literatura descrevendo o estudo de casos práticos e a detecção de modos de desgaste em diversos componentes e máquina fazendo uso dessa técnica. A maioria dos artigos pesquisados registram a boa aplicabilidade da técnica de ferrografia, especialmente em campos de aplicações de operações contínuas e automatizadas, registrando sua efetividade como ferramenta de auxílio para a tomada de decisões gerenciais de forma efetiva.

	<p>LAMINAR</p> <p>Rollamento em fase inicial de pitting.</p> <p>Ampliação = 500 X</p>		<p>ESPOLHAÇÃO</p> <p>Exemplo de reductor em estado normal de desgaste.</p> <p>Ampliação = 500 X</p>
	<p>ESFERAS</p> <p>CONTAMINANTES</p> <p>Resíduos de solda elétrica efetuada em sistema hidráulico. O fusing realizado não foi suficiente para a limpeza do sistema.</p> <p>Ampliação = 1000 X</p>		<p>DESGASTE SEVERO</p> <p>Partículas gerada por amassamento de material devido contato metal-metal. Este desgaste foi provocado por falha do lubrificante que estava com viscosidade incorreta.</p> <p>Ampliação = 500 X</p>
	<p>CONTAMINANTE</p> <p>ORGÂNICO</p> <p>Fibras de filto de má qualidade.</p> <p>Ampliação = 500 X</p>		<p>ABRASÃO</p> <p>Partícula semelhante a cavaco de usinagem, gerada pela presença de areia no sistema.</p> <p>Ampliação = 500 X</p>
	<p>METAIS NÃO</p> <p>FERROSOS</p> <p>Liga de Alumínio onduada de desgaste em labirintos.</p> <p>Ampliação = 500 X</p>		<p>NAO</p> <p>Ptíng em engrenagem cementada.</p> <p>Ampliação = 500 X</p>

Figura 3-10 Exemplos de contaminantes sólidos em lubrificantes vistos por ferrografia (Baroni, 2000)

3.3. Efeitos da contaminação no desempenho dos rolamentos

Nesta parte do trabalho iremos destacar um resumo de trabalhos encontrados na literatura que envolvem o impacto de contaminantes no desempenho dos rolamentos e mais recentemente evoluções no cálculo da vida nominal dos mesmos.

Em Ronen; Malkin (1983), que realizou experimentos envolvendo mancais hidrodinâmicos lubrificados com óleos limpos e contaminados, registra-se que a contaminação por partículas abrasivas em mancais hidrodinâmicos leva ao aumento do atrito e do desgaste. Como consequência de perdas de energia por atrito, o mancal

registrou um aumento na temperatura de operação o qual fazia diminuir a viscosidade do óleo e também reduzir a capacidade de suportar carregamentos hidrodinâmicos. Concluiu-se que o desgaste causado por partículas abrasivas no óleo, cujo tamanho fosse superior a espessura do filme de óleo, poderia limitar a vida útil dos mancais .

Loewenthal, Moyer, Needelman (1982), num estudo sobre efeitos da ultra limpeza e filtração centrífuga nos óleos de rolamentos, registraram na época, que havia ampla evidência na literatura que contaminantes em sistemas lubrificadores aumentavam significativamente o desgaste de rolamentos. Em sistemas propulsores de aviões, resíduos são o maior fator de falha de componente. Um levantamento das causas de falhas para motores de aviões, transmissões e mancais de apoio, indicam que o grupo de edentações/contaminação representa aproximadamente 20 % de todas as falhas de mancais.

Fitzsimmons, Cleveinger (1975) apresentaram um estudo no qual foi utilizado uma máquina que lembrava uma caixa de câmbio automotiva, com os rolamentos lubrificadas com nível de óleo constante e contaminados com areia de sílica. Os mesmos eram submetidos a aplicação de rotação e carga radial constante. Os pesquisadores investigaram vários parâmetros experimentais, a saber:

- Efeitos do nível de concentração do contaminante no desgaste dos rolamentos;
- Efeitos do tamanho das partículas no desgaste dos rolamentos;
- Efeitos da dureza do contaminante na perda de massa do rolamento;
- Efeitos do tempo de teste na perda de massa do rolamento;
- Efeitos do tipo de óleo e da viscosidade na perda de massa do rolamento;

Dos resultados obtidos dos dados experimentais, as seguintes conclusões foram descritas:

- o desgaste em rolamentos de rolos cônicos é proporcional a quantidade de lubrificante, dependendo do lubrificante e do tamanho e da dureza do contaminante;
- rolamentos de rolos cônicos continuarão a apresentar desgaste tão maior for o tamanho da partícula de contaminante em relação a espessura do filme de óleo entre as superfícies;

- para rolamentos com desgaste significativo, a dureza do contaminante tende a ser maior ou no mínimo equivalente a dureza do material do rolamento.

Também registra que em amostra de lubrificante coletada com particulados contendo acima de 10-25 mg/100 ml é um forte indicativo de contaminação excessiva e/ou geração de resíduos de desgaste, ou seja, condições extremamente contaminadas.

Fitzsimmons; Cave (1977) realizaram pesquisa complementar à da referência

anterior, registrando os principais efeitos dos contaminantes em rolamentos de rolamentos de rolamentos. Sugerem que contaminantes sólidos em lubrificantes podem conduzir ao desgaste abrasivo a três corpos, o qual ocorre quando partículas são introduzidas entre superfícies deslizantes e o material desgasta-se em cada uma das superfícies. Os pesquisadores procuraram dar uma conotação mais física ao efeito da contaminação na performance de rolamentos de rolamentos de rolamentos de rolamentos, abordando por exemplo, os modos de danos causados pela presença de contaminantes. Descrevem que a contaminação pode vir a ocasionar excessivo desgaste em rolamentos de rolamentos de rolamentos, resultando na redução total da largura do rolamento, o qual pode vir a resultar em aumentos na deflexão do eixo ou mudança na posição de operação relativa dos engrenamentos. Isto provavelmente seria ocasionado pelo mecanismo de lubrificação do rolamento, que faz com que o lubrificante seja bombeado na direção da montagem da capa-cone para o fim do rolamento, conforme figura 3-11.

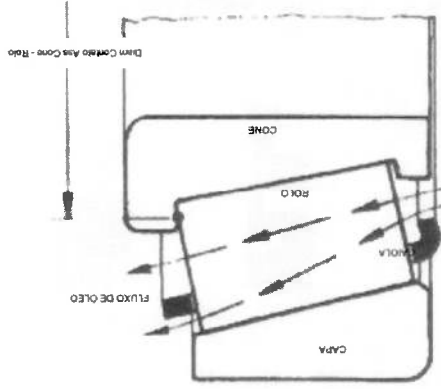


Figura 3-11 Fluxo de lubrificante num rolamento de rolamentos (Fitzsimmons, Cave, 1977) * adaptado e traduzido pelo autor

Os autores do artigo sugerem que, estando o lubrificante contaminado, a ação de circulação contínua do lubrificante pelos rolos provocaria em uma lapidação abrasiva da superfície do rolo. Para isto efetivamente ocorrer, partículas que são significativamente maiores que a espessura do filme lubrificante precisariam enfrentar consideráveis reduções para só assim circularem efetivamente através dos filmes lubrificantes normalmente encontrados nesse tipo de rolamento. Ou seja, o desgaste abrasivo pode ser tolerado até que o mesmo cause modificações nas dimensões dos rolamentos que os tornem críticos para as aplicações.

Uma outra referência consultada, a Glt Work sheet 3 (1999), aborda em seu capítulo sobre contaminação de lubrificantes alguns pontos da experiência de Fitzsimmons. Partículas sólidas estranhas levam ao desgaste e fadiga prematura. Partículas duras em rolamentos causam desgaste abrasivo, particularmente nas áreas de contato com elevada taxa de atrito de deslizamento, como por exemplo nas superfícies de contato das faces dos rolos. O desgaste aumenta com a dureza da partícula e é mais ou menos proporcional com a concentração das partículas no lubrificante e com o tamanho da partícula. Desgaste igualmente ocorre com partículas extremamente pequenas. Desgaste abrasivo em rolamentos é aceitável até uma certa extensão, sendo que a quantidade permitida de desgaste irá variar de acordo com a aplicação. A circulação de partículas grandes causam endentações nas pistas. O material deformado plasticamente é laminado em suas extremidades e somente uma parte é removida durante a laminação seguinte. Cada carga seguinte causa um ciclo de tensões cada vez maiores na área da endentação, a qual resulta na redução de vida à fadiga. Quanto maior a dureza das partículas circuladas e menor o tamanho do rolamento, menor sua vida.

Ioannides et al (1993) registram em seu artigo de que forma a contaminação no lubrificante afeta a expectativa de vida dos rolamentos. A predição dos efeitos dos contaminantes nos contatos dependem muito das propriedades dos contaminantes e seus resultados nas endentações nos rolamentos. Os autores do artigo têm estudado dois tipos de partículas contaminantes: partículas metálicas ou duteis e cerâmicas ou frágeis.

Analisando-se a figura 3-12, percebe-se que dependendo da dureza das pistas, da espessura do filme lubrificante e do coeficiente interfacial de atrito μ , regiões de

danos e regiões seguras (acomodação elástica de partículas), além de combinações de dureza e tamanho de partículas esféricas, podem existir regiões de funcionamento de rolamentos seguras e sujeitas a danos.

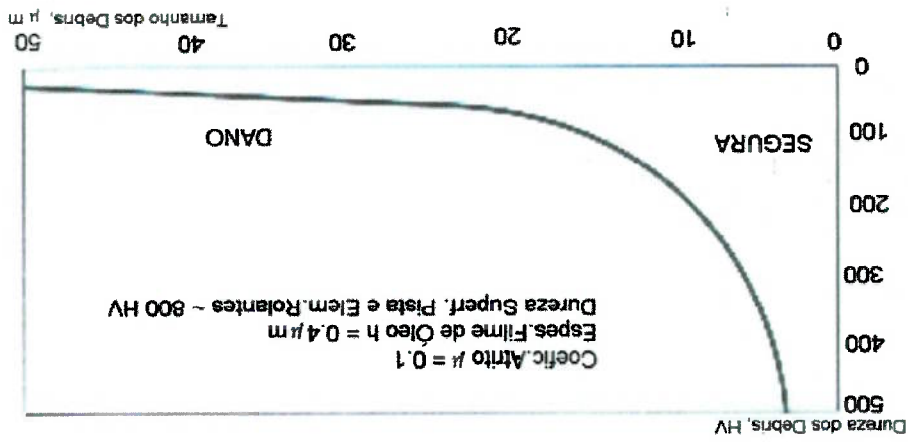


Figura 3-12. Mapeamento de regiões de dano e segura através de combinações entre dureza e tamanho de resíduos (Ioannides et al, 1993)

* adaptado e traduzido pelo autor

O artigo reporta ainda que evidências sugerem que partículas com elevada tenacidade à fratura sejam capazes de ocasionar significativas endentações e reduzir a vida de rolamentos através da retirada de lascas, enquanto que partículas frágeis com baixa tenacidade à fratura fragmentariam-se rapidamente e esse tornariam mais perigosas em termos de desgaste.

Com base nas relações entre o material da partícula, o tamanho, a forma, a dureza ou tenacidade à fratura, um fator de contaminação denominado η_c foi caracterizado. O mesmo deverá ser levado em conta nos cálculos atuais de vida nominal de rolamentos, podendo contribuir para a redução de suas vidas em até cinquenta vezes.

Jacobson (2000) reporta em seu artigo os efeitos dos contaminantes durante o amaciamento de rolamentos e engrenagens. Coloca que quando o lubrificante é limpo, as superfícies atravessarão a fase de amaciamento de forma adequada. No entanto, se o lubrificante contiver partículas, e as mesmas forem suficientemente grandes e duras, o processo de amaciamento das superfícies poderá ser destruído e as mesmas jamais se tornarão polidas o suficiente para serem separadas através de um

Filme de óleo lubrificante. As superfícies irão apresentar desgaste ou descascamento conforme forem as propriedades e a concentração do contaminante.

Chao et al (1996) *apud* Berg(2001) têm conduzido estudos dos efeitos da contaminação de partículas sobre a superfície de contato de rolamentos. Ele descobriu que a vida L_{10} (vida de rolamentos com 90 % de confiabilidade) diminui severamente com o aumento da partícula, na região onde a dureza da partícula sólida é menor do que aquela sobre a superfície de rolamento. Partículas mais duras que o rolamento quanto a superfície do rolamento diminuem ao máximo a vida L_{10} , mas o aumento com a dureza da partícula não é tão severo como no primeiro caso.

Philips (1989) relata que em condições normais de serviço, a vida de rolamentos L_{10} é raramente obtida. Falhas prematuras em rolamentos são causadas pela ocorrência de muitos fatores tais como sujeira ou contaminação por umidade, problemas de lubrificação, altas temperaturas, falhas na instalação e vibração excessiva.

4 PARTÍCULAS NO CONTATO DE LUBRIFICAÇÃO ELASTO

HIDRODINAMICO

4.1.Introdução

A questão do comportamento de partículas contaminantes no contato entre as pistas e as esteras dos rolamentos têm grande importância no desenvolvimento e na compreensão dos fenômenos da parte prática deste trabalho. Este capítulo será dedicado a abordar exclusivamente esse tema.

Assim sendo, inicialmente será elaborado um breve resumo sobre a lubrificação de rolamentos. Em seguida será descrito o modo de lubrificação E-H e finalmente será apresentado um resumo sobre um estudo que envolveu o comportamento de partículas contaminantes em contatos E-H, com base em uma tese de doutorado de 1993, por um pesquisador do Imperial College of Science, de Londres, Inglaterra.

4.2 A lubrificação de rolamentos

Em SKF (1985) consta que as principais funções de um lubrificante para rolamentos são:

- Formar uma película suficientemente espessa entre os componentes do rolamento que se movem uns contra os outros a fim de se evitar o contato metálico;
- Reduzir o atrito e eliminar desgastes;
- Proteger contra a corrosão;
- Proteger, no caso de uso de graxa, contra a entrada de impurezas tais como sujeira, pó, umidade e água.

Estabelece que a lubrificação de rolamentos normalmente são realizadas com graxas e óleos, e somente em alguns casos especiais com lubrificantes sólidos.

Em outra publicação, SKF (1980) cita que a adequada lubrificação de rolamentos é essencial para o sucesso de seu desempenho. O Comitê Anual de Engenheiros de Rolamentos (ABEC), dos Estados Unidos, estabeleceu após extensiva pesquisa, as seguintes recomendações:

- O torque de atrito de um rolamento de esferas lubrificadas com óleo consiste essencialmente de dois componentes, um deles é função do projeto do mancal e da carga imposta sobre o rolamento, e o outro é uma função da viscosidade e da quantidade de óleo e da rotação do rolamento;
 - Quanto menor for a quantidade de óleo, somente suficiente para formar um fino filme sobre as superfícies em contato, menor será o torque de atrito;
 - A energia perdida em um rolamento é proporcional ao produto do torque pela velocidade;
 - Como a lubrificação de rolamentos a óleo é influenciada por muitos fatores ligados ao torque de atrito, perda de energia e aumento de temperatura, é evidentemente impossível estabelecer recomendações definitivas sobre a seleção de um óleo lubrificante para todas as aplicações de rolamentos;
 - Na grande maioria das aplicações óleos minerais puros são muito satisfatórios para a lubrificação de rolamentos, mas eles devem, logicamente, estar livres de contaminações que possam causar desgaste no mancal, e eles devem mostrar elevada resistência à oxidação, formação de gomas e lacas, e à deterioração pela evaporação de suas frações leves, além do que não devem causar corrosão em qualquer parte do rolamento tanto durante o armazenamento como durante a operação;
 - Para baixas temperaturas de partida, óleos lubrificantes para rolamentos devem apresentar baixo ponto de fluidez para evitar travamento do rolamento;
 - Em aplicações especiais, óleos compostos podem ser preferidos, e nesses casos a recomendação do fabricante do lubrificante deve ser solicitada.
- Clarke (1972) registra que em condições de trabalho normal, óleos minerais aditivados e refinados por solventes são os mais adequados para lubrificar rolamentos. A utilização de lubrificantes sintéticos deve ficar reservada para aplicações especiais. De um modo geral deve-se seguir as seguintes recomendações:
 - empregar óleos lubrificantes de baixa viscosidade para rolamentos com baixa temperatura de trabalho, elevada rotação ou pequena carga;

- utilizar óleos com elevada viscosidade para rolamentos com elevada temperatura de trabalho , baixas rotações ou elevada carga;

- utilizar óleos com elevado índice de viscosidade para rolamentos nos quais a temperatura de trabalho varia muito;

- utilizar óleos lubrificantes resistentes à oxidação para rolamentos com elevados períodos de funcionamento contínuo.

Cita também em seu artigo que as principais propriedades e métodos de ensaio que devem ser avaliadas para óleos de rolamentos são:

- Viscosidade e índice de viscosidade (variação da viscosidade com a temperatura);
- Densidade;
- Ponto de inflamação;
- Índice de acidez;
- Resistência a oxidação;
- Resistência a elevadas pressões;
- Poder anticorrosivo;
- Propriedades anti desgaste.

4.3 Regimes de lubrificação

Hamrock (1984) coloca que se um elemento de máquina é adequadamente projetado e lubrificado, as superfícies lubrificadas são separadas por um filme lubrificante. Tallian et al. (1965) *and* Hamroch (1984), reportam testes de resistência à vida em rolamentos de esferas, os quais demonstraram que, quando o filme lubrificante é suficientemente espesso para separar os corpos em contato, a vida a fadiga do rolamento é altamente estendida. Ao contrário, quando o filme não é espesso o suficiente para oferecer separação total entre as asperezas na zona de contato, a vida do rolamento é adversamente afetada por um alto cisalhamento resultante do contato direto de metal contra metal.

O pesquisador define quatro regimes distintos de lubrificação:

- Lubrificação hidrodinâmica, geralmente caracterizada por superfícies conformes, com espessura normalmente superior a 1 µm;

- Lubrificação Elasto-Hidrodinâmica, onde as deformações elásticas das superfícies lubrificadas tornam-se significantes. Em regime E-H duro, encontrado por exemplo em rolamentos e engrenagens, a espessura mínima do filme geralmente excede 0,1 µm. Em regime E-H mole, encontrado em materiais como borrachas e elastômeros, a espessura mínima do filme é tipicamente de 1,0 µm;
 - Lubrificação Limite, regime no qual os sólidos não são separados pelo lubrificante, os efeitos do filme fluido são desprezíveis e existe um considerável contato entre as asperezas. Os filmes superficiais variam em sua espessura entre 1 até 10 nm (10^{-9} m), dependendo do tamanho molecular do lubrificante;
 - Lubrificação Parcial ou Mista, regime no qual coexistirão algum contato entre asperezas e alguma lubrificação parcial. O comportamento da conjunção será governado por uma combinação entre efeitos de filmes fluidos e limites. A espessura média do filme nessa conjunção será menor que 1 e maior do que 0,01 µm.
- Ja Dwyer-Joyce (1993) coloca que quando superfícies estão em contato as asperezas se tocam e devido a carga ser suportada sobre uma pequena área, altas pressões e fluxo plástico resultam. As asperezas podem localmente soldarem-se e formarem junções. Se movimento relativo ocorrer, essas junções serão quebradas e refeitais, e altos coeficientes de atrito e danos superficiais ocorrerão. Componentes de engenharia que operam sob essas condições não poderão durar muito. O propósito da lubrificação é o de separar essas superfícies pela interposição de uma camada de um material de baixa tensão superficial. Em geral, quanto mais espesso esse filme lubrificante melhor, desde que superfícies sejam separadas e o atrito seja mantido baixo. O autor descreve então cinco tipos de regimes de lubrificação:
 - Atrito seco: filmes óxidos e camadas adsorvidas cobrem a superfície no contato. Esses filmes oferecem alguma leve proteção, mas geralmente oxidam a moderadas cargas e velocidades;
 - Lubrificação Hidrodinâmica: as duas superfícies em contato têm seus picos e vales separados; o movimento relativo entre elas causa o arrastamento do lubrificante entre as partes;

- Lubrificação Hidrostática: nesse processo as superfícies em contato são separadas pelo filme lubrificante o qual é despejado vindo de uma fonte externa em alta pressão;
- Lubrificação Limite: os componentes em contato são parcialmente separados por uma camada química de baixa tensão de cisalhamento, a qual é normalmente adsorvida ou adere sobre as superfícies. A camada lubrificante é fina e consideráveis contatos sólidos ocorrem. Compostos quimicamente ativos (geralmente compostos à base de enxofre e fósforo) são adicionados ao lubrificante para reagir com as superfícies e produzir esses filmes;

- Lubrificação Elasto-Hidrodinâmica: quando as duas superfícies de contato se opõe sobre uma pequena área, as pressões de contato são altas e resultam em distorções dos corpos e num aumento da viscosidade do lubrificante.

A tabela 4-1 resume esses regimes e fornece alguns típicos coeficientes de atrito e aplicações:

Tabela 4-1: Sumário dos cinco principais regimes de lubrificação com espessuras típicas de filme e coeficientes de atrito (Dwyer – Joyce, 1993)

*adaptado e traduzido pelo autor

Regime de Lubrificação	Espessura Típica do Filme (μm)	Formação do Filme	Coefficiente de atrito μ	Exemplos
Atrito seco	0,001 a 0,01	Nenhum	> 0,5	-
Hidrodinâmico	1 – 100	Arrastamento de óleo	0,007 – 0,03	Mancais de deslizamento
Hidrostático	1 – 100	Bombearmento de óleo	0,007 – 0,03	Fusos de máquinas ferramenta
Limite	0,001 – 0,05	Reação entre aditivos	0,08 – 0,3	Corte de metais
Elasto – hidrodinâmico	0,1 – 1,0	Arrastamento de óleo e aumento da viscosidade	0,001 – 0,1	Engrenagens, rolamentos de esferas

O pesquisador coloca também que muitos sistemas práticos de lubrificação operam sob uma mistura de regimes. Assim sendo, um parâmetro útil no estudo das superfícies de contato e lubrificação é a espessura específica do filme, ou relação λ . Ele a relação da espessura mínima do filme (h_0) pelo valor da

rugosidade composta (RMS), σ_c das duas superfícies, e é a medida da quantidade de superfície em contato.

$$\lambda = h_0 / \sigma_c$$

onde

$$\sigma_c = (\sigma_1^2 + \sigma_2^2)^{0.5}$$

onde

σ_c é o RMS composto das duas superfícies em contato,

σ_1 e σ_2 são os valores das rugosidades de cada uma das superfícies em contato

Estas fórmulas foram utilizadas no item 6.7.2, mais precisamente na tabela 6-3 da parte experimental para se definir o filme lubrificante teórico entre os contatos pistas-esteras do rolamento.

4.4. Lubrificação Elasto hidrodinâmica

Dwyer-Joyce (1993) informa que o significado detalhado do termo: lubrificação elasto-hidrodinâmica encontra-se em seu próprio nome: elasto = distorção, hydro = fluida, dinâmica = movimento.

Dowson (1995) relata em seu artigo um histórico sobre o entendimento da lubrificação por filme fluido através de experimentos clássicos e estudos teóricos desde o ano de 1880. Discute todos os parâmetros que influenciam nos cálculos dos filmes hidrodinâmicos e elasto-hidrodinâmicos, citando inclusive experimentos práticos de medição da espessura por interferometria ótica.

Dowson (1965) *apud* Hamrock (1984) define lubrificação elasto hidrodinâmica como “o estudo das situações nas quais deformações elásticas de sólidos ao redor dos contatos desempenham uma importante regra no processo de lubrificação hidrodinâmica”. Lubrificação elasto-hidrodinâmica implica uma completa lubrificação por filme fluido e nenhuma interação entre as asperezas das superfícies. Existem duas distintas formas de lubrificação elasto-hidrodinâmica:

- Lubrificação elasto-hidrodinâmica dura: relativa a materiais de elevado módulo de elasticidade, como os metais. Nesta forma de lubrificação não apenas os efeitos das deformações elásticas são importantes, como também os efeitos da pressão-viscosidade. Aplicações de engenharia na qual essa forma de lubrificação é dominante incluem engrenagens e rolamentos;

- Lubrificação elasto-hidrodinâmica mole: relativa a materiais de baixo módulo de elasticidade como as borrachas. Para esses materiais as distorções elásticas são grandes, até com baixas cargas. Um detalhe importante é o desprezível efeito da pressão-viscosidade sobre o filme lubrificante. Aplicações de engenharia na qual esse tipo de regime é encontrado incluem vedações, juntas humanas, pneus e um grande número de elementos de máquina à base de materiais elastoméricos.

Hutchings (1992) registra que contatos não conformes como aqueles registrados entre pista e esfera em um rolamento de esferas se caracterizam por envolver contatos concentrados em áreas muito pequenas. Nessas condições, é grande a dependência da viscosidade do lubrificante com a pressão assim como com as deformações elásticas das superfícies do mancal. A lubrificação nessas circunstâncias é chamada de lubrificação elasto-hidrodinâmica, ou E-H.

Sakurai (1981) faz menção em seu artigo as regras de reações químicas que regem a lubrificação de contatos concentrados em regime de lubrificação E-H. Segundo eles existem duas abordagens a serem avaliadas, uma se refere a análise de filmes produzidos sobre as superfícies metálicas após as reações químicas, e a outra diz respeito a análise da cinética química durante o contato concentrado lubrificado.

Como abordagens envolvendo reações químicas do lubrificante e suas prováveis degradações químicas em condição de lubrificação E-H não se encaixam nos objetivos traçados para este projeto, não será contemplado no trabalho esse tipo de influência nem tampouco o efeito da degradação do lubrificante em regime de lubrificação E-H. Estaremos ao invés disso, estabelecendo entre os parâmetros fixos da parte experimental, lubrificantes de viscosidade minerais de adequada estabilidade química e isentos de carga de aditivação, justamente para desprezarmos a ação dessas possíveis influências.

A investigação dos efeitos abrasivos na lubrificação sempre teve grande interesse científico pela natural correlação desses fenômenos com os mancais de deslizamento, amplamente utilizados em motores automotivos. Já a literatura relacionada com mancais de rolamentos está necessariamente atrelada aos efeitos no desempenho e na diminuição da vida útil dos mesmos, itens que serão abordados nos próximos a diante.

4.5. Espessura de filmes em lubrificação E-H

Diversas bibliografias que foram consultadas fazem menção ao cálculo da espessura de filmes E-H. Escolheu-se o modelo teórico de Hamrock (1984) pelo fato do mesmo ser aplicado para rolamentos. mesmo quando aborda o assunto faz considerações sobre tensões de contato e deformações, definindo o fator k , chamado de parâmetro de elipticidade, conforme pode ser verificado na figura 4-1.

$$k = D_y / D_x$$

sendo

D_y = Diâmetro do contato elíptico na direção y , transversal

D_x = Diâmetro do contato elíptico na direção x , do movimento

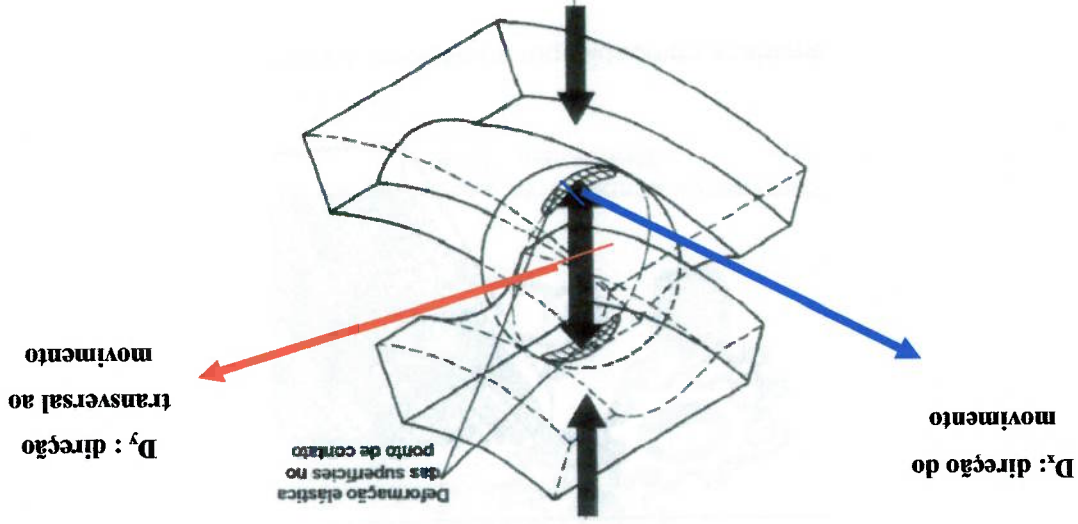


Figura 4-1. Parâmetro de elipticidade em contato de lubrificação E-H

(Stuljgys, 1998)

Após definir o contato esfera-pista de um rolamento como elíptico, faz as seguintes caracterizações de cinco grupos de dimensões:

- Espessura de filme adimensional, chamado de H;
- Parâmetro de elipticidade, chamado de k ;
- Parâmetro adimensional de carga, chamado de W;
- Parâmetro adimensional de velocidade, chamado de U;
- Parâmetro adimensional de materiais, chamado de G;

A espessura de filme mínimo adimensional poderia ser escrita como

função dos outros parâmetros envolvidos:

$$H = f(k, U, W, G)$$

Este tipo de cálculo foi utilizado no item 6.7.2 para calcular os filmes teóricos

de cada condição experimental definida por carga radial e velocidade do rolamento.

A sequência utilizada será melhor descrita nesse item.

A fórmula do filme de lubrificação E-H duro utilizada foi:

$$H_{\min} = 3,63 \cdot U^{0,68} \cdot G^{0,49} \cdot W^{-0,73} \cdot (1 - e^{-0,68k})$$

4.6. Partículas no contato de lubrificação E-H

Nesta parte do trabalho iremos abordar o assunto da entrada de contaminantes num contato elasto-hidrodinâmico. Entendemos que a abordagem desse tópico se justifica devido ao fato desse fenômeno ter ocorrido na parte experimental do trabalho.

Nikas, Sayles, Ioannides (1998) realizaram estudo envolvendo os impactos teóricos de contaminantes em contatos de lubrificação E-H. Através de simulações matemáticas envolvendo a dureza das partículas no contato e os aumentos de temperatura observados nas asperezas, mostraram os efeitos nocivos da presença dos contaminantes na entrada dos contatos. Também mostrou-se teoricamente que altas temperaturas de pico das asperezas são encontradas nas superfícies de atrito entre as partículas e as faces comprimidas. Os fenômenos de *scuffing* podem então ocorrer em escala local ou em massa, dependendo da dureza das partículas envolvidas.

Sayles, Hamer, Ioannides (1990) registram que os efeitos da contaminação em rolamentos podem ser muitos e variados, desde o desgaste abrasivo quando uma significativa concentração de resíduos abrasivos está presente, até os efeitos de um pequeno número de particulados em sistema lubrificantes relativamente limpos, causando danos localizados nas superfícies com efeitos sub-sequentes na vida à fadiga do rolamento.

Os itens que seguem foram resumidos da tese de doutorado de Dwyer-Joyce (1993), que dedicou bastante ênfase ao contato resíduos – conjugação E-H.

4.6.1. Efeitos dos resíduos em contatos de lubrificação E-H

No capítulo intitulado “Resíduos em contato de lubrificação elasto-hidrodinâmico”, o pesquisador inicialmente elabora uma revisão bibliográfica sobre trabalhos de outros colegas que abordaram os efeitos dos resíduos de lubrificante, que têm sido baseados na medição e predição das endentações em contatos gerados pelos filmes lubrificantes. Destacamos duas das referências citadas.

Shiney (1978) *apud* Dwyer-Joyce (1993) utilizou a interferência ótica para investigar o comportamento de partículas na região de deslizamento de contatos concentrados. Ele notou que materiais com um alto grau de plasticidade, a habilidade para coalescer e a habilidade para aderir as superfícies era boa para a formação de filmes sólidos lubrificantes. O bissulfeto de molibdênio formou um filme no contato sob condições secas, mas quando o lubrificante foi introduzido, a aderência diminuiu e as partículas permaneceram estacionadas na região de entrada do contato. Já partículas de carbeto de silício foram encontradas fraturadas e esfoliadas nas superfícies assim que atravessaram o contato.

Outra experiência relevante é citada no texto. Wan and Spikes (1987) *apud* Dwyer-Joyce (1993) realizaram alguns trabalhos envolvendo o comportamento de partículas sólidas em contatos de lubrificação E-H. Um aparelho ótico de lubrificação E-H foi usado em conjunto com lubrificantes contaminados. Altas velocidades de filmagem fotográfica foram usadas para registrar o comportamento de vários resíduos de materiais num contato de rolamento. Foi constatado que quantidades de todos os tamanhos de partículas testados (faixa de tamanho de 10 a 53 µm) entraram no contato. Geralmente **materiais duros se laminaram** com

pequeno efeito sobre o filme de óleo. Foi notado também que sob condições de elevado deslizamento, resíduos de partículas bloquearam a região de entrada do contato, causando degradação e abrasão superficial.

4.6.2. Experiências com aparelho ótico de lubrificação E-H

Em continuidade ao trabalho consultado, Dwyer-Joyce (1993) descreve alguns dos resultados encontrados durante seus ensaios usando o aparelho ótico de lubrificação E-H. O aparelho registra o comportamento de uma esfera de aço sobre um disco de vidro. A primeira constatação registra que quando aumenta-se a velocidade de rolamento, a espessura do filme lubrificante central aumenta proporcionalmente. Outra experiência registra o comportamento de resíduos na região de entrada do contato. Vários pós foram misturados a um óleo tipo turbina ISO 68 na concentração de 1 g/l. Foram utilizados materiais duteis originariamente com 30 µm e partículas cerâmicas frágeis da ordem de 60 µm. A mistura foi derramada sobre o disco de vidro e penetrou no contato. Um aparelho dotado de vídeo de alta velocidade e curta duração de flash fotográfico foi utilizado para registrar o comportamento das partículas na entrada.

Os resultados mostraram que **materiais duteis, como cobre, ferro fundido e aço de baixo carbono foram laminados na região de entrada**. Originalmente, esferas de cobre de 30 µm foram as que foram laminadas e que entraram no contato. Os discos laminados de cobre tenderam a aderir às superfícies das esferas e a reentrar no contato após uma volta da esfera. Partículas de ferro e aço foram varridas da região de contato. Exame dos resíduos relaminados mostraram que **as partículas foram roladas e alongadas em forma de discos planos** com suas extremidades levemente separadas.

Já partículas **cerâmicas frágeis, como discos de esferas na forma de balões, foram triturados logo na região de entrada, tão rápido quanto foram submetidas à carga**. Estas partículas mediam entre 5 e 60 µm. Partículas que não foram afetadas apresentaram brilho diferenciado. Os fragmentos foram então varridas para os lados dos contatos. Aqui também foram registrados imagens com o equipamento de alta velocidade fotográfica.

Partículas cerâmicas rígidas, como carbeto de silício ou alumina, fraturaram-se muito mais na região de entrada do contato. O número de fragmentos tendeu a aumentar e passar através do contato na massa, causando alguma fratura no disco de vidro. Muito menos dispersão de fragmentos ocorreu e alguns foram varridos para os lados.

Como conclusão desses experimentos realizados com filmes lubrificantes de espessura menor do que 1 µm, Dwyer-Joyce faz considerações sobre acomodações geométricas que tomam lugar quando estas partículas são **trituras**. Os experimentos mostraram que **três mecanismos de deformação** ocorrem dependendo das propriedades dos materiais e do tamanho dos resíduos das partículas:

- Partículas ditas plasticamente deformadas por laminação: superfícies de contato elástica ou plasticamente deformadas dependendo das durezas relativas;
- Materiais cerâmicos fraturáveis: superfícies de contato elástica ou plasticamente deformadas dependendo da tenacidade dos materiais dos resíduos. Os fragmentos entram no contato e as superfícies se deformam plasticamente ao redor deles;
- Partículas cerâmicas de pequenos tamanhos: permanecem sem danos e com as superfícies em contato plasticamente deformadas ao redor delas.

A figura 4-2 mostra o provável processo que partículas de quartzo (que foram utilizadas na parte experimental) teriam sofrido ao serem submetidas ao experimento

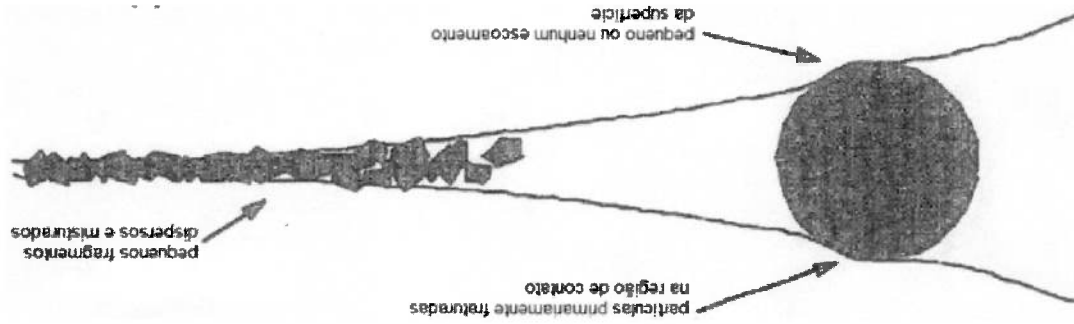


Figura 4-2 Diagrama esquemático do processo pelo qual materiais cerâmicos frageis entram em um contato de lubrificação E-H (Dwyer-Joyce, 1993)

* adaptado e traduzido pelo autor

Dwyer-Joyce (1993) relata que tanto os experimentos com a lubrificação E-H como os modelos simples que foram apresentados são idealizações. No contato concentrado real outros fatores irão afetar a entrada das partículas. Forças no fluido na região de entrada aparecem para varrer pequenas partículas. Pequenas partículas podem ser menos sujeitas a entrar no contato do que partículas grandes as quais tornam-se capturadas entre as superfícies fechadas e as forças formadas pelo fluido. Num rolamento rígido de esteras, onde a relação largura pelo comprimento é da ordem de 10, é fácil visualizar que a maior parte das partículas tornam-se entrantes. A forma da partícula também é importante; uma partícula pontuda será encaixada mais facilmente e será levada para dentro do contato.

Finalizando, Dwyer-Joyce (1993) faz ponderações sobre a influência da concentração do contaminante numa situação de ruptura de filme lubrificante. Realizou experiências através do interferômetro óptico, com partículas frágeis de carbeto de silício de 6 µm em diversas concentrações. Os resultados sugeriram que a espessura do filme não parecia depender da presença de partículas no lubrificante.

4.6.3. Conclusões

Do capítulo que foi discutido podem-se apontar as seguintes constatações:

- **Materiais frágeis foram tratados na região de entrada e os fragmentos,** cujos tamanhos dependiam da tenacidade do material, apresentavam-se envolvidos no contato. Houve **tritramento de partículas**, originariamente de tamanho de 60 µm. Os tamanhos dos fragmentos moídos testados foram:
 - Partículas de areia do Arizona: < 1 µm;
 - Fragmentos de alumina: > 3 µm;
 - Partículas de carbeto de silício: 6 µm
- Os resíduos das partículas influenciam fracamente a espessura do filme. As cargas suportadas pelas partículas foram pequenas comparadas com as cargas de contato.
- O número de partículas as quais entraram num contato óptico de lubrificação elasto-hidrodinâmica foram aproximadamente da mesma proporção da concentração dos resíduos no óleo.

5 LUBRIFICAÇÃO ATRAVÉS DA ANÁLISE DE VIBRAÇÃO

Neste capítulo será apresentado uma revisão das referências bibliográficas envolvendo a descrição de técnicas utilizadas para a detecção de anormalidades relacionadas a lubrificação e a contaminação em rolamentos através do uso de técnicas preditivas, com ênfase no uso de análise de vibrações.

5.1. Técnicas de detecção e monitoramento das condições dos componentes

Ball (1998) discute que a adoção de estratégias integradas podem ser usadas para controlar o desgaste das máquinas, fazendo uso apenas de testes que são de fato relevantes. Segundo ele, a adoção de dados confiáveis e tendências são vitais para esse conceito de gerenciamento. Com relação às técnicas de medição, o autor coloca que a efetividade de cada técnica depende da indicação da anormalidade. O mesmo tempo que a análise de vibrações oferece indicações rápidas de problemas rotacionais, desgaste abrasivo em lubrificantes contaminados seria primariamente detectado por análise de óleo. Somente após uma quantidade significativa de desgaste ter ocorrido, o problema seria indicado pela técnica de análise de vibrações. Concluindo, coloca que:

- Efetivos programas de controle de desgaste devem integrar o uso do lubrificante com técnicas de vibração, termografia e análise de desempenho simultaneamente, sempre aplicadas à mesma máquina, simultaneamente para obtenção do máximo benefício;
- A aquisição de dados confiáveis e que tenham suas tendências acompanhadas são vitais esse conceito de gerenciamento;
- A utilização integrada desses tipos de programas podem produzir aumento e lucros gerais em plantas em índices que variam de 20 a 60%.

Dentro do contexto da utilização adequada de técnicas de monitoramento, Pardue, Piety; Moore (1992) fazem uma breve descrição das principais estratégias de manutenção para a obtenção da chamada Manutenção de Máquinas Centrada na Confiabilidade (RCM). Além de definirem quatro tipos de manutenção, reativa, preventiva, preditiva e proativa, esta última direcionada para a eliminação das causas raízes das falhas,

apresentam uma relação das aplicações das técnicas de manutenção preditiva mais populares, com destaque para:

- Análise periódica do espectro de vibrações: todos equipamentos rotativos
- Análise simultânea do espectro de vibrações (“on-line”) todos equipamentos rotativos;
- Análise de óleo e dos resíduos de desgaste: equipamentos críticos e de baixa velocidade;
- Termografia: Componentes elétricos, telhados, isolação térmica

Os autores concluem o texto sugerindo passos para a implantação e aferição dos resultados do RCM em plantas industriais.

Serridge (1989) também faz considerações sobre tipo de falha e parâmetro a ser utilizado para aferição do nível global de condição de uma máquina, mostrados na tabela 5-1. Destaca a efetivada da técnica de análise de vibração na detecção da maioria dos modos de falha de máquinas.

Tabela 5-1. Aplicação de controles e técnicas no acompanhamento de tipos de falhas e componentes (Serridge, 1989) * adaptado e traduzido pelo autor

Parâmetro	Temperatura	Pressão	Fluxo	Análise de Óleo	Vibração	Falha
Desbalanceamento					X	
Desalinhamento	X				X	
Rolamentos danificados	X			X	X	
Mancais de deslizamento danificados	X	X	X	X	X	
Engrenagens sem fim danificadas				X	X	
Perdas mecânicas					X	

Especificamente sobre o monitoramento dos rolamentos, registro que Wallin (1966) já descrevia naquela época a necessidade da realização de inspeções sensíveis para rolamentos em operação, entre as quais tocar as estruturas dos mancais e ouvi-las através do auxílio de um pedaço de madeira. Entre as técnicas “preditivas” usadas pelos operadores, estavam a medição da temperatura dos mancais com termômetros, as inspeções de nível de ruído e a observação da coloração das graxas após as re-lubrificações.

Nepomuceno (1989) coloca que os defeitos ou irregularidades que aparecem em rolamentos podem ter algumas causas, como por exemplo:

- Sobrecarga;
- Desbalançamento;
- Variações bruscas da temperatura;
- Lubrificação inadequada;
- Partículas abrasivas ou corrosivas no lubrificante;
- Rolamento inadequadamente selecionado;
- Fadiga do material.

Tandon; Choudhury (1999) realizam em seu artigo uma vasta revisão sobre pesquisas relativas à detecção e diagnóstico de defeitos em rolamentos. Citam que as principais técnicas de diagnóstico são a análise de vibrações nos domínios do tempo e da frequência, método dos pulsos de choque, técnicas de pressão e intensidade de som, além do método de emissão acústica. Dividem as causas de defeitos em rolamentos em duas categorias, distribuídos e localizados. Os primeiros seriam causados por erros de fabricação, instalação inadequada e desgaste abrasivo. Já os defeitos localizados incluiriam trincas, marcas e descascamentos nas superfícies de rolamento.

5.2. Avaliação da lubrificação através de vibrações

A avaliação de situações de anormalidade em lubrificação através da técnica de análise de vibrações ainda é um assunto que apresenta divergências. O que ocorre de fato é que a maior parte da bibliografia consultada cita os efeitos catastróficos desencadeados pela contaminação de lubrificantes em rolamentos, entretanto, poucas são as referências que reportam o uso da acelerometria como método capaz de

diagnosticar com efetividade a presença de contaminantes em lubrificantes de rolamentos antes dos mesmos provocarem endentações nos componentes. Esta biografia referente ao diagnóstico da anormalidade em lubrificação devido a presença de contaminante ainda é muito restrita.

Tome-se como exemplo, Nunes (1989) que realizou ensaio prático simulando defeito advindo da inserção de grão de areia diretamente na pista de rolamentos lubrificadas a graxa. Após dez horas de operação ininterrupta, espectros de frequências correspondentes aos desgastes ocasionados foram identificados no rolamento.

Outro exemplo dessa metodologia encontra-se em Barkov e Barkova (1995), que reporta a detecção dos efeitos nocivos da contaminação sólida em lubrificantes de rolamentos, porém já numa etapa onde os rolamentos apresentam os primeiros sinais de descascamento de suas superfícies.

Roth et al (2000) reportam em seu artigo experiências práticas envolvendo a substituição de graxas sintéticas por minerais em rolamentos de uma fábrica de cimento na Alemanha. Através do monitoramento adotado, além de se conseguir uma diminuição geral nos picos de aceleração fazendo-se uso de lubrificantes sintéticos comparativamente aos minerais, é proposto o conceito de lubrificação baseada nas condições dos rolamentos, ou seja, os períodos de re-lubrificação puderam ser estendidos com confiabilidade assegurada pelo monitoramento de vibrações. Também relata as economias conseguidas, tanto pela diminuição do consumo de lubrificantes minerais como pela diminuição de pessoal envolvido na lubrificação, através da utilização racional do monitoramento e da lubrificação da planta.

Campbell; Iacopini (1994) relatam um caso de um conjunto de rolamentos lubrificadas a graxa, cujo diagnóstico de lubrificação inadequada manifestada tanto pelo tipo incorreto de graxa como pela frequência de re-lubrificação inadequada, foram conseguidos através da análise do monitoramento dos picos de aceleração ao longo do tempo.

Outras referências também registram o monitoramento da lubrificação através de sinais de vibrações.

Wolk (1991) relata exemplo de espectro de aceleração de rolamento de um ventilador de exaustão, extremamente lubrificado com graxa, operando numa rotação

de 750 rpm. Verifica-se significativo desbalanceamento nessa frequência, provavelmente gerado por resíduos de graxa velha que aderem nas pistas do rolamento. Após a limpeza do rolamento, o balanceamento foi desnecessário. Bloch (2000) em seu capítulo sobre o desempenho dos lubrificantes sintéticos, ressalta a melhoria conseguida através da utilização dos mesmos em rolamentos de um soprador, anteriormente lubrificadas por óleo mineral. Os picos de velocidade foram consideravelmente reduzidos após a utilização de lubrificantes sintéticos, possivelmente devido a seu maior peso molecular, entre 3 a 5 vezes superior ao dos óleos minerais, conforme verificado na figura 5-1 abaixo.

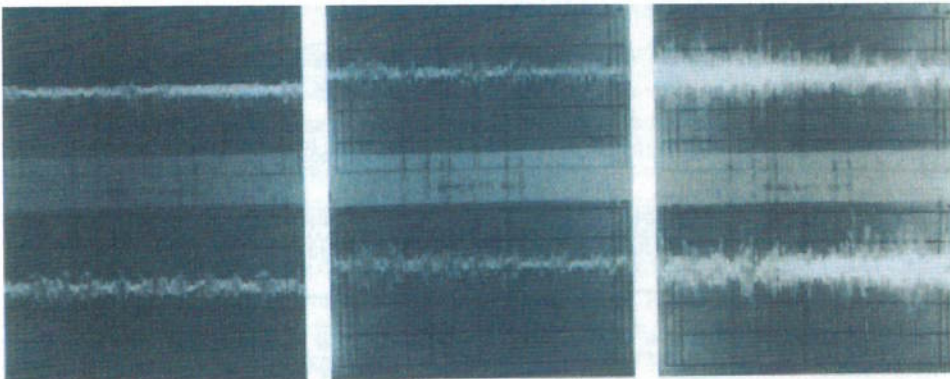


Figura 5-1 Pulsos de choque de vibrações da bomba de óleo de um compressor (Bloch, 2000)

5.2.1. Utilização de emissão acústica na detecção da lubrificação

A tecnologia de emissão acústica (E A) tem cada vez mais sido aplicado com sucesso no monitoramento de defeitos iniciais em rolamentos bem como na avaliação da eficiência da lubrificação.

Smulders; Kadushin (1994) em seu artigo discorrem a respeito das técnicas de envelope de sinais de aceleração e E A de alta frequência, como sendo bastante apropriadas para a identificação de defeitos iniciais em rolamentos. Relatam que a maioria dos defeitos em estágios iniciais em rolamentos se manifestam como respostas a pequenos impulsos, que geralmente não são percebidos por medidas normais de velocidade e aceleração. Registra a efetividade do envelope de emissão acústica na detecção inicial de estados de lubrificação inadequada, ocasionada por rompimento do filme lubrificante.

Ziogas et al (1987) apresentam em seu artigo um modelo teórico de diagnóstico da lubrificação através de parâmetros de vibração em altas frequências (acima de 20 KHz). Colocam que espessura do filme de óleo e qualidade do lubrificante afetam os parâmetros de vibração em altas frequências. Segundo eles, a adequada lubrificação de rolamentos de esferas em condições de operação normal podem ser determinadas por um sistema com "n" parâmetros formando uma função de densidade de probabilidade para rolamentos adequadamente e não adequadamente lubrificados. Foi desenvolvido um espectro de vibração de alta frequência a partir desse modelo para os dois modos de lubrificação. Por comparação entre espectros consegue-se avaliar a eficiência da lubrificação. O artigo também apresenta gráficos que correlacionam a rotação do rolamento com valores de vibrações em altas frequências, para rolamentos bem e mal lubrificados.

Miettinen, Andersson (2000) apresentam uma experiência envolvendo a detecção de contaminantes sólidos em graxas de rolamentos através de métodos de E A. Diversos experimentos foram realizados, tirando conclusões a respeito da influência do tamanho, dureza e concentração dos contaminantes.

SKF (1995) descreve a tecnologia "SEF", detida pela SKF, baseada também em E A de altíssimas frequências (faixa de frequência entre 250 a 350 KHz), talvez seja atualmente a mais conhecida e aplicada na detecção de anormalidades devido a lubrificação e contaminação de lubrificantes. Jones (1996) cita a utilização da técnica como efetiva para a detecção de contatos entre as asperezas dos componentes do rolamento.

A figura 5-2, retirada de Almeida, Góz (1995) descreve simplificada o funcionamento da técnica, cujo número reportado fornece uma idéia da espessura da película lubrificante e consequente possibilidade de contato metal-metal entre as superfícies 1 e 2, que representam a esfera e a pista do rolamento respectivamente.

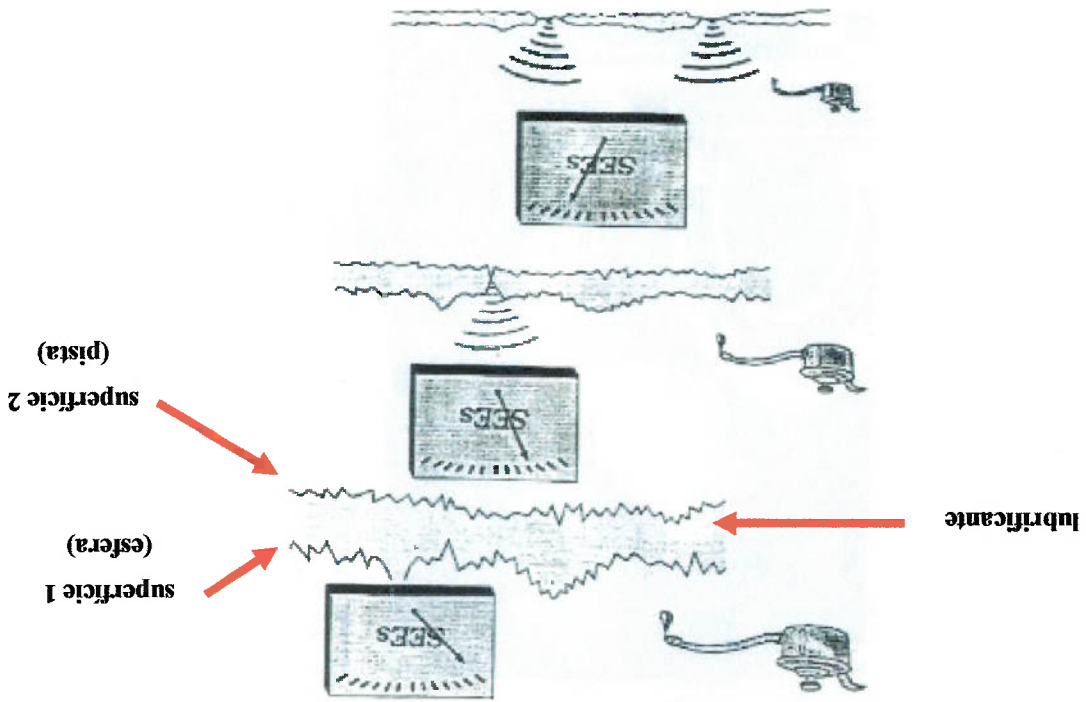


Figura: 5-2. Valores de "SFE" em função da película lubrificante (Almeida, Góz, 1995)

5.2.2. Utilização de acelerometria na detecção da lubrificação

Massouros (1983) descreve experimento no qual monitorou fases de amaciamento de mancais de deslizamento em lubrificação limite, através de acelerometria até 20 KHz e análise através do espectro de vibrações.

Um artigo abordando os efeitos da viscosidade do lubrificante e seus impactos na vibrações foi escrito por Su et al. (1992). Nesse artigo, a espessura do filme de óleo lubrificante é modelada segundo equações empíricas. Isto faz com que o espectro de vibrações siga um modelo de distribuição padrão de igual espaçamento de frequência (EFSD). Em sua parte experimental, uma série de medições envolvendo rugosidades das pistas e dos rolos do rolamento são realizadas. Espectros demodulados do sinal são gerados, variando-se tanto a pré-carga de montagem dos rolamentos, como a viscosidade do lubrificante e o nível de óleo que lubrifica o mesmo. Através de seus experimentos, os autores conseguem mostrar que a viscosidade têm um efeito positivo sobre a tenacidade do filme e energia de vibração. Duas conclusões são citadas. Primeiramente, que o espectro de vibração de rolamento normal pode ter um modelo EFSD devido às irregularidades da superfície,

que muitas vezes são engrandecidas com a elevação da velocidade de rotação. Em segundo lugar, a energia de vibração depende da viscosidade do lubrificante, da pré-carga inicial e da rotação. Dessa forma sobre altas pré-cargas e baixas velocidades de rotação, a utilização de elevadas viscosidades induzirão a baixas tenacidades de filme e baixas energias de vibração. Por outro lado, com elevadas velocidades e com óleos de alta viscosidade, tanto a dureza do filme como a energia de vibração serão elevadas. Essas considerações envolvendo a influência da rotação no sinal de vibração mostram que essa variável importante deverá ser considerada em nossa parte experimental.

Berry (1991) sugere que observações na assinatura dos sinais de vibrações especificamente na faixa de frequências entre 900 e 1600 Hz, fornece boas indicações a respeito da instalação e lubrificação adequadas. Descreve quatro estágios de evolução do espectro de frequência, desde o estágio inicial até aquele que precede a falha catastrófica.

Azovisev, Barkov, Yudin (1994), descrevem em seu artigo o desenvolvimento de um programa que utiliza uma metodologia automática de diagnóstico de falhas em rolamentos, baseada em defeitos caracterizados por modulação de frequências. Descrevem que todas as propriedades das forças de atrito para cada tipo de defeito são detectadas pela análise do espectro do envelope da vibração do rolamento, a uma banda de frequência de 1/3 de oitava, cerca de 10 KHz. Sugere doze frequências de modulação de defeito nos rolamentos, e entre elas os defeitos de lubrificação.

5.3. Monitoramento da contaminação em lubrificantes através de vibrações

Apenas uma referência e um resumo foram conseguidos após extensa revisão bibliográfica a respeito dos impactos da contaminação na lubrificação.

Peng; Kessissoglou (ano não informado) reportam uma experiência prática numa caixa de engrenagens, na qual informações sobre de vibrações e resíduos de desgaste no óleo foram correlacionadas. Testes em operação normal, lubrificação imprópria e com a presença de partículas contaminantes foram realizados. A detecção da falha através da assinatura do sinal de vibrações foi comparada com a análise das partículas. Os resultados do artigo ofereceram uma maior compreensão

das regras de dependência e independência entre análises de vibrações e análises de resíduos de desgaste no monitoramento da condição da máquina e no diagnóstico da falha.

Komiya (1992) reporta em seu artigo os resultados dos impactos da contaminação em lubrificantes através da utilização de técnicas simultâneas de registro de vibração por acelerometria e contagem de pulsos. Foram utilizados na parte experimental rolamentos de esferas, óxido de alumínio como contaminante e misturas lubrificantes a base de óleo ISO 10 filtrado e diversos tipos de graxas, misturando-se 0,25 ml de óleo em 0,85 g de graxa. Uma rotação e uma única carga axial foram aplicadas ao rolamento. Um acelerômetro foi instalado junto ao anel externo do rolamento e foram medidas a contagem de pulsos, o nível de ruído e os valores de RMS das vibrações. Foram estudados os efeitos do tamanho da partícula de contaminante e de suas concentrações, além da viscosidade dos óleos e a consistência grau NLGI (ASTM D 217) das graxas, conforme figuras 5-3 e 5-4.

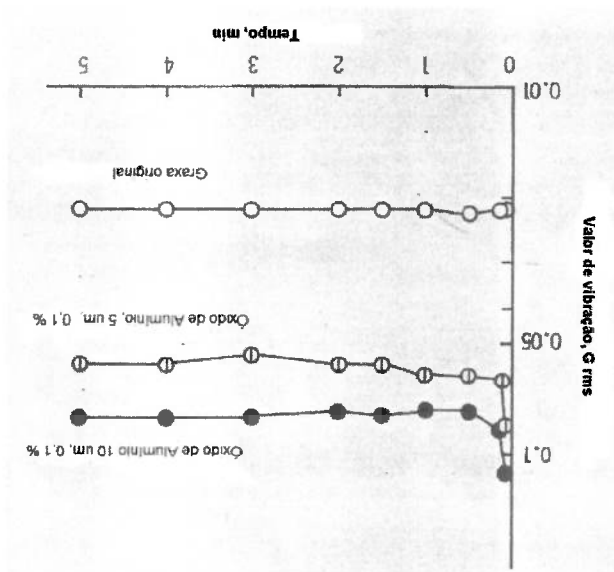
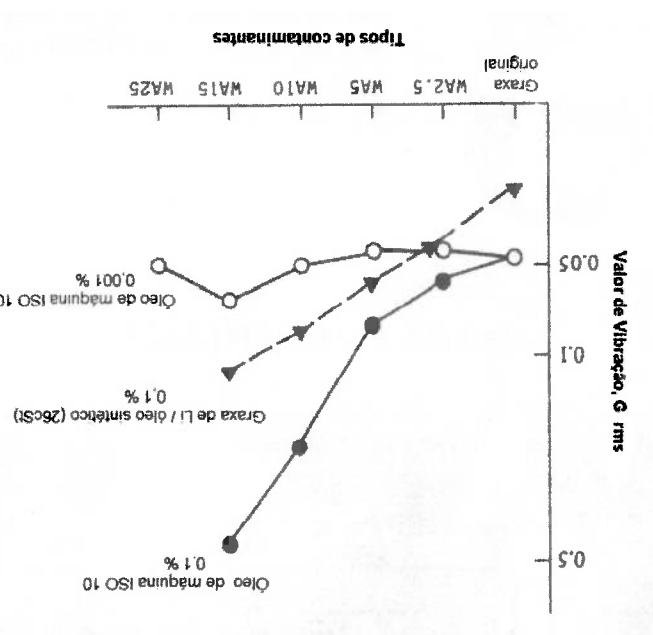


Figura 5-3 Valor da vibração X Tempo em função do tamanho do contaminante na graxa (Komiya, 1992) * adaptado e traduzido pelo autor

Foram realizadas experiências apenas com graxas, apenas com óleos e com uma mistura graxa-óleo com a finalidade de dispersar os meios contaminantes na graxa.

Figura 5-4 Valor de vibração X Tipo e tamanho de contaminantes



As principais conclusões descritas foram:

- testados ao longo do tempo, maiores tamanhos de partículas na mistura induziram a valores mais elevados de vibração e pulsos acumulados;
- para baixíssimas concentrações de contaminante no óleo, o efeito do tamanho do contaminante é desprezível no valor de vibrações;
- para uma mesma concentração, o tamanho do contaminante aumentou o nível de vibração;
- entre dois contaminantes de mesmo tamanho, o contaminante testado com maior concentração apresentou maior nível de vibração;
- o tamanho de contaminante reconhecido como responsável pelo ruído de contaminação foi de cerca de 10 µm ou maior;
- os testes onde a penetração trabalhada ou consistência foi aumentada, deixando a graxa mais fluida, também favoreceram o aumento do número de pulsos ;
- o ruído de contaminação têm uma relação relativa com o ruído de vibrações dos rolamentos, ou seja, quando o ruído é baixo, o tamanho de contaminantes detectável como causador do ruído de contaminação é muito menor do 10 µm.

6 METODOLOGIA EXPERIMENTAL

Neste capítulo serão abordados os detalhes de como foram preparados e realizadas os ensaios experimentais. Para uma melhor compreensão dos procedimentos adotados, este capítulo que descreve a parte experimental do trabalho foi dividido nos seguintes tópicos:

- Bancada de testes;
- Principais componentes da bancada;
- Contaminantes;
- Óleos lubrificantes e procedimentos de contaminação;
- Cadeia de medidas;
- Procedimentos de ensaios;
- Processamento dos sinais;
- Tabelas de dados.

6.1 Bancada de testes

Foi construída uma bancada de testes, concebida inicialmente para isolar adequadamente os efeitos de vibrações externas e que fosse capaz de poder registrar a influência da contaminação sólida em rolamento lubrificado por um banho de óleo, e que é mostrada nas figuras 6-1, 6-2 e 6-3.

A bancada consta de uma mesa rígida de chapas de aço carbono soldadas a barras laterais de apoio sob as quais foram inseridos amortecedores do tipo *vibra-shocks*, a fim de se minimizar a influência de vibrações externas aos ensaios. É composta de uma estrutura plana superior onde foram montados o eixo de acionamento, os rolamentos de sustentação e a caixa de óleo com o mancal de teste. Num plano abaixo deste, foi soldada uma segunda estrutura de chapas onde foi fixado o motor elétrico de acionamento, conforme figura 6-2.

A aplicação da carga ao rolamento foi realizada através de um braço de alavanca ligado a contra pesos de massa conhecida, que amplificava o carregamento radial a ser aplicado no mancal de testes, conforme figura 6-1.

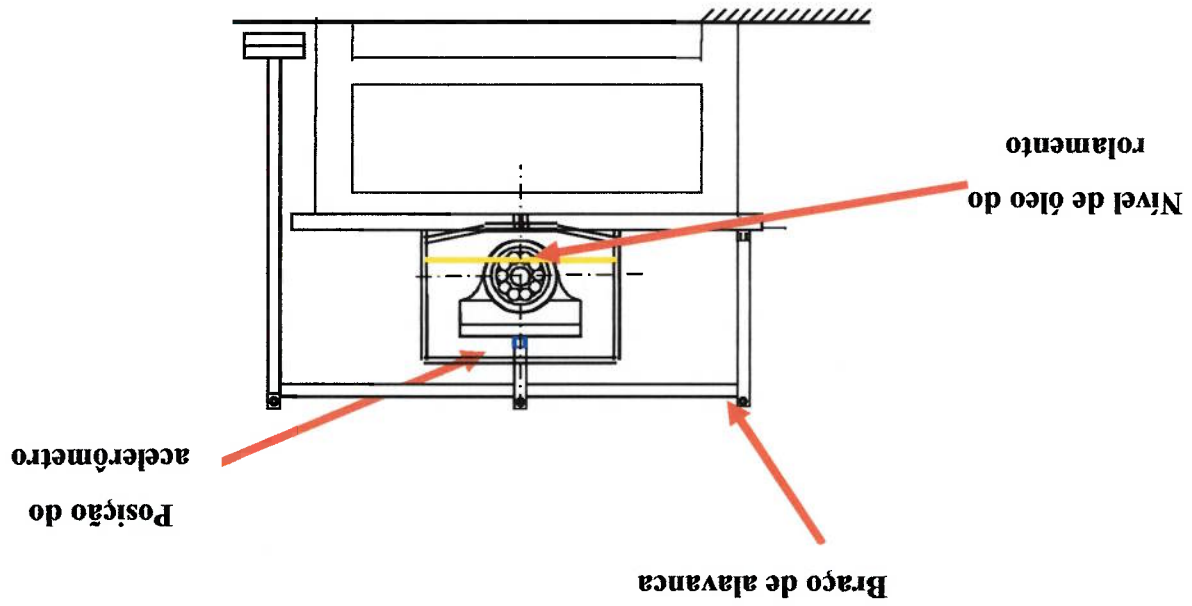


Figura 6-1 Esquema da bancada de teste – vista frontal

O motor elétrico de 0,5 HP cuja rotação foi controlada através de um variador de frequência, teve sua ponta de eixo fixada a uma polia V de dois canais que transmite sua rotação ao eixo de acionamento na relação 1:1,16. O eixo de acionamento foi apoiado em 2 mancais bi-partidos tipo caixa modelo SNA, fixos rigidamente à bancada, distantes cerca de 248 mm, dentro das quais estão inseridos 2 rolamentos rígidos de esferas 6306 vedados e lubrificados a graxa. Na ponta desse eixo foi montado um mancal de ferro fundido n.º 505, tendo no seu interior o rolamento de teste, com sua base de fixação paralela à superfície da mesa, no qual será aplicado a carga radial, conforme mostrado nos esquemas das figuras 6-1 e 6-2.

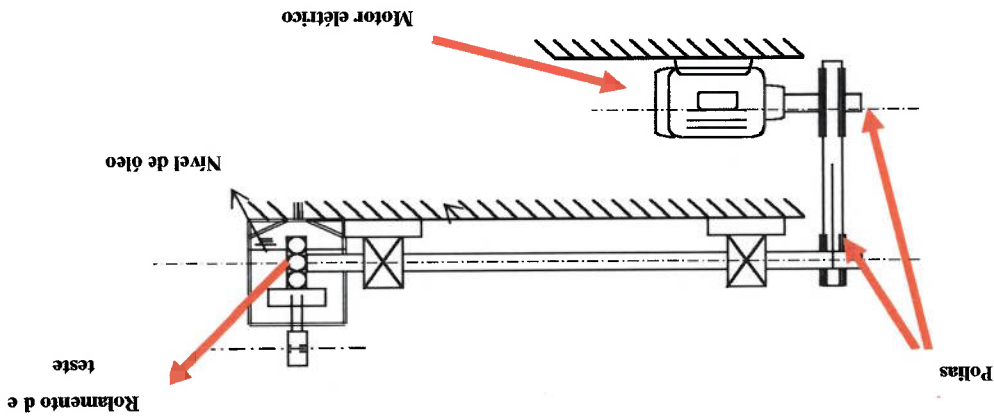


Figura 6-2 Esquema da bancada de testes – vista lateral

O rolamento de teste 6205, rígido de uma carreira de esferas aberto, foi montado no mancal bipartido entre dois calços de latão retificados, de modo a não apresentar folgas axiais quando a caixa estivesse fechada.

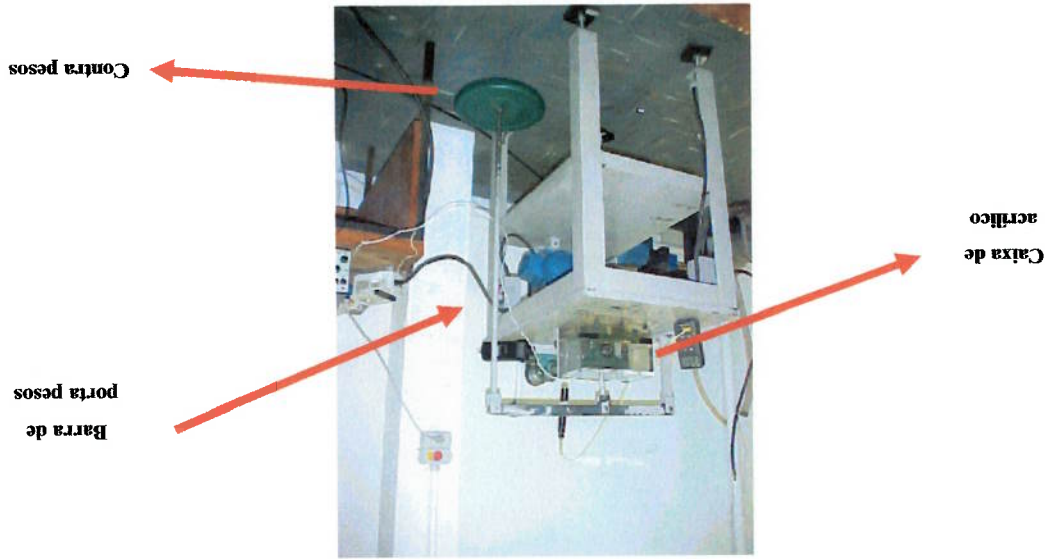
A fixação do furo do rolamento na ponta do eixo de teste atendeu a classe de tolerância k5 (leve interferência), de modo a facilitar as operações de montagem e desmontagem e impeza do conjunto. O conjunto montado do mancal e do rolamento foi parafusado axialmente ao eixo, de modo que o anel interno do rolamento ficasse solidário ao eixo e a carga rotativa aplicada se desse apenas no anel interno do rolamento

Para a aplicação de cargas no conjunto de teste foi projetado um sistema de carregamento articulado, constituído de uma barra de aço tipo alavanca que permitiu a variação de cargas no sentido radial através da adição de massas previamente calibradas, conforme pode ser visto na figura 6-3. Desse modo pôde-se aplicar cargas radiais efetivas de 36,58, 85,78 e 136,45 kg, já computadas os valores de peso do conjunto mancal-garfo, da barra de porta pesos e dos contra pesos propriamente ditos.

Na ponta do eixo de acionamento, o conjunto mancal/rolamento de teste foi isolado através de uma caixa de acrílico, tendo seu fundo parafusado tanto à base da mesa como a um anteparo rígido de aço. Essa configuração facilitava a drenagem do óleo testado, a desmontagem e a limpeza do conjunto após os experimentos.

Através dessa forma construída, o rolamento permanece em banho de óleo com nível fixo e temperatura constante, os óleos com contaminantes podem ser inseridos, agitados (quando necessário) e drenados com facilidade e todo funcionamento do conjunto pode ser observado adequadamente, conforme figura 6-4.

Figura 6-3 Bancada experimental



Na base superior da caixa do mancal foi parafusado o acelerômetro de elevada sensibilidade para registrar o nível de vibrações do rolamento, conforme figura 6-4, que através de cabo enviava as informações para o conjunto de aquisição. Também eram monitorados continuamente a temperatura do banho de óleo, através de termopar e termômetro de bulbo de mercúrio e a rotação do eixo de acionamento por tacômetro ótico.

Figura 6-4 Conjunto mancal-garto e reservatório do banho de óleo



6.2 Principais componentes da bancada
 Seguem abaixo as características construtivas dos principais componentes da bancada:

- Motor elétrico WEG de 0,5 HP, 2 polos, 220 V, rotação máxima de 3380 rpm, potência de 0,4 kw, capaz de variar a frequência do motor entre 0 e 60 hz;
- Variador de frequência marca Toshiba, modelo VF-ST, tensão de 220 V e de 30 mm (exceto na ponta de eixo do rolamento teste) e comprimento de 500 mm, dimensionado ao cisalhamento e a flexão, onde foram montados uma polia movida com correias em V e dois mancais de apoio,
- Eixo de aço 1020, acabamento retificado com tolerância IT 7, diâmetro nominal duas correias trapezoidais;
- Transmissão da rotação do motor para o eixo através de polias em V motora e

- Dois rolamentos de apoio rígidos de esferas tipo 6306, conforme figura 6-5., montados em duas caixas tipo SN, com vedadores tipo feltro, vedados e lubrificadas para a vida com graxa de sabão de lítio e óleo mineral conforme norma DIN KP2 K;

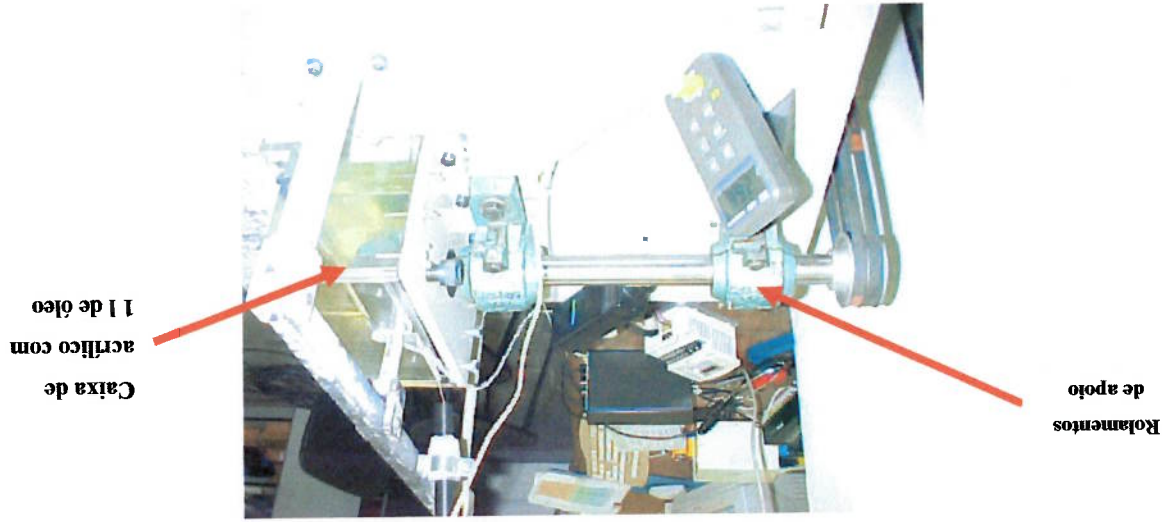


Figura 6-5 Detalhe superior da bancada de testes

- Caixa de acrílico com volume de óleo até a primeira esfera do rolamento de teste, drenagem do óleo, abertura superior para passagem de fios de instrumentação (vibração e temperatura); rolamento de teste 6205, marca NSK, com uma carreira de esferas, escolhido devido a sua baixa tolerância a desalinhamentos, pois teoricamente trabalha sobre um ponto de contato. Fabricado em aço SAE 52100, com dureza de 60 e 64 RC e dureza de esferas entre 58 e 62 RC, gaiola de aço 1020, folga normal e precisão de giro “standard”. O rolamento possui 7 esferas, têm diâmetro interno de 25mm, diâmetro externo de 47 mm, largura igual a 12 mm, C din igual a 14400 N ou 1430 kgf, com rugosidades informada pelo fabricante, sendo de 0,08 (Ra) para as pistas e 0,032 (Ra) para as esferas. O limite de rotação com óleo é igual a 18000 rpm. A interferência entre anel externo e face interna da carga foi H7.

6.3.Contaminantes

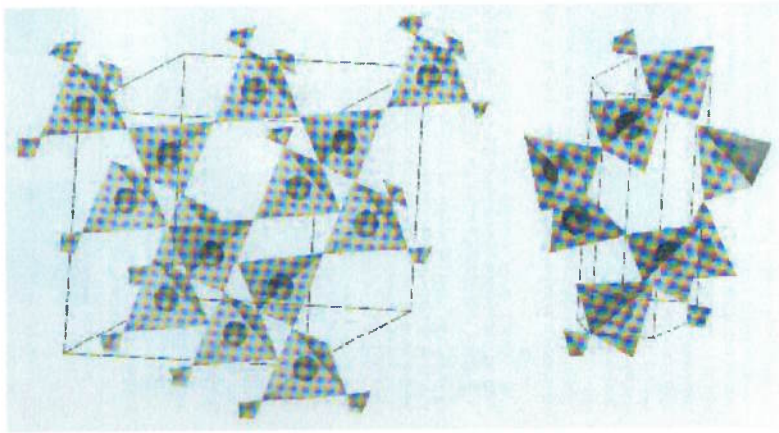
A escolha do contaminante para as experiências envolveu também a opinião de especialistas. Através da consulta a laboratórios especializados na detecção de partículas sólidas em óleos lubrificantes, constatou-se que em amostras de óleos

usados de um modo geral, submetidos a ensaios de ferrografia analítica, era frequente a presença de partículas amorfas de silício, com tamanhos variando entre 20 e 100 μm . Sabe-se que esse tipo de contaminante se origina tanto por limpeza deficiente durante a fase de posta em marcha (conforme observado na figura 1-1.), como também é resultado do ingresso de partículas no sistema durante a operação dos componentes.

Smallman e Bishop (1995) definem a sílica (SiO_2) como um mineral largamente utilizado nas indústrias de aço e de vidros. Pedras de sílica são preparadas através do aquecimento de quartzo de baixo conteúdo de pureza a temperaturas de 1450 °C. Os autores registram que a sílica possui três principais formas cristalinas modificadas em função da temperatura, que são a cristobalita, a tridimita e o quartzo, este último com modificações hexagonais α e β . Apesar de ser considerada inicialmente como frágil, o fato da sílica apresentar várias formas cristalinas que dependem da temperatura e transformações que envolvem deslocamentos de ligações e reorientações das direções das ligações, fazem com que, segundo Smallman, Bishop (1995), “seu comportamento durante a secagem no forno e posteriormente em condições de serviço seja um assunto complicado, particularmente pela presença de outras substâncias podem tanto catalizar ou esconder transformações”. Devido a esse comportamento, variações de dureza podem ser esperadas para esses minerais.

Retirada de Moffatt *et al* (1968), duas estruturas da sílica, o quartzo beta e a cristobalita são representadas na figura 6-6.

Figura 6-6 Duas das formas cristalinas do SiO_2 , mostrando as ordenações dos tetraedros Si-O (Moffatt, 1964)



Moffatt *et al* (1964) classifica as variedades de quartzos como cristais iônicos covalentes de baixo número de coordenação, poliedros aniônicos dispostos na forma empilhada para manter sua neutralidade elétrica e minimizar sua energia de ligação por unidade de volume, sem introduzir fortes repulsões entre íons de carga igual.

Hayden *et al* (1967) definem a sílica como materiais não metálicos inorgânicos de comportamento frágil, que no entanto sob procedimentos experimentais controlados, em algumas de suas formas cristalinas podem apresentar-se muito dúteis.

As amostras de sílica utilizadas nas experiências do presente trabalho foram obtidas comercialmente e trabalhadas no Laboratório de Caracterização Tecnológica da Eng. de Minas e do Petróleo – LCT – Poli. Foram inicialmente trituradas em moinho de rolos para em seguida serem submetidas a moagem complementar em moinho de bolas de ágata, num equipamento chamado de *Pulverizete I*, da marca Fritsch, a fim de se obter os pós em diversas faixas de tamanho. Na figura 6-7, têm-se uma idéia da forma do contaminante original e após moagem de pulverização.

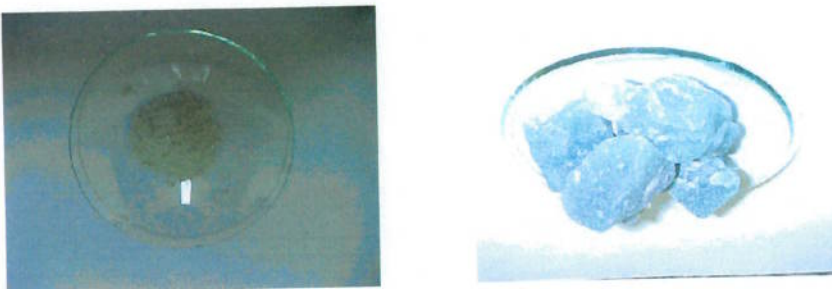


Figura 6-7. Quartzo em lascas e após moagem

Retira-se de Booser (1984) que o material quartzo (SiO_2) apresenta dureza média de 7 Mohs, o que equivale na escala de dureza Vickers a cerca de 1000 HV.

Mesmo sabendo-se que o valor da dureza do contaminante era praticamente o

mesmo das pistas e esteras do rolamento de teste, esse contaminante foi escolhido de

forma que as condições experimentais fossem adequadas para não produzir efeitos

catastróficos no rolamento durante os experimentos. A dureza das pedras foi

checada experimentalmente através dos métodos de Oliver-Pharr (Oliver; Pharr, 1992),

embutindo-se uma amostra do mineral e fazendo uso do nano-durômetro existente no

Laboratório de Fenômenos de Superfície – LFS/ Poli.

Após uma sequência de endentações e a utilização de cálculos e metodologia

disponível em programa específico de cálculo, o resultado médio fornecido foi de

910 HV, bastante próximo ao da literatura consultada. A conversão para dureza

Rockwell C resulta em aproximadamente 67 RC. Considerando-se as tolerâncias e

aproximações, foi considerado que as pistas do rolamento e o contaminante tinham

praticamente a mesma dureza.

Um conjunto de parâmetros estabelecidos como condições experimentais são:

- Contato de lubrificação inicialmente E H, em regime misto ou hidrodinâmico;
- Lubrificação contínua por banho de óleo;
- Baixas temperaturas de aplicação;
- Óleo lubrificante com elevado I.V. (índice de viscosidade), cerca de 90;
- Rotações relativamente baixas (máxima rotação = 3600rpm), se comparadas com o limite de rotação do rolamento que é de 18000 rpm, portanto apenas 20 % de sua velocidade limite;

- Relação C / P da aplicação baixa, onde C = capacidade de carga dinâmica e P = carga equivalente, para a maior condição de carga teremos $C / P = 10,48$, bastante baixa e adequada para rolamentos;
- Tratava-se de uma montagem de mancal em rolamento em banho de óleo agressivo, e não um ensaio dinâmico de deslizamento ou rolamento em meio abrasivo lubrificado;
- O tempo de operação em cada condição contaminada seria extremamente pequeno (menor que 1 hora para cada um dos quatro rolamentos utilizados em cada uma das fases experimentais);

Nestas condições, são fortes as possibilidades de não ocorrerem desgastes catastróficos no rolamento, mesmo em contato com uma abrasivo com dureza da mesma ordem de grandeza do rolamento.

Sayles; Macpherson *apud* Jacobson (1980), durante seus experimentos envolvendo testes de vida de rolamentos, mostraram que a utilização por 30 minutos de amaciamento em lubrificante contaminado (de dureza não reportada) cobriu cerca de 8 % a superfície com endentações, diminuindo em 10 vezes a duração da vida de um rolamento de rolos. As endentações das partículas de aço naquele óleo tornaram impossível a operação do componente mesmo o lubrificante foi limpo.

Apesar de nossa condição experimental ter sido projetada para não provocar endentações catastróficas nos componentes do rolamento, esta foi uma de nossas preocupações, visto que a concepção experimental contempla a contaminação dos rolamentos com elevada concentração de partículas cujo tamanho médio foi sempre superior a espessura do filme lubrificante. Ou seja, durante os experimentos esperava-se por uma modificação “forçada” do regime de lubrificação, que poderia estar passando de elasto-hidrodinâmico, com deformações elásticas dos componentes, para um regime de lubrificação mista ou limite, devido a entrada de contaminantes duros na conjugação de lubrificação E-H.

Uma vez obtido o pó de sílica, iniciou-se a classificação em faixas de tamanhos conhecidos, fazendo-se uso da técnica tradicional de peneiramento por via úmida. Essa técnica consiste em molhar a massa de pó a ser peneirado em água e

iniciar o peneiramento da mistura pó-água. Parte-se da peneira de malha mais aberta para a seguinte mais fechada, e assim sucessivamente. Ou seja, colocou-se toda a massa de pó de quartzo moído molhado sobre a tela da peneira com abertura de tela de 105µm, e mediante agitação contínua da peneira imersa numa bacia cheia de água, inicia-se a separação das partículas por frações granulométricas. O tamanho das aberturas das malhas metálicas das peneiras foram previamente escolhidos, segundo a classificação apresentada na tabela 6-1.

Tabela 6-1 – Sequência de malhas de peneiras para classificação granulométrica do pó de quartzo (LCT, 2003)

MALHAS (TYLER)	ABERTURA (mm)
20	0,840
28	0,597
35	0,420
48	0,297
65	0,210
100	0,149
150	0,105
200	0,074
270	0,053
325	0,044
400	0,037
635	0,020



Conforme tabela 6-1, para a execução da separação granulométrica dos contaminantes utilizados na parte experimental, foram usados as peneiras de malha 0,105, 0,074 (ou 0,075), 0,053, 0,044, 0,037, 0,020.

Uma vez a mistura úmida separada em classes conhecidas, cada lote de partículas separadas foi depositado em bacias de alumínio previamente limpas. A seguir essas bacias foram levadas a estufa, a uma temperatura de 60°C para secagem completa. O volume de pó de tamanho inferior a 20 µm teve que ser previamente decantado por um dia.

Após a retirada da estufa, cada fração granulométrica teve sua massa pesada em balança analítica de precisão centesimal.

O resultado final do peneiramento é mostrado na tabela 6-2. Das 174,38g de pó de quartzo pulverizado que originariamente iniciaram o peneiramento, foram medidas 171,55g, mostrando uma perda no processo de cerca de 1,62%, considerada normal devido a pequena quantidade de massa inicial.

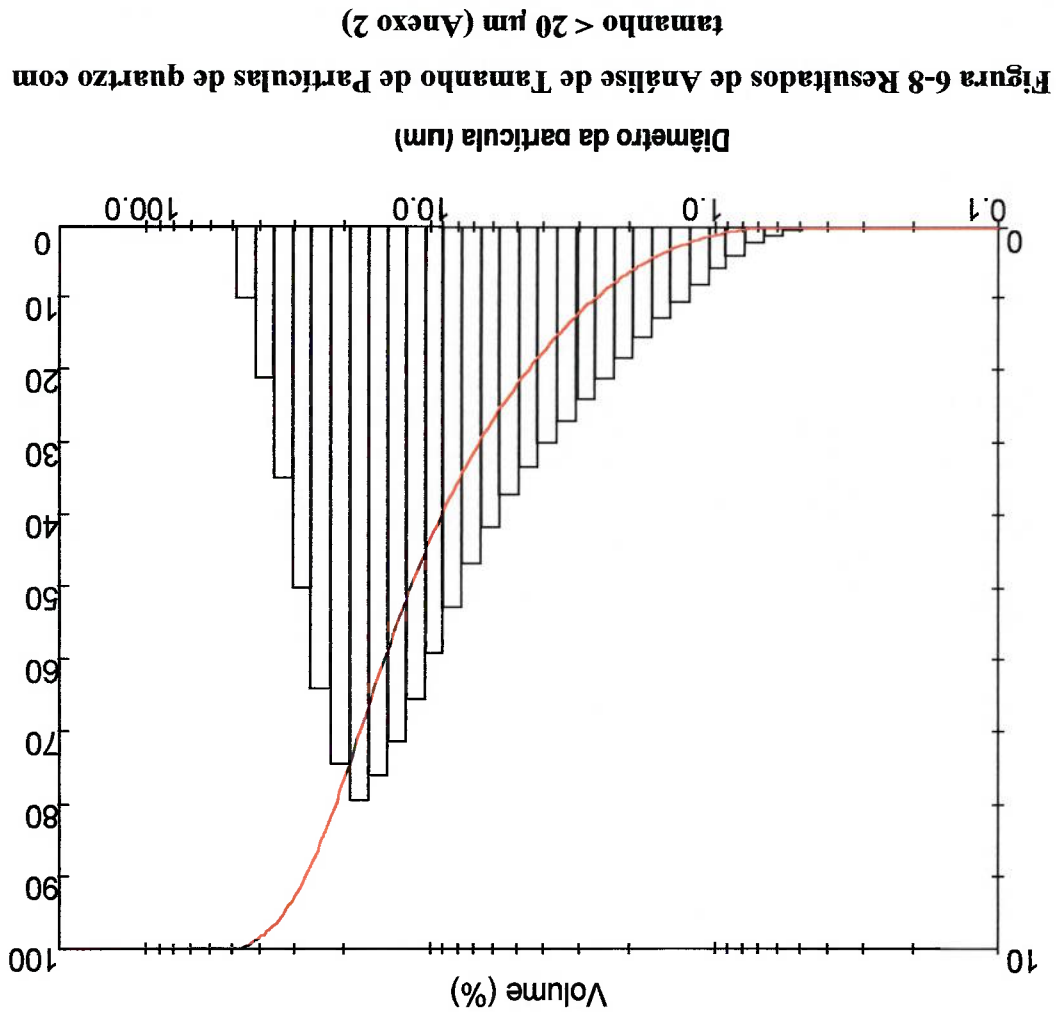
Tabela 6-2 Resultados da análise granulométrica do quartzo pulverizado (LCT, 2003)

		RESULTADOS DE ANÁLISE GRANULOMÉTRICA POR PENEIRAMENTO					
Cliente:	Marcello <th>Projeto:</th> <td>Mestrado/Ladim <th>Material:</th> <td>Quartzo pulverizado <th>Tipo de peneir.</th> <td>A úmido </td></td></td>	Projeto:	Mestrado/Ladim <th>Material:</th> <td>Quartzo pulverizado <th>Tipo de peneir.</th> <td>A úmido </td></td>	Material:	Quartzo pulverizado <th>Tipo de peneir.</th> <td>A úmido </td>	Tipo de peneir.	A úmido
Massa inicial (g):	174,38 <th>Data:</th> <td>7/8/03 <th>Local:</th> <td>LCT <th>Responsável:</th> <td>Marcello </td></td></td>	Data:	7/8/03 <th>Local:</th> <td>LCT <th>Responsável:</th> <td>Marcello </td></td>	Local:	LCT <th>Responsável:</th> <td>Marcello </td>	Responsável:	Marcello
MALHAS (TYLER)	ABERTURA (mm)	MASSA RETIDA (g)	% PESO	% ACUMULADA	% ACUMULADO	ABAIXO	
150	0,105	71,53	41,70	41,70	58,30		
200	0,074	15,09	8,80	50,49	49,51		
270	0,053	16,22	9,45	59,95	40,05		
325	0,044	5,50	3,21	63,15	36,85		
400	0,037	13,71	7,99	71,15	28,85		
450	0,032	1,68	0,98	72,12	27,88		
635	0,020	16,20	9,44	81,57	18,43		
Decantação	0,010	31,62	18,43	100,00	0,00		
		MASSA FINAL (g):	171,55	PERDAS:	2,83 g	1,62 %	

Essas partículas foram utilizadas em algumas dos ensaios iniciais. Numa segunda fase de ensaios, trabalhou-se exclusivamente com as faixas de tamanho entre 0 e 20 µm e entre 53 e 75 µm.

Para essas duas últimas faixas de tamanho de partículas, utilizadas na quarta fase experimental, foram realizados ensaios de análise granulométrica por espalhamento em luz laser de baixo ângulo, segundo procedimento que atende a norma ISO 13321, num equipamento MasterSizer da marca Malvern. Esse tipo de ensaio permite classificar percentualmente a distribuição em volume das partículas

da amostra, além de fornecer o diâmetro médio da partícula, e seu tamanho de 10, 50 e 90 % acumulados abaixo para a população de particulado na amostra. Observou-se através dos resultados dos ensaios de análise de tamanho de partículas, que o volume de partículas entre 0 e 20 µm apresentou um diâmetro médio de partículas de 16 µm, conforme figura 6-8. Para a faixa de tamanhos entre 53 e 75 µm, o diâmetro médio da partícula encontrado foi de 86 µm, conforme figura 6-9. Esta extrapolação explica-se em parte pelo próprio método de penetramento que por ser um método de retenção em um único plano, pode deixar passar tamanhos de partículas com volume médios superiores aos das faixas de penetramento utilizadas. Os laudos dos ensaios referentes a esses dois grupos de partículas encontram-se nos Anexos 2 e 3.



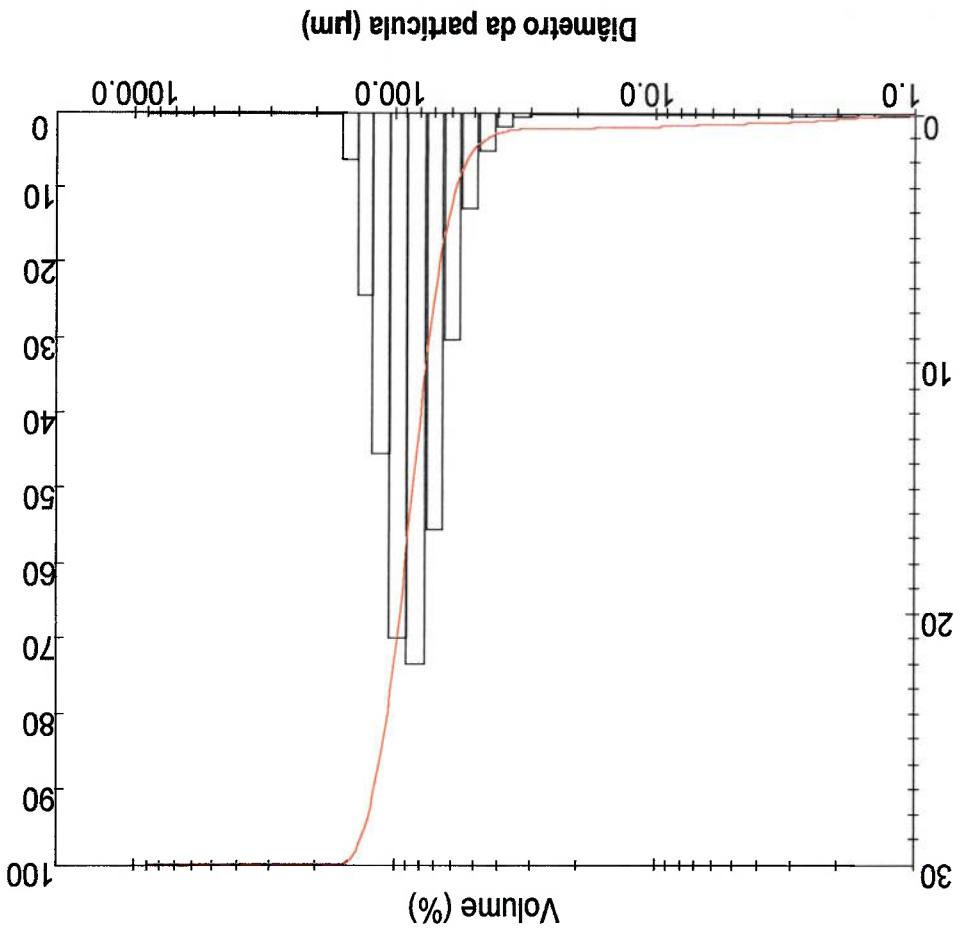


Figura 6-9 Resultados de Análise de Tamanho de Partículas de quartzo entre 53 a 75 µm (Anexo 3)

É importante frisar que dentro da faixa de contaminantes utilizados sempre estarão presentes partículas maiores, iguais e menores que aquelas originariamente classificadas pelo método de peneiramento.

Uma vez de posse do contaminante dentro das faixas de tamanho desejadas, foram preparadas amostras de óleo para cada condição experimental.

6.4 Óleos lubrificantes e procedimentos de contaminação

Foi utilizado nas experiências um óleo lubrificante básico parafínico e mineral puro, Neutro Leve, ISO 32, com viscosidade cinemática nominal de 32 cSt a 40°C. As características típicas do lote desse lubrificante encontram-se no Anexo 4.

A utilização de um lubrificante isento de aditivação se justifica pelo fato de que interações químicas entre as superfícies no contato lubrificado não foram objetos de avaliação, preferindo-se assim eliminar essa importante variável que poderia modificar as condições de contato. Assim, preferiu-se durante as experiências, fixar o tipo de óleo e sua viscosidade, variando-se apenas parâmetros de operação e condições de contaminação;

A fim de conseguir um nível de contaminação inicialmente baixo, necessário a primeira parte da experiência, o volume de óleo foi submetido a uma filtração externa conforme figura 6-10.

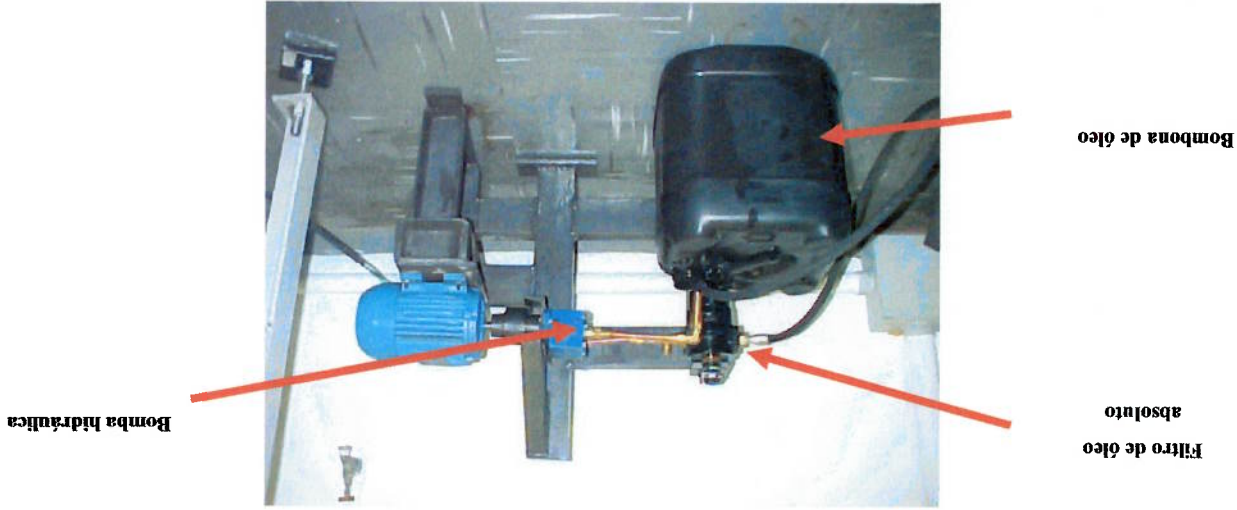


Figura 6-10 Sistema de filtração de óleo lubrificante

Foi realizada filtração absoluta prévia no óleo de teste através de filtro de pressão de $10 \mu\text{m}$, – marca HDA modelo FP 10 010 FV 06 B LV3, Betaplus 10, com $\beta_{10} \geq 200$, sendo a mesma realizada no próprio laboratório, que conta com um sistema motor-bomba-filtro incorporados. Dessa forma garantiu-se que o nível de contaminação do óleo tanto para a condição isenta de contaminação como para as condições prévias à inserção de contaminantes nas amostras de óleo eram extremamente baixas.

Uma vez de posse do óleo filtrado e dos contaminantes, passou-se a elaborar as amostras de óleos contaminados referentes as diversas condições experimentais. Para tanto, fez-se uso de frascos de plástico e de uma balança analítica. As massas de

quartzo eram rigorosamente pesadas em balança com precisão milesimal e adicionados aos frascos vazios. Em seguida, media-se com Becker graduado o volume de 1 litro de óleo limpo. Esse volume era vertido para o interior do frasco. Em seguida, mediante agitação constante a frio, o contaminante era solubilizado no óleo. Dependendo Em função do tamanho e da concentração do poluente, observaram-se para algumas condições, a decantação do contaminante no fundo dos frascos.

As amostras preparadas utilizadas em cada experimento estão descritas na tabela 6-3.

Tabela 6-3: Descrição das amostras de óleo utilizadas nos experimentos

Nome da condição experimental	Concent.	Massa de Quartzo (g)	Faixa de tamanho de quartzo (µm)	Volume de óleo (l)	1. ^a Fase	2. ^a Fase	3. ^a Fase	4. ^a Fase 1. ^o tamanho	4. ^a Fase 2. ^o tamanho
"s q" (contaminação natural do óleo)	0	Nenhum	Nenhum	1					
"3 d"	1,0 g/l	1,0	38 a 32						
"7 d"	1,0 g/l	1,0	75 a 53						
"1 d"	1,0 g/l	1,0	105 a 75						
"1 a"	0,010 g/l	0,010	105 a 75						
"1 b"	0,020 g/l	0,020							
"1 c"	0,10 g/l	0,10							
"1 d"	1,0 g/l	1,0							
"1 e"	2,0 g/l	2,0							
"1 f"	5,0 g/l	5,0							
"2 c"	0,10 g/l	0,10	20 a 0						
"2 d"	1,0 g/l	1,0							
"2 f"	5,0 g/l	5,0							
"2 g"	10,0 g/l	10,0							
"7 c"	0,10 g/l	0,10	75 a 53						
"7 d"	1,0 g/l	1,0							
"7 f"	5,0 g/l	5,0							
"7 g"	10,0 g/l	10,0							

Analisando-se a tabela 6-3, observa-se que a mesma condição de concentração "7 d" foi utilizada tanto na 2.^a como na 4.^a fase, sendo que a diferença

foi que tivemos agitação forçada de banho somente na 4ª fase. Da mesma forma, a condição "1 d", foi utilizada nos experimentos referentes às 2ª e 3ª fases. A partir do momento que toda a instrumentação da bancada estava preparada, as amostras de óleo eram derramadas no interior da cuba.

6.5. Montagem do conjunto de teste

O primeiro passo para se iniciar a aquisição de dados era a montagem do rolamento no mancal de teste.

Rolamentos NSK 6205 novos foram fornecidos com a informação prévia do valor de sua folga radial original medida. Em virtude do rolamento ser fornecido com óleos protetivos anti corrosivos, submetia-se os mesmos a uma lavagem prévia. O mesmo era lavado em banho de ultrassom inicialmente com solvente *thinner* e em seguida com álcool isopropílico. O mesmo procedimento era realizado com os dois anéis de encosto do rolamento. A caixa do rolamento também era previamente lavada e desengraxada. Em seguida montava-se o rolamento no alojamento da caixa entre os dois anéis, fechava-se e parafusava-se a mesma. Tomava-se cuidado de não girar o rolamento para não provocar riscos nas pistas e esferas.

Em seguida, fazendo uso de uma morsa, fixava-se o garto de transmissão na base rosçada do mancal de teste, conforme figura 6-4. No furo foi colocada uma aruela de pressão de modo a tornar essa fixação o mais rígida possível. O mancal era travado axialmente no eixo com um parafuso, fazendo com que o anel interno do rolamento ficasse solidário ao movimento do eixo.

O acelerômetro foi então fixado na base superior do mancal e conectado por cabo ao amplificador de carga.

Em seguida, fazendo uso de pinos de aço dimensionados ao cisalhamento, se fixava o braço da alavanca em três pontos: no braço esquerdo que era fixo à bancada, ao garto do mancal e à barra suporte de contra pesos. Dessa forma garantia-se que toda a carga vertical aplicada pelos contra pesos eram ampliadas por ação do momento do braço e aplicadas radialmente ao mancal de teste. O termopar foi fixo na barra de transmissão de força, de modo a medir a temperatura do banho com seu filamento fixo sempre na mesma posição. O tacômetro era posicionado.

Em seguida, fixava-se a caixa de acrílico, parafusando seu fundo na base da bancada e sua face aberta na placa de apoio frontal. O ralo da caixa era posicionado de modo a não permitir a saída do volume do óleo de teste

Com o sistema todo montado, vertia-se o lubrificante de teste no interior da caixa. Acionava-se o motor elétrico através do variador de frequência e o conjunto entrava em funcionamento.

Quando se mediu vibrações conjuntamente com o aparelho de contagem de partículas, adaptava-se uma mangueira coletora de fluido no interior do banho e posicionava-se a mangueira de retorno de fluido no lado oposta ao da sucção, conforme figura 6-13.

Também neste momento, ajustava-se o termostato para aquecimento do banho de óleo.

Realizava-se uma checagem geral nos acionamentos, verificando ruídos e possíveis vazamentos. Feita esta avaliação e não encontrando anormalidades, o conjunto era considerado apto para ensaios.

6.6. Cadeia de medidas

Foi utilizado uma instrumentação para monitoramento da vibração, da rotação do eixo e monitoramento da temperatura do banho de óleo. Os componentes da bancada de aquisição de dados de vibrações foram compostos por:

- Acelerômetro piezoelétrico Brüel & Kjær, modelo 4393
- Sensitividade de carga: 0,320 pC/ms⁻²
- Sensitividade de voltagem: 0,427 mV/ms⁻²
- Meios de uso: selado contra umidade;
- Range de temperatura: -74 até +250 °C
- Faixa útil de frequência: 0 até 10 KHz
- Frequência de ressonância: 55 KHz
- Amplificador de carga e condicionador Brüel & Kjær, tipo 2635
- Faixa de amplificação – 0,1 até 10 KHz
- Faixa útil de frequência: 0 até 100KHz
- Sensibilidade até 10V/pC

- Configuração utilizada:
 - Sensibilidade: 0.32
 - Lower acc: 2 Hz
 - Upper: 10 KHz
- Acelerômetro PCB, modelo 480B10 (utilizado nas aquisições com contagem de partículas simultânea)

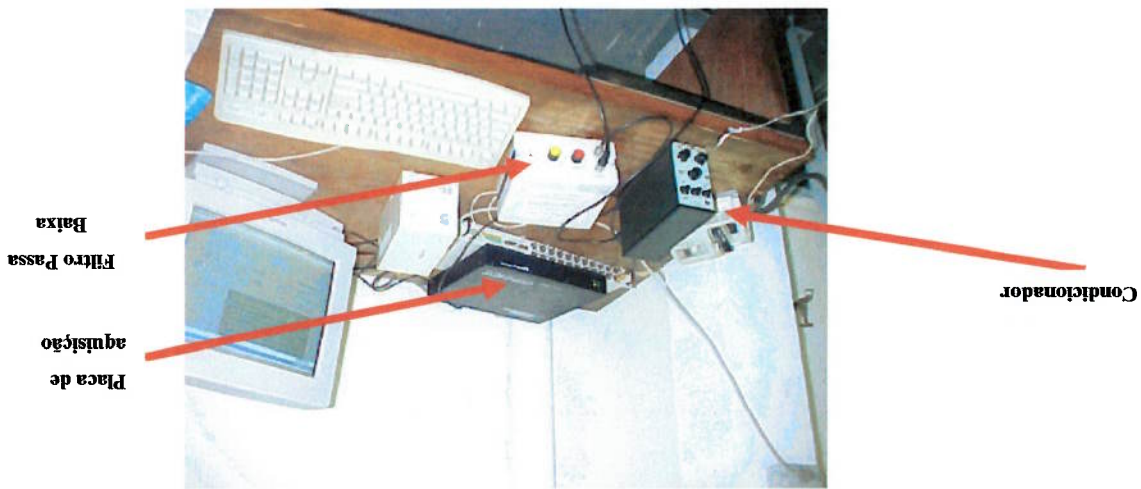
- Sensitividade de voltagem: $2,04 \text{ mV/ms}^{-2}$
- Range de temperatura: -754 até $+121$ °C
- Faixa útil de frequência: 0 até 10 KHz
- Frequência de ressonância: 55 KHz
- Condicionador integrador PCB, modelo 480B10
 - Saída em aceleração
- Amplificador e Filtro de Passa Baixa Butterworth de 6° ordem
 - Ganho variável de 1, 5, 10, 50, 100 e 500
 - Frequência de corte variável de 100Hz, 2, 5, e 10 KHz.
- Configuração utilizada: Ganho de 100 Hz e Freq. Corte de 10 KHz
- Sistema de aquisição: Fabricação National Instruments, modelo: DAQpad – 6070E

Este equipamento tem uma resolução de 12 bits, com 16 terminais analógicos. Possui ganho de 1 – 2 – 5 – 10 – 20 – 50 e 100, de 0 a 10 V; e de –5 a 5 tem 0,5 – 1 – 2 – 5 – 10 – 20 – 50 e 100 para diversos níveis de sinais. A máxima taxa de amostragem (um canal) é 1,25 MS/s.

Para o monitoramento contínuo do banho de óleo foi utilizado um termômetro digital da marca TES, modelo TFS 1300, faixa de temperatura de –50 a 1300°C e resolução de 0,1°C. Foi conectado a ele o acessório TP-K02, termopar de arame indicado para a medição da temperatura de líquidos.

Para a verificação esporádica da rotação do eixo de acionamento utilizou-se um tacômetro de luz da marca Lutron, modelo DT 2236, que registrou as medições em rpm.

Figura 6-11: Cadeia de medidas
A figura 6-11 ilustra o aparato utilizado para as aquisições de vibrações.



6.7. Procedimentos de ensaios

Será descrito agora o procedimento utilizado para a aquisição dos sinais de vibrações e do registro da contaminação no óleo através do uso do contador de partículas.

6.7.1. Início da aquisição de dados

Com a parte mecânica toda montada e ajustada, acionava-se o filtro, a placa de aquisição e o programa LabView. Observa-se então o formato inicial do sinal de vibração na tela do computador.

Antes de dar início à aquisição de dados os ruídos de medição foram avaliados e registrados. Procurou-se obter um aterramento adequado de toda a instrumentação. Assim sendo, foram feitas verificações do nível de ruído com acelerômetros fora da bancada e acoplados na base de fixação do mancal. Os sinais foram coletados quando o nível de ruído era inferior a 5 % do nível máximo do sinal.

6.7.2. Parâmetros de aquisição

Alguns parâmetros experimentais foram impostos, medidos e calculados e outros foram apenas registrados. Na tabela 6-4, explica-se como alguns desses dados foram obtidos. A tabela que segue estabelece um resumo dos parâmetros utilizados nos ensaios. A designação N.A. identifica que a informação da tabela não é aplicável a aquele item.

Nas condições experimentais utilizadas, não foi possível medir a espessura do filme lubrificante do rolamento no banho de óleo. Pelas referências bibliográficas consultadas, considerou-se que esse parâmetro pode influenciar na assinatura dos sinais de vibrações. Porém, utilizando o modelo de Hamrock (1984) em seu capítulo sobre lubrificação elasto-hidrodinâmica, foi feita uma estimativa dessa espessura para cada condição experimental. Os dados utilizados para o cálculo são mostrados na tabela 6-5.

Dos valores que tiveram que ser adotados para a realização dos cálculos, os valores do módulo de elasticidade pista – esfera (E) e da relação de Poisson pista-esfera (ν) foram retirados da própria literatura consultada. O coeficiente pressão viscosidade do lubrificante (η_0) foi retirado de Neale (1993). O valor da viscosidade do lubrificante (η) foi calculado para a temperatura de trabalho e suas unidades foram transformadas para viscosidade dinâmica ($N.s/m^2$).

Os cálculos foram realizados com um auxílio de uma tabela em Excel e contaram com as seguintes fases:

- Cálculo dos raios equivalentes;
- Cálculo do α_0 para avaliação da natureza do contato Hertziano;
- Cálculo do parâmetro de ellipticidade;
- Cálculo das integrais elípticas;
- Cálculo do módulo de elasticidade efetivo;
- Cálculo da máximas compressões elásticas locais;
- Cálculo da esfera mais carregada, utilizando o critério de Stribeck;
- Cálculo da velocidade média na direção do movimento;
- Cálculo do parâmetro adimensional de velocidade;
- Cálculo do parâmetro adimensional de carga;
- Cálculo do parâmetro adimensional de materiais;
- Cálculo do parâmetro adimensional de espessura de filme de lubrificação E-H;
- Cálculo da espessura mínima de filme na conjugação pista interna-esfera;
- Cálculo da espessura mínima de filme na conjugação pista externa;
- Cálculo dos parâmetros de lubrificação λ .

Tabela 6-5. Parâmetros para cálculo da espessura do filme de óleo

Simbolo	Componente	Parâmetro	Valor	Unidade	Fonte
di	• Rolamento	Diâmetro Pista Interna	31,062	mm	◆ Inf. Fabricante
do	• Rolamento	Diâmetro Pista Externo	46,938	mm	◆ Inf. Fabricante
d	• Rolamento	Diâmetro da Esfera	7,9375	mm	◆ Inf. Fabricante
N	• Rolamento	N.º de esferas	9	-	◆ Da literatura
Ri	• Rolamento	Raio Interno do Furo	4,02	mm	◆ Calculado
Ro	• Rolamento	Raio Externo do Furo	4,02	mm	◆ Calculado
β	• Rolamento	Ângulo de Contato	0	°	◆ Calculado
Ab	• Lubrificante	rms acabam. sup. das esferas	0,032	µm	◆ Calculado
Aa	• Lubrificante	rms acabam. sup. das pistas	0,08	µm	◆ Calculado
E	• Da experiência	Módulo Elasticidade Pista	$2,0 \times 10^{11}$	N/m ²	◆ Da literatura
v	• Rolamento	Relação de Poisson Pista	0,3	-	◆ Calculado
ηo	• Lubrificante	Viscosidade Dinâmica	0,08	N.s/m ²	◆ Calculado
νo	• Lubrificante	Coefficiente Pressão	$2,43 \times 10^{-8}$	m ² /N	◆ Calculado
Fr	• Componente	Carga Radial	Variável	N	◆ Calculado
fi	• Componente	Velocidade Angular Pista Interna	Variável	rad/s	◆ Calculado
fo	• Componente	Velocidade Angular Pista Externa	Variável	rad/s	◆ Calculado

A partir desses cálculos, chegou-se aos valores teóricos de espessura de filme, mostrados na tabela 6-6.

Tabela 6-6: Valores teóricos calculados de espessura de filme lubrificante para cada condição experimental

Avaliação do Regime de Lubrificação	Espessura	Conjunção Pista	Frequência de Rotação (Hz)	Carga Radial (N)	Espessura	
					Interna - Esfera hi	(10 ⁻⁷ µm)
Parâmetro de Lubrificação (λ)	Espessura	Conjunção Pista	Frequência de Rotação (Hz)	Carga Radial (N)	Parâmetro de Lubrificação (λ)	
					Externa - Esfera ho	(10 ⁻⁷ µm)
Elasto - Hidrodinâmico	20	2,9718	3,4	358,81	3,5805	4,2
	30	3,9152	4,5	358,81	4,7172	5,5
	40	4,7611	5,5	358,81	5,7364	6,7
	50	5,5413	6,4	358,81	6,6765	7,7
	60	6,2727	7,3	358,81	7,5577	8,8
	20	2,7951	3,2	841,46	3,3676	3,9
	30	3,6824	4,3	841,46	4,4368	5,1
	40	4,4781	5,2	841,46	5,3955	6,3
	50	5,2119	6,0	841,46	6,2795	7,3
	60	5,8998	6,8	841,46	7,1084	8,3
	20	2,7027	3,1	1338,59	3,2564	3,8
	30	3,5608	4,1	1338,59	4,2903	5,0
	40	4,3302	5,0	1338,59	5,2173	6,1
	50	5,0397	5,8	1338,59	6,0722	7,0
60	5,7050	6,6	1338,59	6,8737	8,0	

Pela fórmula apresentada no item 4.5, a espessura do filme está vinculada diretamente à velocidade (expoente 0,68) e de forma indiretamente proporcional à carga (expoente de - 0,73). Ou seja, tanto maior será a espessura do filme teórica obedecida pelas condições teórico-experimentais estabelecidas, conforme pode ser observado pelos resultados da tabela 6-6.

Outro fato a ser destacado é que os valores calculados utilizando a seqüência de cálculos proposta em Hamrock (1984) apresentaram-se bastante adequados, se considerarmos as condições da aplicação experimental.

6.7.3. Procedimentos de aquisição

Uma vez instalada e checada toda a cadeia de medidas, parte-se para a aquisição experimental e para a montagem do banco de dados de cada condição experimental. A sequência utilizada foi a seguinte:

- Inicia-se o funcionamento da bancada, acionando o variador de frequência, que faz movimentar o eixo de acionamento;
- Checa-se se o sistema de lubrificação do rolamento teste está funcionando adequadamente, com circulação, sem vazamentos e com temperatura do rolamento adequada;
- Verifica-se o funcionamento dos acelerômetros e do sinal de vibração;

- Através do termostato no interior do banho de óleo, faz-se com que a temperatura do banho permaneça constante, variando entre 26 e 28 °C, conforme figura 6-12;

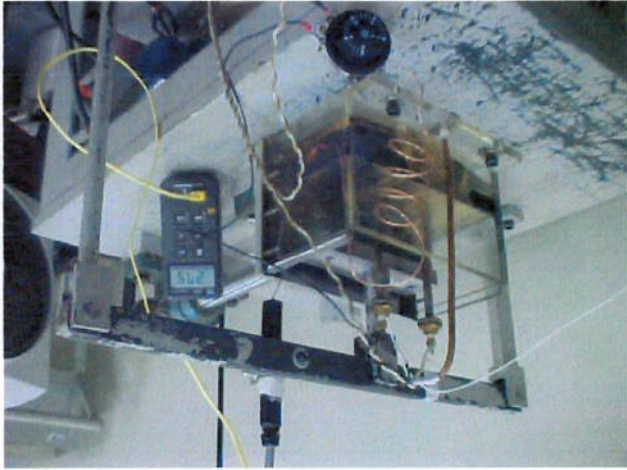


Figura 6-12 Aquecimento do banho de óleo por termostato

- Quando trabalhou-se com o contador de partículas a laser acoplado ao banho de óleo, simultaneamente ao início de aquisição do sinal de vibração, era realizada uma medição do nível de contaminação instantâneo do banho de óleo. Importante registrar que as aquisições *on line* foram realizadas de modo que o equipamento não fosse influenciado pela presença de bolhas no banho de óleo. Isto foi conseguido através da colocação de chicanas de plástico no interior da caixa de acrílico. A figura 6-13 ilustra essa operação;



Figura 6-13: Registro de contaminação com contador de partículas

- O certificado de aferição do contador de partículas usado na parte experimental e que foi calibrado segundo a norma ISO 4402, encontra-se no **Anexo I**
- Aciona-se o programa para adquirir os dados dos sinais de vibrações do rolamento de teste;
- Os parâmetros de aquisição fixados foram: frequência de amostragem = 21000 Hz e 43000 pontos adquiridos;
- Adquire-se o sinal no computador com 9 amostras contínuas, anotando-se o nome do arquivo gravado e as respectivas grandezas fixadas nas condições de ensaio (nível de contaminação, temperatura do óleo, carga, velocidade, ganho dos filtros, etc.) .
- Variam-se cargas dos contra pesos e rotações, certificando-se sempre que a temperatura do banho no momento da aquisição permaneça sempre dentro da faixa estabelecida;
- Terminada a sequência de 15 condições experimentais sucessivas, checa-se no computador se os arquivos foram devidamente registrados, e daí parte-se para uma nova condição experimental;
- Substituição do óleo do rolamento, mudando-se a condição de contaminação. Quando mudou-se apenas a concentração com o mesmo tamanho de sujeira, foi realizada apenas a drenagem completa do óleo da caixa. Quando alteravam-se os tamanhos dos contaminantes, além da drenagem, a caixa de acrílico e a placa de anteparo eram desmontadas, lavadas com solvente, enxugadas e recolocadas no local;

- Importante registrar que entre os intervalos de aquisições, a caixa com o mancal de rolamento permanecia sempre montada no eixo de acionamento. Também nenhum parâmetro da bancada era ajustado ou modificado, no sentido de alterar as condições previamente fixadas no início da série de aquisições;
- Assim, concluída uma sequência de aquisições, nova montagem era providenciada e uma nova condição experimental realizada, repetindo-se os passos anteriormente descritos.

6.7.4. Abordagens experimentais

A parte prática foi idealizada com duas abordagens distintas e quatro experimentos diferentes. A primeira abordagem foi focada em se conhecer a informação da contaminação, medi-la e observar seu comportamento. A segunda abordagem foi concebida no sentido de comparar condições de óleos isentos e com contaminantes, registrar suas vibrações e aspectos característicos referentes a folga interna do rolamento, rugosidades, características superficiais dos componentes e análise de resíduos de desgaste nos óleos testados.

Com os três primeiros experimentos, utilizando em cada um, um rolamento diferente, e fazendo uso de um contador de partículas automático instalado de modo a registrar o nível de contaminação do óleo no banho, objetivou-se registrar o comportamento do nível de contaminação ISO do óleo, ao mesmo tempo em que registravam-se sinais de vibrações do rolamento.

Foram medidas conjuntamente o nível de contaminação (pelo contador de partículas) e sinais de vibrações para as seguintes condições:

- condição experimental sem contaminação por quartzo, denominada “sq”, constituída por rolamento em banho de óleo isento de contaminantes externos (contaminação natural aleatória);
- condição experimental com contaminantes adicionados, denominadas “3d, 7d e 1d”, constituída por rolamento em banho de óleo com contaminantes de concentração fixa e faixa de tamanhos diferentes;

- condição experimental com contaminantes adicionados, denominadas "1a, 1b, 1c, 1d, 1e e 1f", constituída por rolamento em banho de óleo com contaminantes de faixa de tamanho fixa e concentração variável.

No entanto, vale ressaltar que essas condições experimentais tinham algumas restrições. Os ensaios, aquisições e registros eram realizados de maneira contínua, ou seja, faziam-se cinco aquisições com um carregamento e em seguida, mais cinco aquisições com um segundo carregamento. Ao passo que a cadeia de medidas levava em média quarenta segundos para adquirir e registrar consecutivamente nove sinais de vibrações do rolamento, o contador de partículas levava cerca de cento e vinte segundos para completar um ciclo de medição da contaminação do óleo. Mesmo sabendo-se que as velocidades de registro e processamento das informações eram diferentes, tentou-se com estas três primeiras sequências, registrar o comportamento geral dessas duas características ao longo das aquisições. Ou seja, o objetivo foi investigar se o processo de contaminação, definido tanto pela quantidade total de contaminantes no óleo, como pela evolução da contaminação por faixas de tamanhos de partículas, poderia influenciar na assinatura do sinal de vibrações do rolamento.

O quarto e último experimento teve outro direcionamento. Agora sem a utilização conjunta de um contador automático de partículas, e simplesmente registrando vibrações, a ideia foi investigar eventuais diferenças entre sinais de vibrações de rolamentos em banho de óleo sem contaminantes comparativamente a sinais de rolamento em banho de óleo com contaminação conhecida. Nessa condição também foram investigadas as rugosidades, folgas internas e superfícies das esferas e de pistas antes e depois da contaminação, além dos resíduos de desgaste e de contaminação presentes no óleo lubrificante. O objetivo agora foi investigar o comportamento do processo de contaminação, mas sim, registrar a assinatura do sinal de um rolamento bom em óleo considerado limpo e, por comparação, pesquisar se essa assinatura era ou não influenciada pela presença de contaminantes sólidos de procedência conhecida. Nesse contexto, fixaram-se duas faixas de tamanho de partículas e realizaram-se aquisições variando as concentrações dos contaminantes, sempre comparando-os com os sinais de vibração registrados de condições sem contaminantes. Ou seja, no quarto experimento o foco maior foi a comparação, ou

seja, buscou-se comparar se os valores de RMS da aceleração sofreram alteração com a entrada de contaminantes no banho de óleo do rolamento.

6.8. Processamento de sinais

O processamento das informações adquiridas teve como base os sinais de vibrações mecânicas no domínio do tempo. Pretendeu-se comparar os sinais de vibrações das diversas condições experimentais a fim de verificar se existem ou não comportamentos distintos que possam a ser influenciados pelo nível de contaminação do óleo.

As técnicas existentes para a detecção de defeitos ou anormalidades em mancais de rolamento podem ser divididas em duas categorias: o método no domínio do tempo e método no domínio da frequência. Exemplos de métodos no domínio do tempo são os valores de nível de picos, RMS, análise do fator de cresta, análise da *kurtosis* e contagem de pulsos de choque.

As diversas técnicas de análises no domínio de frequência foram desenvolvidas para avaliar periodicidades contidas no sinal temporal. São exemplos a análise de espectro, a análise de *cepstrum*, análise de altas frequências de ressonância e a análise de envelope.

Especificamente para este trabalho, decidiu-se trabalhar exclusivamente com a informação do **RMS da aceleração do sinal**, por entendermos ser esse parâmetro estatístico capaz de identificar adequadamente as diferenças entre os sinais de óleos limpos e contaminados.

Para o processamento dos sinais deste trabalho utilizou-se a ferramenta Mat Lab[®]. Desenvolveu-se um programa com as seguintes características:

- Carregar automaticamente os sinais de cada aquisição experimental;
- Centrar os sinais e convertê-los em unidades de aceleração;
- Calcular o RMS de sinal inteiro (RMS SI) da aceleração e o desvio padrão dos RMS entre as diversas amostras para uma dada condição experimental;
- Calcular RMS de altas e baixas frequências (RMS AF e BF) e o desvio padrão dos RMS das diversas amostras de sinais;

- Após todos as variáveis terem sido calculadas e transformadas em bancos de dados, partiu-se para a elaboração de programas que gerassem gráficos dos resultados calculados. O gráfico de RMS da aceleração X rotação foi uma determinada carga radial aplicada foi largamente utilizado;
- A escolha das faixas de frequência de corte envolveu a análise da possível localização adequada da informação do sinal. A figura 6-14, espectro gerado na fase inicial do trabalho, sugere que uma faixa de corte de frequência adequada seria a de 0 a 8 KHz e de 8 a 10,5 KHz uma faixa de frequências

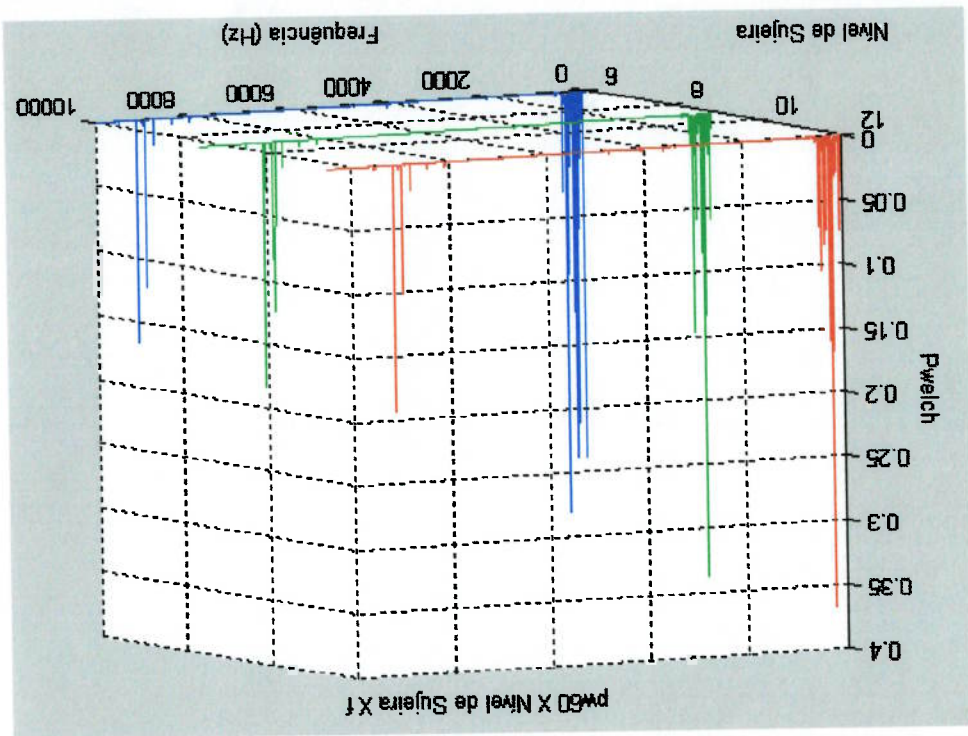


Figura 6-14: Espectro do sinal com 60 Hz rotação - Definição das freq. corte.

- Os RMS de AF e BF correspondem ao sinal filtrado passa banda, entre 8,0 e 10,5 KHz e passa baixa, a 8,0 KHz. A razão de separar estas duas bandas é de obter um maior detalhamento da distribuição de energia na composição espectral
- Assim, serão mostrados gráficos do RMS da aceleração de três formas distintas:
- Gráficos do RMS da aceleração aplicados ao sinal inteiro, ou seja, abrangendo a frequência de 0 a 10.500 Hz, que será por praticidade chamado de RMS SI;

- Gráficos do RMS da aceleração aplicados a altas frequências, ou seja, abrangendo a frequência de 8.000 a 10.500 Hz, que será por praticidade chamado de RMS AF;
- Gráficos do RMS da aceleração aplicados a baixas frequências, ou seja, abrangendo a frequência de 0 a 8.000 Hz, que será por praticidade chamado de RMS BF.

Os filtros utilizados nas operações foram os seguintes:

- Filtro tipo IIR Chebyshev, ordem 5, passa baixa, freq. corte de 1 KHz;
- Filtro tipo IIR Chebyshev, ordem 5, passa alta, freq. corte de 8 KHz.

As funções do Mat Lab[®] utilizadas para essas operações de filtragem são mostradas no Anexo 7.

Da apostila do curso de processamento de sinais aplicado à Engenharia Mecânica preparado por Padovese (2001) se extraiu os seguintes métodos de processamento de sinais:

Variância ou valor quadrático médio do sinal centrado.

$$E_{[x^2(t)]} = \frac{1}{N} \sum_{t=1}^N (x_t - m)^2 \quad \text{onde } m \text{ é o valor médio do sinal}$$

$$m = \frac{1}{N} \sum_{t=1}^N x_t \quad \text{O sinal centrado é: } \bar{x}^{(t)} = x^{(t)} - m$$

Esta expressão corresponde a uma filtragem do sinal no domínio da frequência. Ou seja, corresponde a zerar as amplitudes no espectro de frequências na frequência zero e próxima a zero.

$$\text{Desvio padrão: } \sigma = \sqrt{E_{[x^2(t)]} - \text{RMS ou valor eficaz } V_{ef} = \sqrt{E_{[x^2(t)]} - m^2}}$$

Dentro da abordagem do experimento, o RMS caracteriza a energia do sinal. Toda apartição de anormalidades se traduz por um aumento do nível vibratório da máquina

6.9. Avaliação das superfícies após ensaios

Como já foi dito anteriormente, para o quarto experimento foram feitos registros da folga interna e da rugosidade dos componentes do rolamento. Faremos citações sobre essas duas medições.

Em NSK (2002), encontra-se que "a folga do rolamento é o jogo entre o anel interno, anel externo e os corpos rolantes. Isto é, fixando qualquer um dos anéis, interno ou externo, a folga é a intensidade de deslocamento do outro anel, quando movimentado para cima e para baixo, ou para a direita e para a esquerda.(vide figura 6-15). Esta intensidade de deslocamento na direção radial e na direção axial são definidas, respectivamente, como folga radial e folga axial."

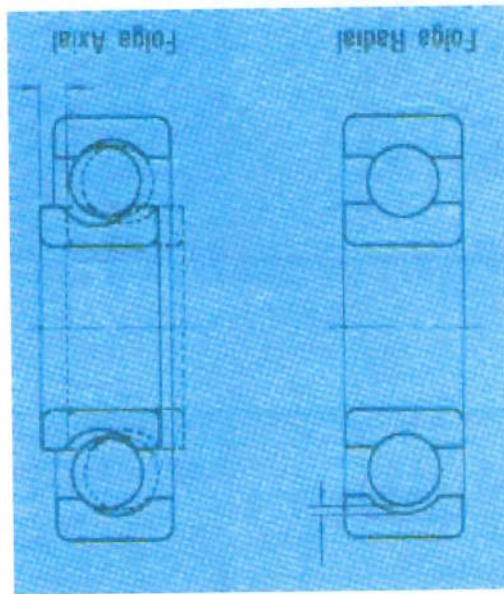


Figura 6-15 Folga interna do rolamento (NSK, 2002)

Sabe-se que os valores de folga interna radial de um rolamento impactam diretamente em sua expectativa de vida. Um rolamento 6208 que em serviço apresentar acréscimo de cerca de 20 µm em seu valor de folga radial, dependendo da carga suportada, poderá ter sua vida nominal diminuída em até 20 %.

Através de consulta a referência citada, em sua tabela 9.9, encontra-se que para rolamentos fixos de esferas com diâmetro de furo entre 24 e 30 mm, a folga interna radial para rolamentos com folga normal deve estar compreendida entre um mínimo de 5 e um máximo de 20 µm. A folga real deve ser obtida corrigindo-se a folga de medição do aumento da folga devido a deformação elástica. O valor de correção da folga para rolamentos com diâmetro nominal do furo entre 18 e 50 mm e folga classe normal, vale segundo NSK (2002), 5 µm.

Stachowiak, Batchelor (2001) colocam que as alturas características das rugosidades são comumente descritas por parâmetros, tais como a linha de centro

média ou idade média (CLA ou simplesmente "R_a", conforme pode ser visto na figura 6-16.. O parâmetro é definido pela fórmula abaixo, sendo L o comprimento da amostra (m) e z a altura do perfil longitudinal 'x' (m).

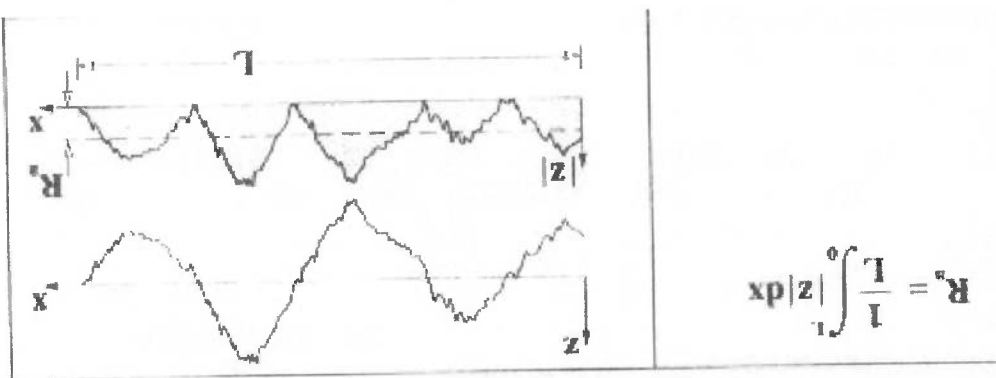


Figura 6-16 Rugosidade média R_a (Stachowiak, Batchelor, 2001)

O fabricante dos rolamentos reportou os seguintes valores de rugosidade para rolamentos fixos de esferas da mesma classe dos utilizados nos experimentos:

- Esferas: 0,032 R_a-µm
- Pistas dos anéis externos: entre 0,08 a 0,10 R_a-µm
- Pistas dos anéis internos: entre 0,063 e 0,08 R_a-µm

Jacobson (2000) sugere que a rugosidade das superfícies lubrificadas com lubrificantes contaminados tendem a aumentar e ter sua inclinação variada em função do tamanho, forma, dureza e tenacidade da partícula. A contaminação irá determinar se o dano as superfícies será permanente ou se será possível haver novo contato entre as superfícies quando o lubrificante for limpo.

Assim como já foi citado anteriormente, também Stachowiak, Batchelor (2001), em seus capítulo Lubrificação Elasto-Hidrodinâmica e Desgaste por Fadiga, fazem ponderações sobre o impacto das rugosidades na determinação do parâmetro λ, que é caracterizado pela relação entre a espessura mínima do filme e a rugosidade composta das superfícies.

$$\lambda = h_0 / (\sigma_A^2 + \sigma_B^2)^{0,5}$$

sendo σ_A e σ_B os RMS das rugosidades superficiais dos corpos em contato.

Essa metodologia será utilizada no quarto experimento para se avaliar os impactos dos contaminantes sólidos na rugosidade das superfícies do rolamento.

7 RESULTADOS EXPERIMENTAIS

*“Bem mais que o tempo que nós perdemos
ficou pra trás também o que nos juntou
Ainda lembro, que eu estava lendo
Só pra saber o que você achou
dos versos que eu fiz
e ainda espero resposta” ...
Resposta – Cantu: Skank*

Este capítulo apresenta os resultados obtidos nos ensaios experimentais, agrupados segundo quatro fases experimentais distintas. Cada uma destas quatro fases é apresentada e detalhada quanto às condições experimentais utilizadas e resultados obtidos. Ao final de cada fase experimental é feita uma discussão comentada dos resultados. As conclusões finais foram registradas no capítulo 8.

7.1. 1.ª Fase Experimental: Medições de contagem de partículas e de vibrações realizadas em condição de lubrificante isento de contaminante

Estes resultados referem-se à primeira fase da parte experimental onde os sinais de vibrações foram medidos numa condição de lubrificação em que o óleo foi **preparado** como limpo. Objetivou-se avaliar o comportamento da vibração para um rolamento utilizando um óleo considerado limpo. Investigou-se as influências do carregamento radial e das velocidades de rotação. Ao mesmo tempo que se realizaram as medições de vibrações também utilizou-se um contador de partículas a laser Hydac FCU 2110-4, para monitoramento de possíveis alterações da contaminação do banho lubrificante.

7.1.1. Resultados das medidas do nível ISO de contaminação pelo contador de partículas

A tabela 7-1 registra a variação do grau ISO / NAS de contaminação do óleo em cada uma das quinze condições experimentais registradas. As aquisições foram realizadas na ordem informada pela tabela, ou seja, a primeira condição registrada foi a de rotação do eixo em 20 Hz e carga radial no rolamento de 36,58 kg, e a última condição utilizada foi a de rotação do eixo em 60 Hz e carga radial no rolamento de 136,45 kg.

Nesta tabela registraram-se as seguintes informações:

- na coluna 1, a primeira da esquerda para a direita, a frequência de rotação nominal do eixo, a qual multiplicada por 60, fornece aproximadamente o valor da rotação nominal do rolamento em rpm ;
 - na coluna 2, segundo a mesma ordem, a carga radial total sobre o rolamento, em kg;
 - na coluna 3, o número de registro da medição realizada pelo contador de partículas no momento da medição;
 - na coluna 4, o grau ISO de contaminação do óleo, segundo a norma ISO 4406, no momento da medição;
 - na coluna 5, o equivalente grau NAS de contaminação registrado pelo contador de partículas, segundo a norma NAS 1638;
 - nas colunas 6, 7, 8 e 9, respectivamente, o número de partículas > 2 , > 5 , > 15 e > 25 μm presentes em 100 ml de fluido, foram registradas e contadas pelo contador de partículas, no momento de cada aquisição;
 - na coluna 10 a quantidade total de partículas por 100 ml de fluido registrada pelo contador de partículas;
 - nas colunas 11 e 12, a rotação real do eixo medida por tacômetro ótico e a temperatura do banho de óleo registrada por termômetro digital naquela condição de aquisição;
 - finalmente na coluna 13, registra-se o valor médio do RMS do sinal inteiro, calculado pela média de 9 aquisições consecutivas de sinais.
- De posse desta massa de dados, foram avaliadas possíveis correlações entre contaminação e vibrações

Tabela 7-1: Dados de aquisição para óleo sem contaminante

MÉDIAS NA AQUISIÇÃO		NÍVEL DE CONTAMINAÇÃO REGISTRADO			CONTAMINANTE: SIM CONTAMINANTE		
RMS SI	Médias (mm/2)	Temp. Óleo (°C)	Rotação (rpm)	Quant. Part. (µm/100ml)	Grav NAS	ISO	Contador Part.
20	1,9298	26,00	1058	414540	9	19/18/14	233
30	2,1706	26,90	1644	549756	10	20/19/17	234
40	2,3688	26,50	2186	290332	9	19/17/14	235
50	3,1338	26,70	2700	237756	9	18/17/13	236
60	3,7826	26,20	3089	210996	8	18/17/13	237
20	1,9666	26,40	1057	264924	9	19/17/13	242
30	2,3823	26,20	1615	243692	8	18/17/13	243
40	2,6918	27,40	2143	233068	8	18/17/13	244
50	2,6014	26,20	2666	224564	8	18/16/13	245
60	3,4718	28,00	2914	182572	8	18/16/12	246
20	2,0026	26,10	943	172548	8	18/16/13	247
30	2,3168	27,60	1510	189180	8	18/16/13	248
40	2,5968	26,00	2032	170748	8	18/16/13	249
50	2,9136	27,30	2502	166372	8	18/16/13	250
60	3,2600	26,20	2776	131956	7	18/16/12	251

Analisando os resultados apresentados na tabela 7-1, percebe-se que o óleo

preparado como limpo sofreu uma alteração do seu nível de contaminação ao longo

do experimento, registrado pelo contador de partículas. Vamos analisar a seguir em

detalhes a evolução desta contaminação expúria.

Percebe-se num primeiro momento, que os maiores níveis de contaminação

no óleo foram registrados para a carga de 36,58 kg, em todas as velocidades. No

entanto, os maiores valores de RMS das velocidades de 20, 30 e 40 Hz ocorrem para

condições que não equivalem as de maior contaminação no óleo. Pela tabela 7-1, não

se evidenciou uma correlação entre contaminação e RMS, para uma mesma

velocidade. Este fato será melhor discutido no item 7.1.3.

Os resultados completos dos registros efetuados pelo contador de partículas

encontram-se nos Anexos 5 e 6.

O gráfico da figura 7-1 refere-se aos valores das colunas 6,7,8, 9, 10 e 13 da

tabela 7-1, relativa a evolução da contaminação do óleo por faixa e por número total

de partículas, da condição experimental denominada sem contaminante quartzo ou

simplesmente "sq".

Registra-se aqui que a notação ISO R2, registrada pelo contador de partículas,

identifica o comportamento das partículas maiores do que 2 µm ao longo dos

ensaios. O mesmo se aplica para as partículas maiores do que 5, 15 e 25 µm (R5,

R15, R25), como também para a quantidade total de partículas medidas. Na ordenada

desses gráficos serão sempre registrados a quantidade de partículas / 100 ml de fluido

medidas pelo contador. Nas abscissas serão registradas a frequência de rotação e a carga radial aplicadas no momento de cada aquisição.

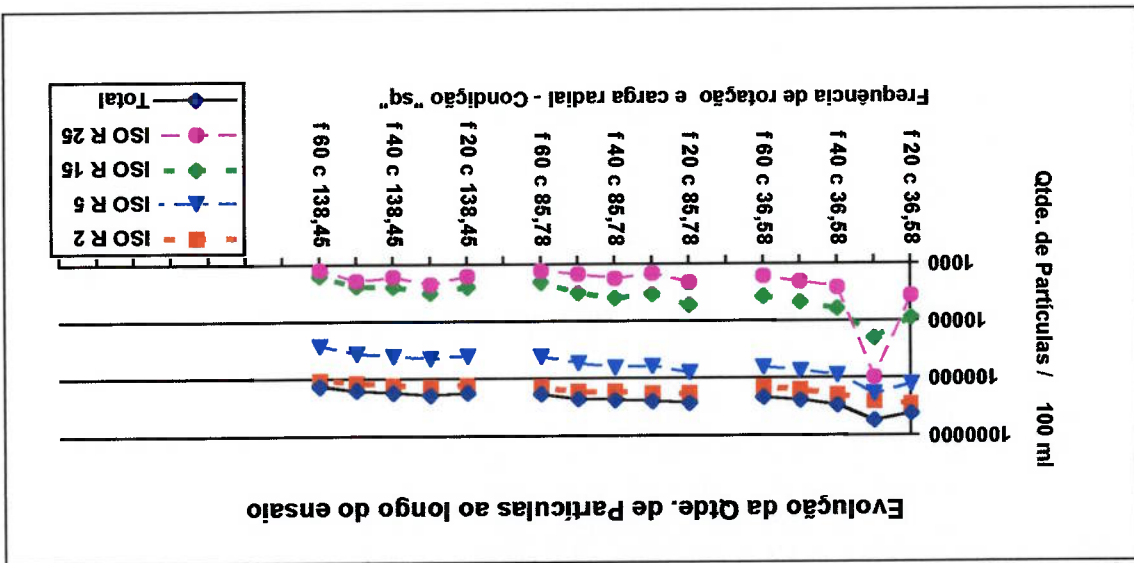


Figura 7-1: Gráfico de qtde. de partículas por faixa de tamanho X Condição Experimental "sq"

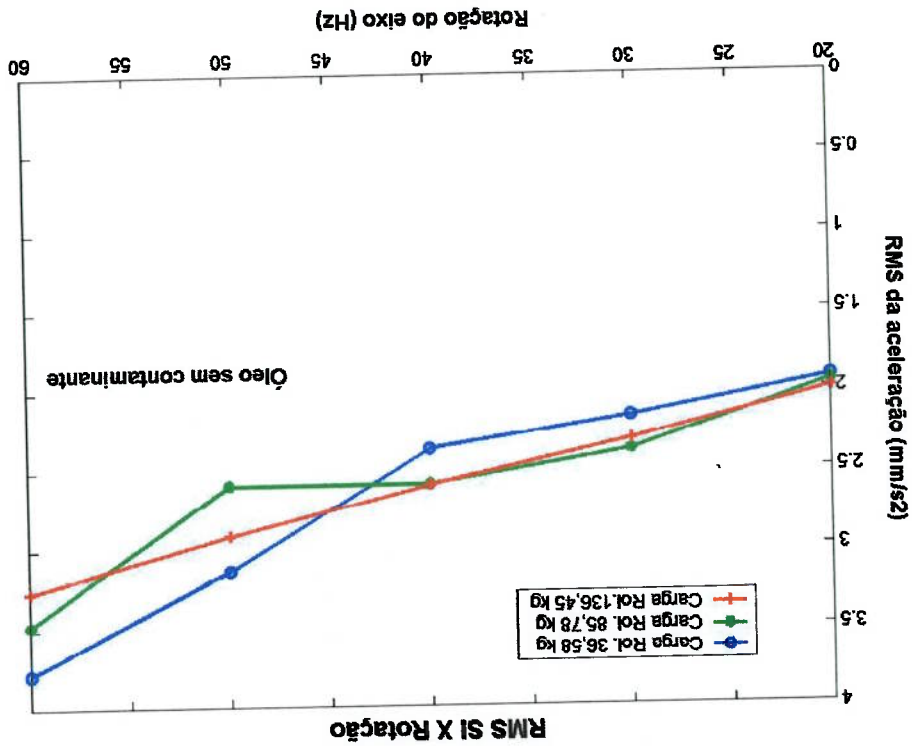
Percebe-se que a tendência geral do comportamento de todas as faixas de tamanho de partículas e da quantidade total, é a de diminuir sua quantidade ao longo da sequência das experiências.

7.1.2. Resultados do RMS da aceleração

Os gráficos das figuras 7-2, 7-3 e 7-4 mostram de que forma evoluíram o RMS da aceleração para cada uma das três cargas radiais aplicadas, utilizando para o cálculo do RMS a banda total em frequência, a banda alta e a banda respectivamente (de acordo com o item .6.8).

Analisando a figura 7-2, percebe-se inicialmente que os valores do RMS SI são bastante influenciados pela rotação do rolamento, ou seja, em todas as cargas aplicadas, os valores de RMS SI evoluem predominantemente influenciados pela rotação de trabalho. A influência da carga é variável conforme a rotação. Apenas para efeito comparativo com os outros gráficos de RMS, registramos o comportamento dos valores de RMS SI em 60 Hz. Nota-se que maior valor de RMS SI foi registrado para a menor carga aplicada e o menor valor de RMS SI para a maior carga aplicada.

Figura 7-2: Gráfico de RMS SI X rotação do eixo – 3 cargas



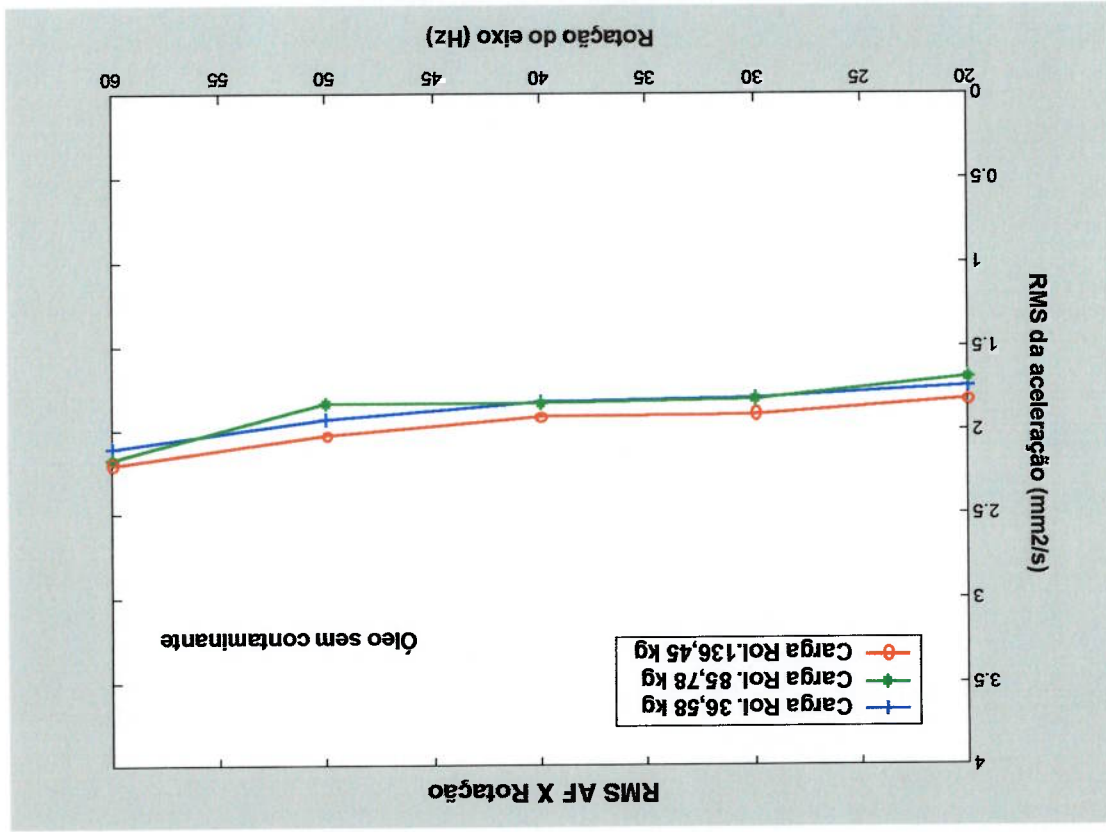


Figura 7-3: Gráfico de RMS AF X rotação do eixo - 3 cargas

O gráfico da figura 7-3 refere-se ao cálculo dos valores de RMS AF em função da rotação. Percebe-se um comportamento bastante distinto do primeiro, ou seja, os valores de RMS são pouco influenciados pelo aumento da frequência de rotação, além do que também pouco variam com as cargas aplicadas no rolamento. Os valores de RMS também são menores que os mostrados no primeiro gráfico. Na frequência de 60 Hz especificamente, apesar de com pouca diferença entre os valores, o maior valor de RMS AF corresponde ao da maior carga aplicada e o menor valor de RMS AF corresponde ao de menor carga aplicada, uma ordenação diferente daquela observada no cálculo do RMS SI.

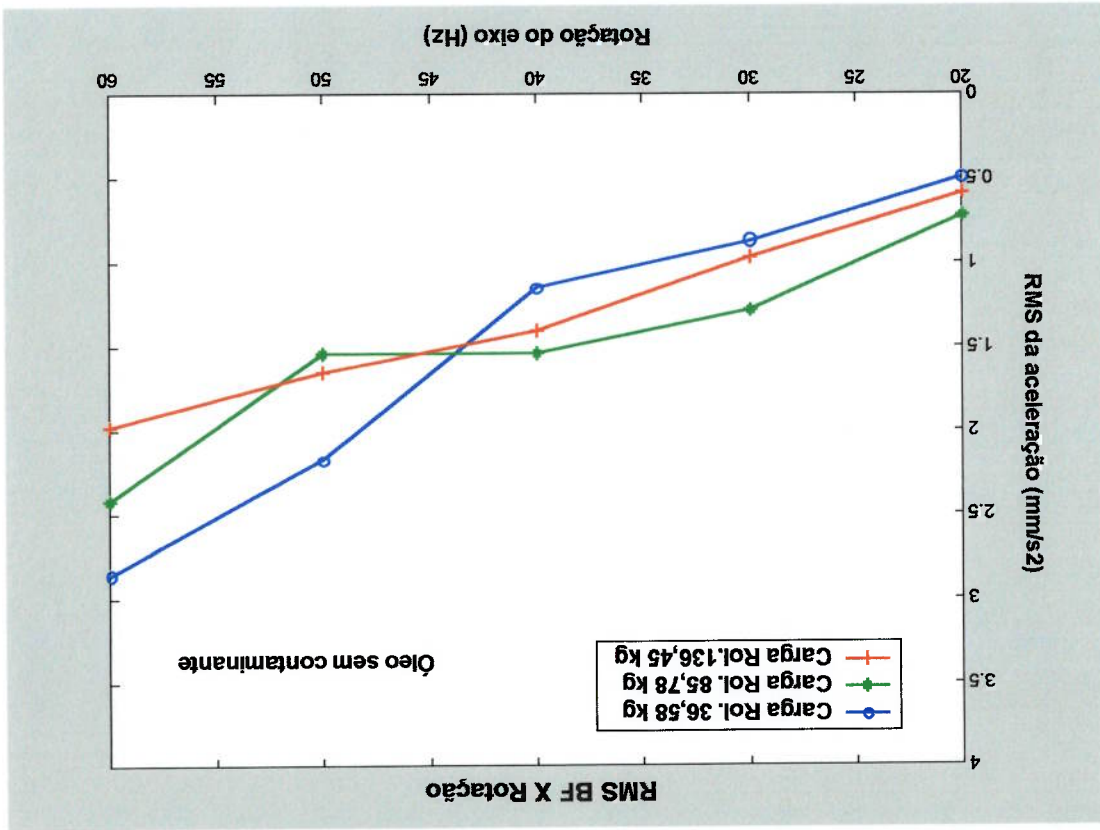


Figura 7-4: Gráfico de RMS BF X rotação do eixo - 3 cargas

Por último, apresentamos o gráfico 7-4 do RMS BF, que corresponde ao sinal filtrado em baixas frequências. Percebe-se agora um comportamento bastante parecido com o do SI, mas com valores menores. É notada grande dispersão entre os valores do RMS, ou seja, ocorre uma mudança de posição entre os valores de RMS para as três cargas a cada rotação medida. A tendência geral é de aumento do RMS conforme se dá o aumento da rotação, porém nada se pode afirmar sobre o comportamento do RMS em relação às cargas aplicadas. A dispersão entre os valores máximos e mínimos também é muito grande. Especificamente em 60 Hz de velocidade, o comportamento segue o mesmo daquele observado quando foi calculado o RMS SI.

7.1.3. Correlação de resultados entre nível ISO de contaminação e vibração

A figura 7-5 representa o gráfico onde estão correlacionados os valores de contaminação ISO do óleo, em cada carga e frequência de rotação, e os respectivos valores de RMS SI. Analisando o gráfico é possível constatar que:

- O nível de contaminação ISO diminui ao longo da sequência dos experimentos, para todas as cargas e frequências de rotação aplicadas;
- Os valores do RMS da aceleração se elevam de acordo com o aumento das cargas e das frequências de rotação;
- O gráfico sugere um aumento do valor do RMS com a diminuição da quantidade de partículas registrada pelo nível ISO. Mas, conforme será discutido em detalhes no próximo item, esta correlação pode ser apenas coincidência.

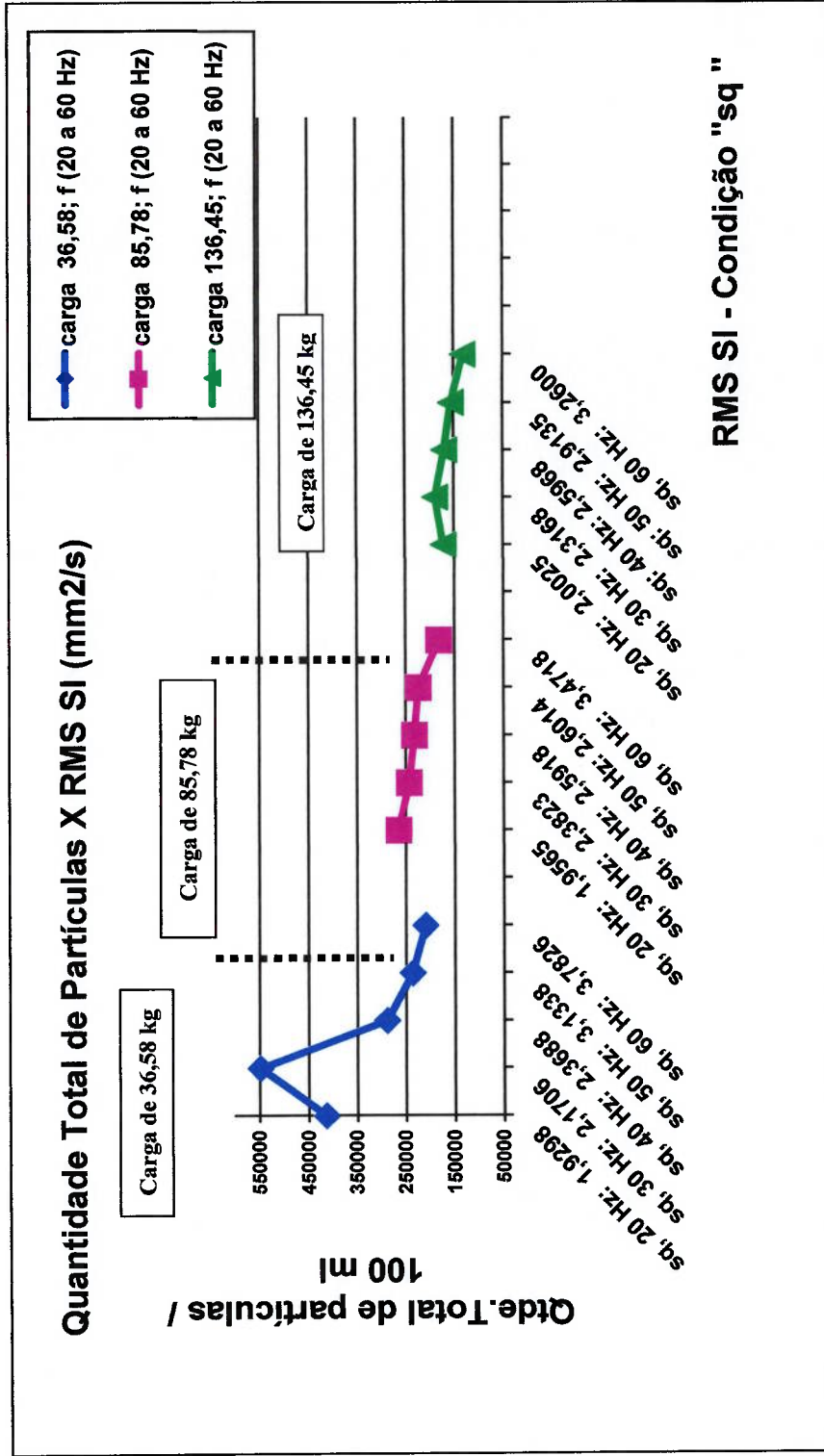


Figura 7-5: Gráfico comparativo entre contaminação e vibração: Condição "sq"

7.1.4. Discussão dos resultados

Um dos objetivos desta primeira fase experimental foi avaliar como se comportou o nível de contaminação e a vibração do rolamento nas diferentes condições de carga e velocidade, além de avaliar os impactos e correlações entre nível de contaminação ISO de óleos de rolamento levemente contaminados com o valor do RMS da aceleração.

O ensaio de contagem de partículas registrou uma elevação inicial muito grande em relação ao nível de contaminação do óleo antes da adição do lubrificante na cuba de teste, conforme registrado no item 7.1.1. Passou-se do nível de contaminação ISO 15/13/10 (vide Anexo 8, registros 215 e 216) registrado em relação ao óleo contido na bomba de óleo sem uso e filtrado, para um nível de contaminação ISO 19/18/14 registrado na primeira aquisição, **cerca de oito a dez vezes mais sujo que o valor inicial**. Isto pode ser explicado pelas condições da cuba de teste, que não era perfeitamente vedada e permitia a entrada de contaminantes externos oriundos do ambiente onde se realizava o ensaio. Aparentemente também a limpeza realizada na cuba não permitiu uma descontaminação (anterior ao ensaio) que fosse compatível com a sensibilidade do contador.

Uma vez iniciados os registros com o contador de partículas, observou-se uma ligeira redução no nível de contaminação do óleo. Isto em parte pode ser explicado pelo fato do contador de partículas possuir internamente um filtro absoluto de segurança, com fator Beta $5 \geq 200$, considerado bastante eficiente para a aplicação. Essa característica fez com que, a cada medição, cerca de 10 % do volume se purificasse automaticamente, diminuindo a quantidade de contaminantes no sistema. A tendência lógica era que a quantidade de contaminantes sofresse alguma diminuição ao longo da continuidade das experiências. Esta alteração realizada na condição de contaminação pelo próprio mecanismo interno de segurança do contador, pode ser considerada desprezível, face aos valores de contaminação natural obtidos.

Registra-se uma única exceção durante os ensaios que foi o aumento da quantidade de partículas verificado nos dois primeiros registros, com a carga de 36,58 kg, e quando a frequência foi variada de 20 para 30 Hz, fato que pode ser

explicado como um caso isolado de imprecisão do equipamento. Nos demais registros, é clara a tendência de diminuição da quantidade de contaminação.

O comportamento das vibrações quanto a variação da rotação e carregamento foi analisado no item 7.1.2. Constatou-se que valores de RMS crescem conforme a carga e rotação são aumentadas. A relação aumento de frequência de rotação com aumento de RMS se deu nos três carregamentos.

Tendo em vista que a diminuição do nível ISO e o aumento do valor do RMS aparentemente se devem a fenômenos independentes entre si, o aumento do RMS com diminuição do valor ISO, sugerido no gráfico 7-5, não representa uma correlação real entre estes dois parâmetros.

7.2. 2ª Fase Experimental: Medições de contagem de partículas e de vibrações utilizando óleos com contaminação controlada: tamanho de partícula variável e concentração constante

Nesta segunda fase de testes, repetiu-se a mesma metodologia anterior, que foi a de adquirir sinais de vibrações em conjunto com registros de informações do nível de contaminação do lubrificante. A diferença é que desta vez contaminantes de procedência conhecida foram inseridos nos volumes de óleo. O objetivo portanto foi avaliar se esses contaminantes adicionais, com tamanhos distintos e mesma concentração, acarretaram impactos aos sinais de vibração do rolamento. Três volumes de óleo contendo em cada um tamanhos diferentes de partículas, foram preparadas mantendo a concentração de 1 g/l. constante. Três faixas de tamanho de contaminante foram utilizadas (conforme Tabela 6-3.):

- 38 a 32 µm, discriminada como condição experimental “3d”;
- 75 a 53 µm, discriminada como condição experimental “7d”;
- 105 a 75 µm, discriminada como condição experimental “1d”.

Da mesma forma que na condição anterior, os resultados do comportamento da contaminação foram dispostos em planilhas e em seguida em gráficos, serão mostrados as tabelas de registros e os gráficos de evolução da contagem de partículas para cada uma das três condições de contaminação. Na sequência, os resultados do RMS da aceleração das três condições de contaminação serão

mostrados simultaneamente para efeito de comparação, buscando evidenciar eventuais impactos da contaminação na assinatura dos sinais de vibrações.

7.2.1. Resultados das medidas do nível de contaminação pelo contador de partículas

A tabela 7-2. mantém o padrão de formatação mostrado da tabela 7-1, com a mesma ordem de registros, sem a informação das rotações (considerada desprezível) e com o cálculo do valor média do RMS da aceleração do sinal inteiro. Os resultados referem-se a condição experimental denominada “3d”.

Tabela 7-2 Dados de aquisição para óleo com contaminante – condição “3d”

RMS SI		MÉDIDAS		NÍVEL DE CONTAMINAÇÃO REGISTRADO - 3d																																																																															
Médias	(m/s ²)	Temp. Óleo	(°C)	Total	>	>	>	>	>	2 µm	5 µm	15 µm	25 µm	Part.																																																																					
40	136,45	272	23/20/16	12	4227071	733183	27519	9855	4997628	26,90	0,7562	20	136,45	271	23/20/16	12	4423679	802815	32383	11967	5270844	26,00	0,4618	60	85,78	270	23/21/17	13	4882431	1343487	78335	27903	6332156	26,00	0,9728	20	85,78	269	23/21/18	13	5111807	1662975	98303	34559	6907644	26,10	0,4444	60	36,58	268	23/22/18	13	4620287	1884159	137215	59135	6700796	26,00	1,1325	40	36,58	267	24/22/18	14	5701631	2523136	173055	71679	8469500	26,30	0,7919	20	36,58	266	24/22/18	14	5767167	2424831	156671	67583	8416252	27,90	0,4645

Um valor significativamente menor de RMS SI é observado nesta condição, comparativamente aos valores registrados na primeira fase experimental, fato que será melhor discutido no item 7.2.3.

Nesta condição experimental, se compararmos as três cargas aplicadas e cinco velocidades de rotação, veremos que aos maiores valores registrados de contaminação no óleo, representados pelas rotações de 20, 40 e 60 Hz com carga de 36,58 kg, corresponderam os maiores valores de RMS do sinal inteiro.

Cabe uma explicação em relação ao registro de grau NAS 14 realizado pelo contador automático de partículas. Apesar do maior valor de contaminação citado na norma NAS 1638 ser o grau 12, a empresa Hydac fabricante do contador utilizado, optou por reportar valores de nível de contaminação extrapolados aos dos inicialmente previstos pela norma NAS 1638. Na verdade, se compararmos as normas ISO e NAS, percebe-se que a norma ISO admite uma maior quantidade total de contaminantes por mililitro de óleo. Foi essa a lógica utilizada pelo fabricante do contador, ou seja, correlacionar os graus ISO com NAS em todas as classes da classificação ISO.

Os resultados completos dos registros efetuados pelo contador de partículas encontram-se no Anexos 8 e 9.

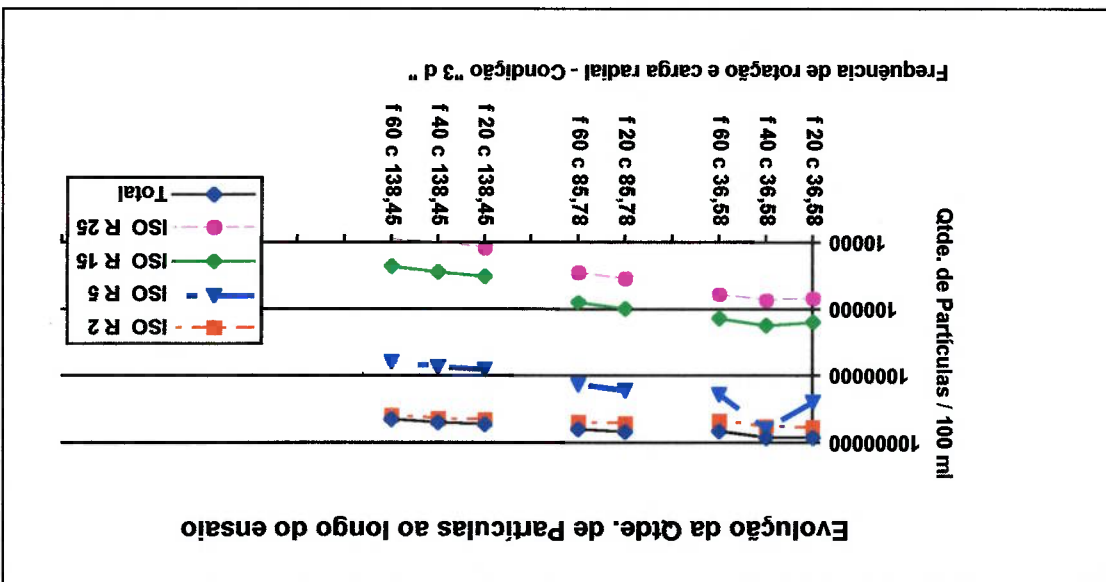


Figura 7-6: Gráfico de partículas por faixa de tamanho X
Condição Experimental “3d”

A figura 7-6 apresenta de forma gráfica alguns dados da tabela 7-2. Da mesma forma que na primeira fase experimental, realizada com o óleo lubrificante isento de contaminantes, percebe-se uma diminuição gradual do nível de contaminação ao longo da sequência da experiência.

Os próximos resultados mostrados na tabela 7-3, referem-se à condição experimental “7d”.
A tabela 7-3 registra os valores na mesma ordem da tabela anterior.

Tabela 7-3. Dados de aquisição para óleo com contaminante – condição “7d”

Quarto 75 a 53 µm - 1g/l		NÍVEL DE CONTAMINAÇÃO REGISTRADO - 7d									
Freq. Rot. (Hz)	Carga (kg)	Registro	Grav ISO	Grav NAS	> 2 µm	> 5 µm	> 15 µm	> 25 µm	Total Part.	Temp. Óleo (oC)	Médias (mm ² /s)
20	36,58	274	23/21/19	13	2736127	901119	242687	186367	4066300	26,80	0,5002
60	36,58	276	24/23/19	15	7897087	6225919	211967	69631	14404604	27,40	1,2949
20	85,78	277	24/23/19	15	7536639	4292607	226303	104959	12160508	26,10	0,5223
60	85,78	278	24/22/18	13	8290303	3653631	121343	39935	12105212	28,00	1,2794
20	136,45	279	24/22/18	14	8355839	2932735	98303	41471	11428348	27,90	0,5490
60	136,45	280	24/22/17	14	7995391	2277375	74751	27519	10375036	27,60	1,3899

Grande diminuição no valor do RMS pode ser observada, em relação a primeira fase de experimentos (sem contaminante).

Os resultados completos dos registros efetuados pelo contador de partículas encontram-se no Anexo 9.

Evolução da Qtde. de Partículas ao longo do ensaio

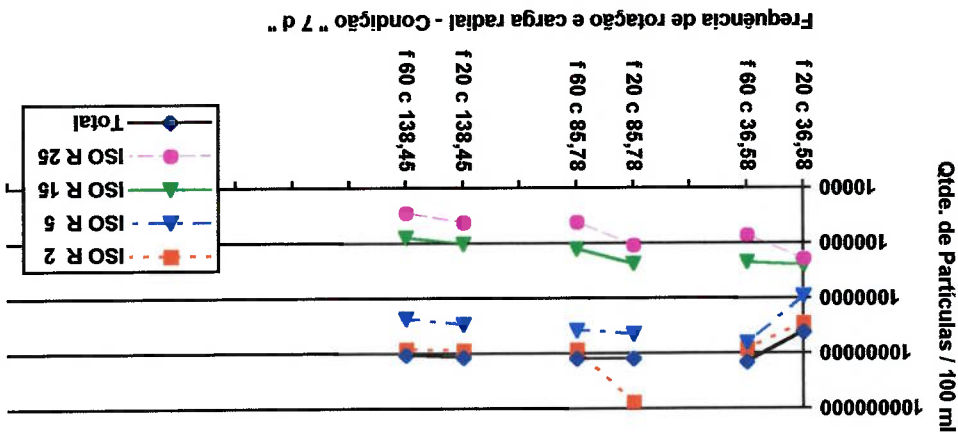


Figura 7-7: Gráfico de qtde.de partículas por faixa de tamanho X Condição Experimental "7d"

A figura 7-7 apresenta um gráfico de alguns dados da tabela 7-3. Percebe-se que os registros das primeiras medidas sugerem haver uma tendência no aumento da quantidade de alguns tamanhos de partículas no banho. No entanto, de um modo geral, percebe-se uma diminuição da quantidade total de partículas no banho ao longo da sequência das medições

Por fim, a tabela 7-4 traz o registro dos resultados da condição "1 d".

Tabela 7-4. Dados de aquisição para óleo com contaminante – condição "1d"

NÍVEL DE CONTAMINAÇÃO REGISTRADO - 1d		MEDIDAS		RMS SI																		
Quarto 105 a 75 µm - 1g/l	Registro	Grav	ISO	Temp. Óleo (oc)	Total Part.	> 25 µm	> 15 µm	> 5 µm	> 2 µm	Grav	NAS	>	>	>	>	>	>	>	>	>		
20	314	21/20/18	11	987135	475135	39679	133119	1635068	28,00	0,7279	20	36,58	314	21/19/16	11	1064959	411647	22143	10943	1509692	26,00	1,7018
60	316	21/19/15	11	1138697	374783	19711	8255	1541436	26,40	0,7114	20	85,78	316	21/19/15	11	1003519	305151	16511	7007	1332188	26,10	1,5998
60	317	21/19/15	11	1003519	305151	16511	7007	1332188	26,10	1,5998	20	85,78	317	21/19/15	11	1003519	305151	16511	7007	1332188	26,10	1,5998
20	318	22/20/16	11	1687551	475135	27135	13695	2203516	26,60	0,6557	20	136,45	318	22/20/16	11	1687551	475135	27135	13695	2203516	26,60	0,6557
60	319	22/20/16	12	2435644	633405	51774	15423	2435644	26,10	1,5070	60	136,45	319	22/20/16	12	2435644	633405	51774	15423	2435644	26,10	1,5070

Os resultados completos dos registros efetuados pelo contador de partículas encontram-se no Anexo 9 e 10

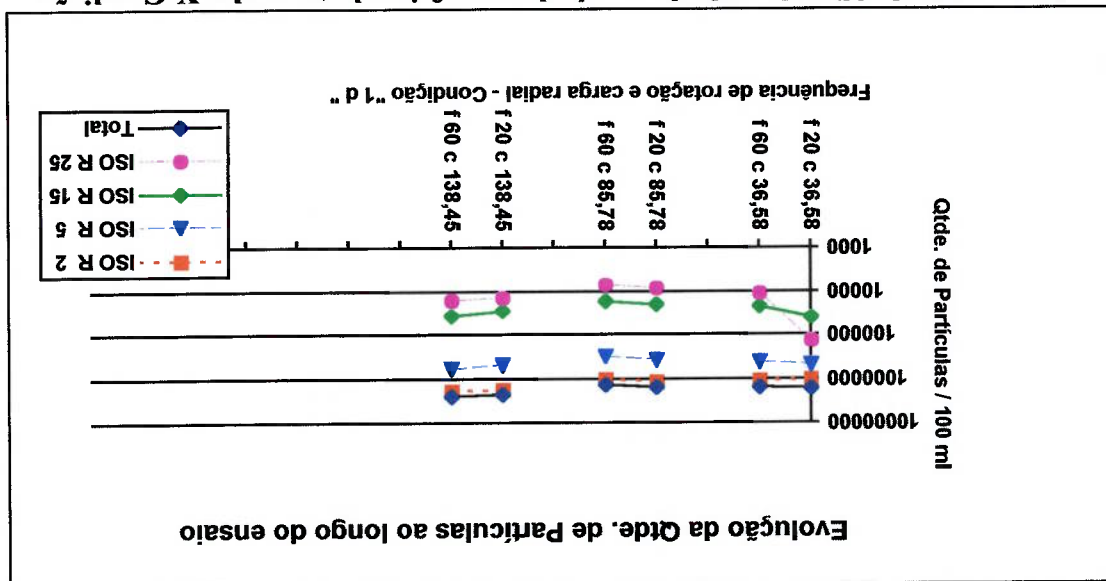


Figura 7-8: Gráfico de qtde.de partículas por faixa de tamanho X Condição Experimental "1d"

A figura 7-8 apresenta um gráfico de alguns dados da tabela 7-4. Desta vez, percebe-se um comportamento um pouco diferente dos resultados anteriores, mostrados nas figuras 7-6 e 7-7. Possivelmente devido ao maior tamanho do contaminante adicionado, percebe-se inicialmente uma diminuição de partículas, sugerindo ocorrência de decantação. Em seguida as partículas mantêm sua quantidade no banho. Por último, na condição referente a carga de 136,45 kg, percebe-se uma tendência ao aumento da quantidade de partículas em todas as faixas. É possível que quando essa carga foi aplicada, partículas de quartzo tenham sido trituradas e quebradas em outras de tamanho menor, repercutindo num aumento total da quantidade de partículas na última condição experimental.

7.2.2. Resultados do RMS da aceleração

Até o momento foram mostrados detalhes do comportamento do ensaio de contagem de partículas ao longo das aquisições. Agora, iremos mostrar graficamente de que forma evoluiu o parâmetro RMS da aceleração em cada fase da condição experimental e em seguida, discutir correlações com os valores de contaminação. Os gráficos da figura 7-9 referem-se ao comportamento do RMS da aceleração em cada uma das quinze condições experimentais realizadas. Os valores

médios de RMS da aceleração do sinal inteiro foram calculados e mostrados para cada um dos três carregamentos e para as cinco rotações testadas. Também foram simultaneamente mostrados como variaram os valores de RMS para os três tipos de tamanho de contaminantes utilizados, referentes às condições “3d”, “7d” e “1d”.

Os gráficos da figura 7-9, assim como os demais que serão apresentados, mostram os valores médios do RMS de nove sinais, com barras de erro indicando um valor equivalente a três vezes o desvio padrão. Na legenda dos gráficos, “dp” refere-se a três vezes o desvio padrão, que na Distribuição “T Student”, equivale a uma confiabilidade de cerca de 98 %.

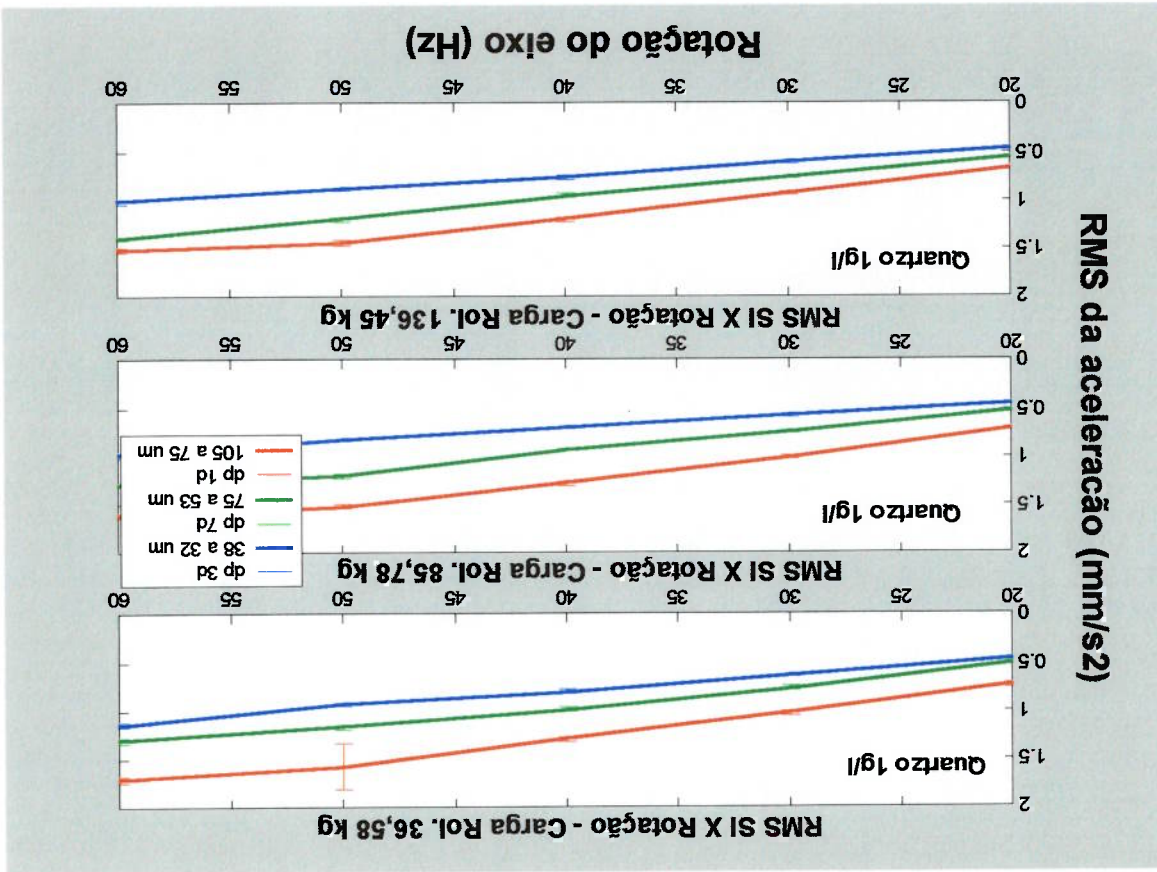


Figura 7-9 Gráficos de RMS SI X rotação do eixo - 3 cargas

Assim como foi observado na primeira fase de testes, percebe-se a forte influência da rotação no valor do RMS, ou seja, este parâmetro aumenta com influência direta da rotação, independente da carga radial aplicada e do tamanho do contaminante presente no banho de óleo. Comprova-se desta maneira a forte

influência das condições dinâmicas do rolamento, determinadas no caso pela rotação de operação, no valor do RMS SI.

A principal observação a se destacar é a evolução dos valores do RMS com o tamanho do contaminante. Percebe-se que para as três condições de carga testadas, o maior valor de contaminante apresentou proporcionalmente o maior valor de RMS, e as condições com o contaminante de menor tamanho apresentaram menores valores de RMS, isto para todas as cargas e rotações. Estes resultados sugerem uma correlação direta entre RMS de vibração e tamanho de partícula de contaminante.

Esses resultados são compatíveis com os obtidos por Komya (1992), referência citada no item 5.3, que realizou experimento com mistura de graxas e óleos, onde também foram registradas relações diretas entre o aumento do tamanho de contaminantes e o respectivo aumento no valor das vibrações.

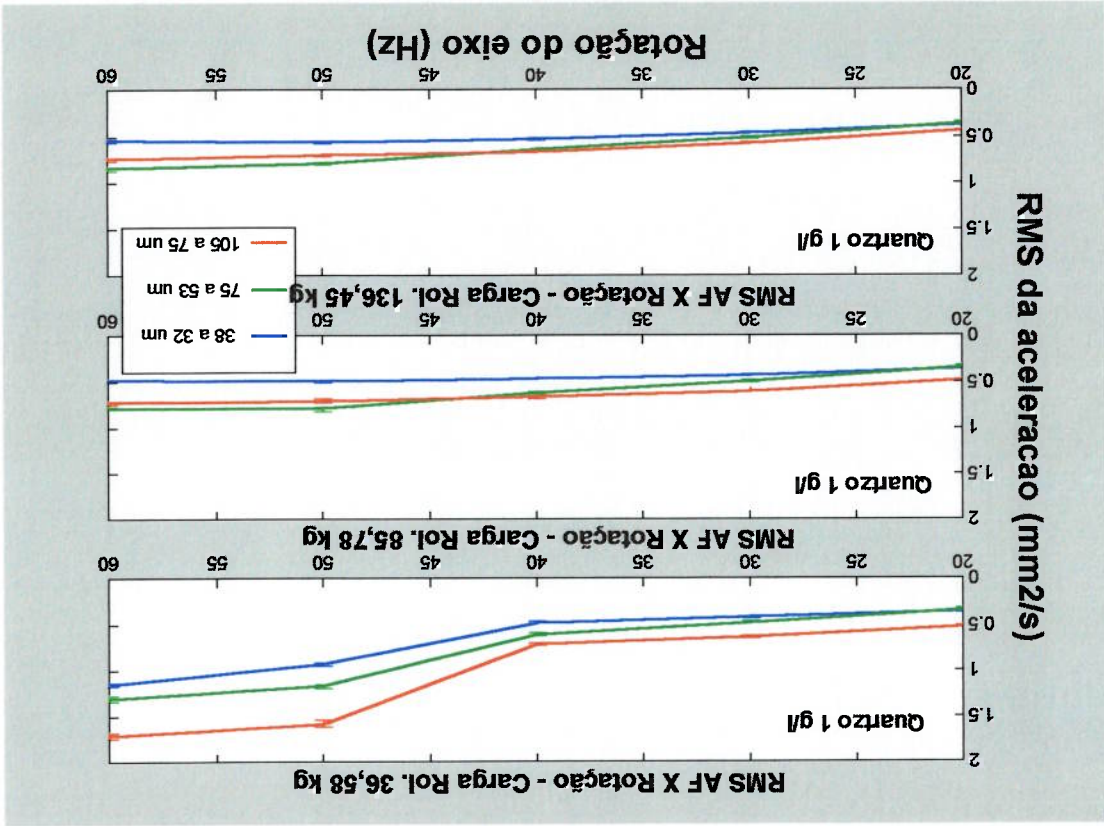


Figura 7-10. Gráficos de RMS AF X Rotação do eixo - 3 cargas

O gráfico do RMS AF, mostrado na figura 7-10, apresenta um comportamento parecido com o gráfico de RMS SI apenas para a carga de 36,58 kg. Para as outras duas condições de carga aplicada observam-se diferentes variações nos

valores de RMS AF. Nessas duas outras cargas, os valores em si pouco variam e são bastante inferiores aos observados no gráfico do RMS SI. Enquanto que o valor máximo do gráfico SI atingiu $1,5 \text{ mm}^2/\text{s}$, para o RMS AF esse valor foi de cerca de $0,8 \text{ mm}^2/\text{s}$. Em 20, 30 e 40 Hz a ordem dos maiores valores de RMS acompanha os maiores valores de contaminantes. Para as frequências de 50 e 60 Hz observa-se uma inversão: as partículas de 75 a 53 μm apresentam maiores valores de RMS AF, seguidas das de 105 a 75 μm , ficando o menor valor para as partículas na faixa de 38 a 32 μm .

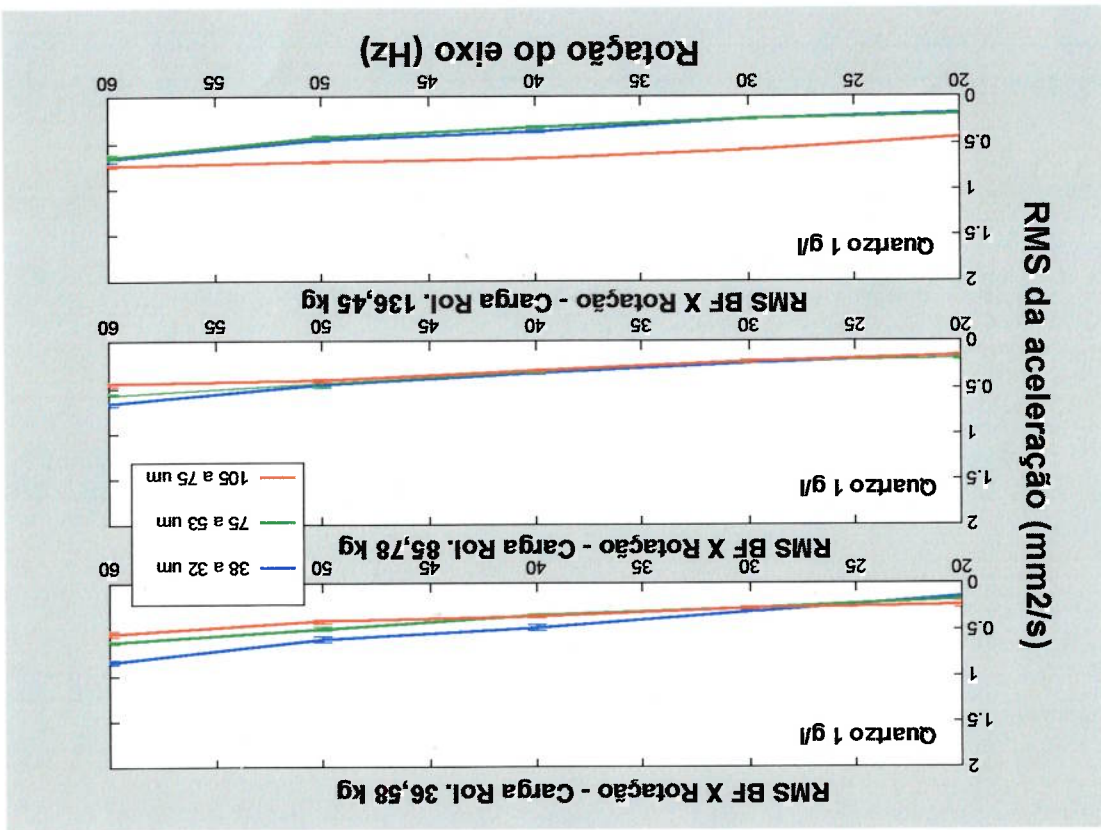


Figura 7-11 Gráficos de RMS BF X rotação do eixo - 3 cargas

O comportamento do gráfico de RMS BF, mostrado na figura 7-11 é diferenciado dos demais. Para as cargas de 36,58 kg e 85,78 kg e frequências de 20, 30 e 40 Hz é difícil identificar uma diferença significativa entre os valores. Já em 50 e 60 Hz, a ordem observada é a de maior valor para o RMS com o menor tamanho de contaminante.

Já no caso da carga de 136,45 kg, o comportamento observado lembra o do sinal inteiro. Os tamanhos de 75 a 53 μm e os de 105 a 75 μm quase não apresentam distinção entre si.

7.2.3. Correlação entre nível ISO de contaminação e vibração

Também para esta fase experimental, foi preparado um gráfico mostrando a evolução do nível ISO (quantidade de partículas) com a vibração.

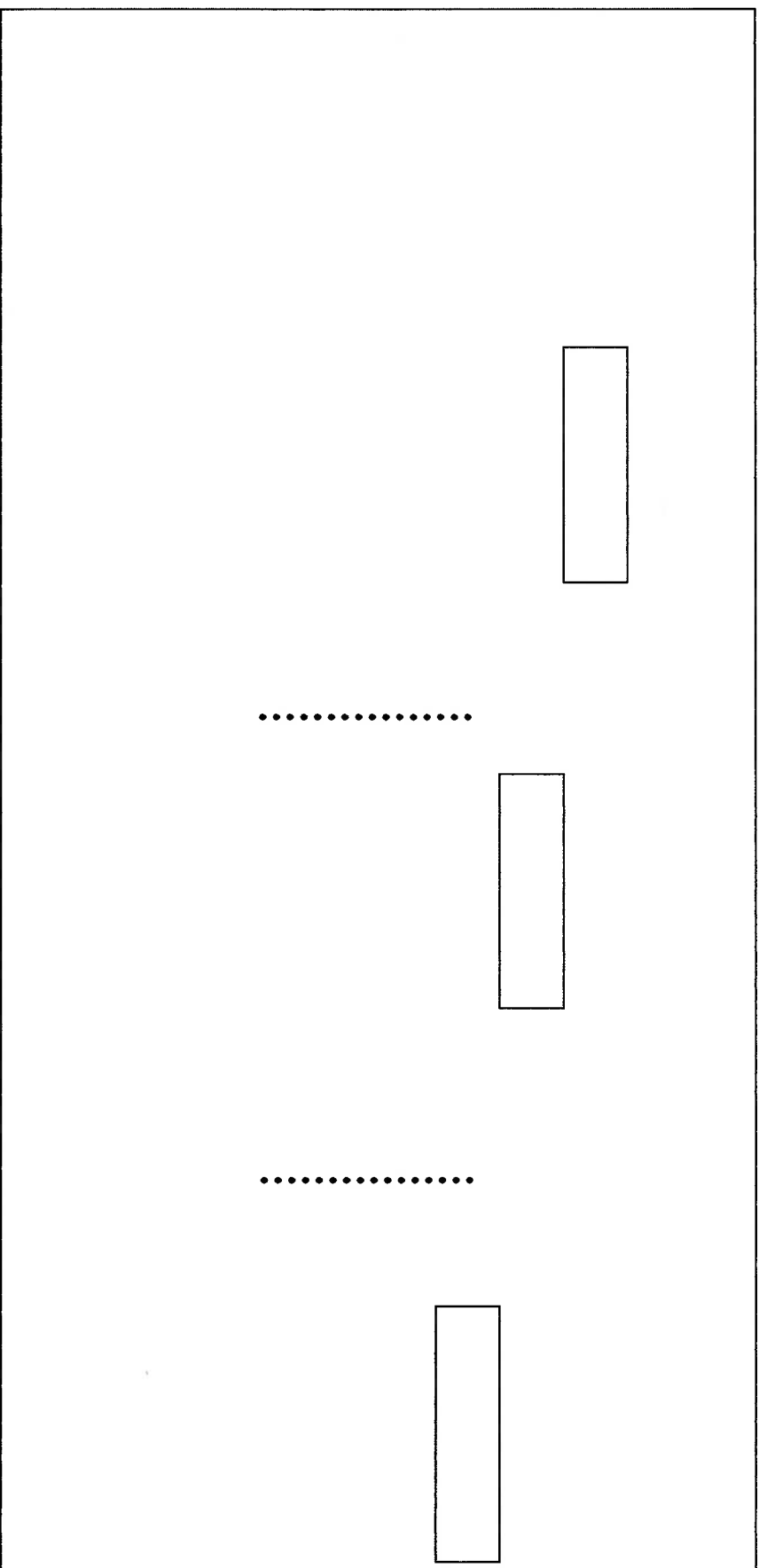


Figura 7-12: Gráfico comparativo entre contaminação e vibração: Condições “3d, 7d e 1d”

O gráfico da figura 7-12 representa a relação entre os valores de contaminação ISO registrados pelo contador de partículas e os valores de RMS SI para cada carga e velocidade de rotação das três condições de contaminação.

Analisando-se o gráfico da figura 7-12 percebe-se que para a primeira condição de trabalho do rolamento (carga de 36,58 kg e velocidade de rotação de 20 Hz), a quantidade total de partículas no banho diminui ao passo em que as medições vão se realizando. A partir da segunda frequência de registro (60 Hz) e para todas as outras condições combinadas de carga e velocidade, o comportamento se repete. Parte-se de um determinado nível ISO, referente a condição de 38 a 32 µm, essa quantidade total de partículas eleva-se quando é adicionado ao banho contaminantes entre 75 e 53 µm, e finalmente a quantidade total de partículas cai quando contaminantes com tamanho médio entre 105 e 75 µm são colocados no experimento. Supõe-se de forma hipotética que dois fenômenos distintos podem ter ocorrido. O aumento do nível ISO para tamanho de partícula “7d” pode ter ocorrido por trituração na zona de carregamento do rolamento. O mesmo pode ter ocorrido para o tamanho “1d”, mas aparentemente um importante processo de decantação pode ter acontecido. Estas hipóteses não foram avaliadas experimentalmente.

7.2.4. Discussão dos resultados

Para uma melhor discussão dos resultados foi elaborado inicialmente uma tabela que resumirá como se deu o comportamento da contaminação em cada uma das etapas do ensaio. A tabela 7-5 resume o comportamento dos ensaios através da medição da quantidade de partículas pelo contador desde o primeiro até o último registro do nível de contaminação

Tabela 7-5 Comportamento das partículas ao longo dos registros

Condição Experimental	3d			7d			1d			
	Partículas > 2 µm	Partículas > 5 µm	Partículas > 15 µm	Partículas > 25 µm	Orde. Total de Partículas	Partículas > 2 µm	Partículas > 5 µm	Partículas > 15 µm	Partículas > 25 µm	Orde. Total de Partículas
36,58 kg	▲	▲	▲	▲	▲	▲	▲	▲	▲	▲
85,78 kg	▲	▲	▲	▲	▲	▲	▲	▲	▲	▲
136,45 kg	▲	▲	▲	▲	▲	▲	▲	▲	▲	▲
36,58 kg	▼	▼	▲	▲	▲	▲	▲	▲	▲	▲
85,78 kg	▼	▲	▲	▲	▲	▲	▲	▲	▲	▲
136,45 kg	▲	▲	▲	▲	▲	▲	▲	▲	▲	▲
36,58 kg	▼	▲	▲	▲	▲	▲	▲	▲	▲	▲
85,78 kg	▲	▲	▲	▲	▲	▲	▲	▲	▲	▲
136,45 kg	▼	▲	▲	▲	▲	▲	▲	▲	▲	▲

- A notação ▲ significa que naquela condição de carga, a quantidade de partículas diminuiu ao longo dos registros de contaminação;
- A notação ▼ significa que naquela condição de carga, a quantidade de partículas aumentou ao longo dos registros de contaminação;
- A notação ▲ ▼ significa que naquela condição de carga, a quantidade de partículas daquela faixa permaneceu constante ao longo dos registros de contaminação.

Percebe-se pela tabela um comportamento diferenciado em cada faixa de tamanho de partículas. Para as condições experimentais “3d”, “7d” e “1d”, para todas as cargas aplicadas, a tendência geral é a de diminuição da quantidade de partículas. No entanto, há que se entender que essa diminuição deve ser considerada irrisória perto dos índices registrados. Assim, mesmo sob efeito da filtragem realizada pelo filtro interno do equipamento, os níveis de contaminação medidos foram considerados muito elevados se comparados as normas existentes. É possível admitir que nessas condições tenha havido mais **decaiação** do que propriamente contaminantes em suspensão. E contaminantes decantados efetivamente não foram contados pelo contador de partículas.

Apenas para a última aplicação de carga de carregamento da condição “1d” (136,45 kg), observou-se uma tendência geral do aumento do nível ISO de

contaminação, conforme tabela 7-5 e figura 7-8. Talvez uma situação de trituração de partículas em função das cargas aplicadas possa ter ocorrido. As partículas que não se decantaram teriam contribuído para a ocorrência de alguns fenômenos, que a seguir serão discutidos.

Sabe-se que a infirmação de vibração é oriunda do contato pista-esteras nas zonas carregadas e descarregadas. Observe a figura 7-11, que ilustra detalhes da zona descarregada do rolamento testado.

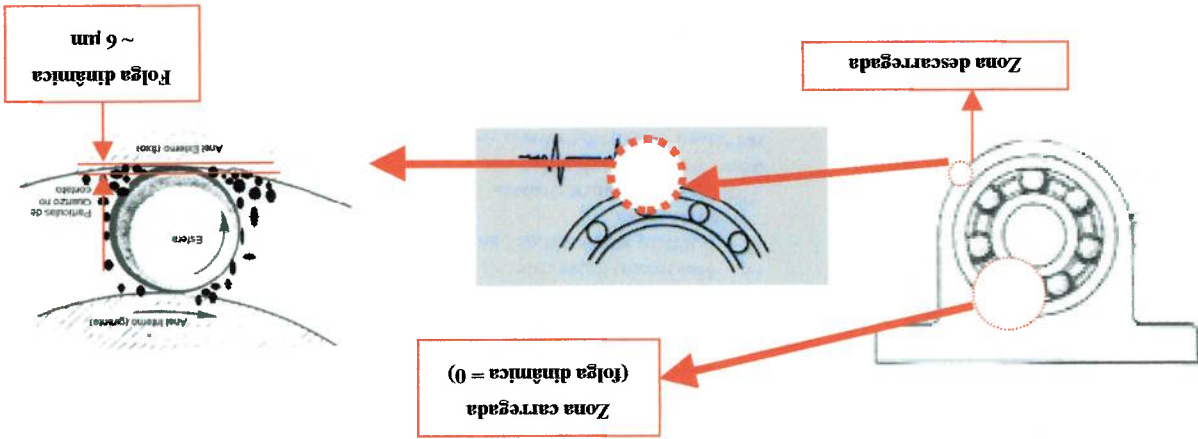


Figura 7-13: Detalhes da zona descarregada do rolamento.

A figura 7-13 traz detalhes das zonas carregadas e descarregadas do rolamento testado. A zona carregada de um rolamento é aquela onde a folga dinâmica é zero, ou seja, as pistas e esferas estão separadas somente pela espessura do filme lubrificante. Já na zona descarregada, cerca de 60 % da folga dinâmica total pode se encontrar, que para o rolamento em questão, vale cerca de 6 µm.

Observe a figura 7-14 extraída de Parker (1998).

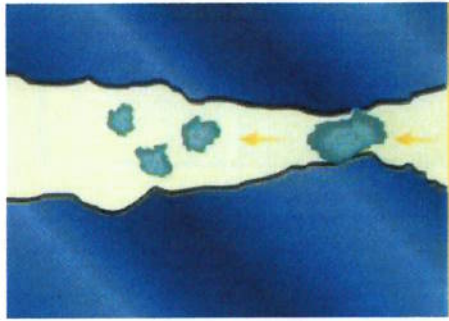
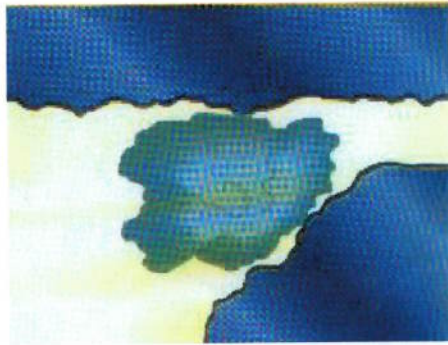


Figura 7-14. Partículas menores que a folga e filme lubrificante (Parker, 1998)

Quando partículas de tamanho inferior ou equivalente ao filme lubrificante do óleo de rolamentos entram em contato na zona descarregada de rolamentos, fenômenos de quebra e fratura das mesmas em pedaços de menor tamanho são passíveis de ocorrerem, dependendo de alguns fatos. Assim sendo, dependendo da quantidade desse contaminante, de sua concentração, tipo e tamanho, das cargas aplicadas e da dureza e morfologia do contaminante, é razoável supor que partículas contaminantes se fragmentem em outras de menor tamanho e permaneçam em suspensão no banho de óleo ou se decantem, dependendo das condições operacionais, tais como, viscosidade do óleo, velocidade de agitação do banho, etc..

Já a figura 7-15 da mesma referência, sugere um mecanismo de contato da zona descarregada onde as partículas são de tamanho predominantemente superiores aos das folgas, fazendo com que o contato provável de sobreposição do corpo rolante sobre o contaminante se dê na forma de impactos, gerando níveis de energia maiores.

Figura 7-15. Partículas maiores que a folga e filme lubrificante (Parker, 1998)



Fazendo uso da analogia com as figuras 7-14 e 7-15, sugere-se uma explicação (não comprovada experimentalmente) para o comportamento dos valores de RMS SI serem tanto maiores quanto maior foram os tamanhos de partículas. Mesmo tendo sido formada uma deposição de contaminante sobre o rolamento, algumas partículas de contaminantes que não foram quebradas, quando presentes na zona descarregada a precisavam ser “escaladas”. A energia de impacto para se “escalar” a partícula teria sido a responsável pelos maiores valores de RMS SI para maiores tamanhos de partículas. Esse efeito também foi verificado quando se calculou os RMS AF para as rotações de 20, 30 e 40 Hz, porém não foi constatado para 50 e 60 Hz. Os RMS BF também não evidenciaram esse comportamento.

Concluindo a segunda fase experimental podemos registrar algumas constatações experimentais:

- Contaminação:
 - a medida em que se aumentou o tamanho do contaminante, a quantidade total de partículas no banho inicialmente se elevou
 - RMS SI da aceleração (nível de vibração):
 - eleva-se muito com o aumento da rotação e acompanha de forma relativa o aumento da carga aplicada;
 - Correlação contaminação – vibrações:
 - numa mesma velocidade de rotação e numa mesma carga aplicada, para uma mesma concentração, o contaminante que possui maior tamanho proporciona maior valor de RMS SI;

- excelente correlação contaminação-vibração pode ser realizada caso se registre a contaminação em massa de contaminante /massa de lubrificante;
- inadequada correlação se realiza quando se tenta comparar a contaminação medida pela norma ISO com o valor de RMS de aceleração. Os mesmos podem evoluir de forma inversa e diferenciada.

7.3. 3ª Fase Experimental: Medições de contagem de partículas e de vibrações utilizando óleos com contaminação controlada: faixa de tamanho constante e concentração variável

Nesta terceira fase experimental, fixou-se uma faixa de tamanho de contaminante (105 a 75 µm) e foi variado sua concentração em peso em cada uma das condições de contaminação. O objetivo foi avaliar se a concentração de contaminante, para uma determinada faixa de tamanho, causa algum tipo de impacto na assinatura das vibrações do rolamento. Foram adquiridas seis diferentes condições experimentais, referentes as condições "1a" até "1f", conforme Tabela 6-3:

- 0,010 g/l, discriminada como condição experimental "1a";
- 0,020 g/l, discriminada como condição experimental "1b";
- 0,10 g/l, discriminada como condição experimental "1c";
- 1,0 g/l, discriminada como condição experimental "1d";
- 2,0 g/l, discriminada como condição experimental "1e";
- 5,0 g/l, discriminada como condição experimental "1f"

A ideia da utilização de alguns desses níveis de contaminação foi a de reproduzir concentrações citadas pela norma ISO 4406, porém com outro tamanho de partículas. A referida norma sugere que um óleo com grau de contaminação ISO 10, possui cerca de 0,01 mg/l de quantidade de poluente ACFT, uma areia especial, com cerca de 16 µm de diâmetro, utilizada para calibração de filtros. Os resultados foram dispostos em tabelas e gráficos, que apresentam a tendência do comportamento da contaminação na experiência, como também dos valores de vibrações.

7.3.1 Resultados das medidas do nível ISO de contaminação pelo contador de partículas

Em função do elevado tempo necessário para registrar os níveis ISO através do contador de partículas (em torno de 120 s para cada registro aproximadamente) estas medidas foram realizadas apenas paraas frequências de 20 e 60 Hz. Mesmo com poucos pontos registrados, pôde-se obter uma boa ideia do comportamento da contaminação durante os ensaios.

Tabela 7-6 Dados de aquisição para óleo com contaminante – condição “1 a”

Medições		NÍVEL DE CONTAMINAÇÃO REGISTRADO - 1a																
RMS SI	Médias (m2/s)	Registro	Grau ISO	Grau NAS	Grau	>	2 µm	SDPC	SDPC	SDPC	>	5 µm	>	15 µm	25 µm	Total	Temp. Óleo (oC)	Part.
60	136,45	301	24/23/21	> 15	SDPC	15532031	860159	282623	16674813	26,00	1,8006							
20	136,45	300	24/23/21	> 15	SDPC	6029311	1294335	708607	8032253	26,60	0,7336							
60	85,78	299	24/23/21	> 15	SDPC	11730943	1794047	843775	14368765	26,00	1,8591							
20	85,78	298	22/22/21	> 15	SDPC	1712127	1941503	3653630	27,30	0,7264								
60	36,58	297	22/22/21	> 15	SDPC	174079	2424831	2598910	26,00	2,0324								
20	36,58	295	24/23/21	> 15	SDPC	6356991	1409023	847871	8613885	27,10	0,7381							

A notação registrada na tabela 7-6, referente aos dados da condição de contaminação “1a”, denominado SDPC (iniciais das palavras Sujo Demais Para Contar) e que foi reportada pelo contador de partículas precisa ser discutida. A quantidade de contaminante no banho era mínima (0,010 g/l) e mesmo assim, o aparelho acusou saturação. É possível que partículas de tamanho grande tenham se sobreposto e sido contadas em excesso pelo aparelho durante os registros.. Percebe-se que essa situação de saturação se deu para todas as condições de carga na faixa de partículas > 2 µm e para dois casos das partículas > 5 µm. A ocorrência sugere a ocorrência de uma saturação desse tamanho de partícula no banho, porém no caso, o contaminante não estava presente. Há evidências que tenha ocorrido erro experimental.

Conforme descrito no item 3.2.3, o contador de partículas utilizado na parte experimental trabalha com um sensor óptico a laser. Esse sensor opera por escurecimento de partículas. Partículas de tamanho muito grande, mesmo com a baixa concentração de 0,01 g/l, podem influenciar negativamente essa contagem, fazendo com que o sensor interprete uma quantidade grande de partículas, ao passo que efetivamente no óleo, poucas partículas estavam em suspensão.

Também neste tipo de condição observam-se valores menores de RMS em comparação àqueles registrados na primeira fase de resultados, referente aos óleos limpos.

Os resultados completos dos registros efetuados pelo contador de partículas encontram-se no Anexo 10.

Os próximos resultados, mostrados através da tabela 7-7, referem-se a alguns dados da condição experimental "1b", ou concentração de 0,020 g/l. Os procedimentos foram mantidos e a tabela mantém a formatação das anteriores.

Tabela 7-7 Dados de aquisição para óleo com contaminante – condição "1b"

RMS SI	MÉDIDAS		NÍVEL DE CONTAMINAÇÃO REGISTRADO - 1b									
	Temp. Óleo (°C)	Total Part.	Registro	ISO Grau	NAS Grau	2 µm	5 µm	15 µm	25 µm	Total	Temp. Óleo (°C)	Médias (mm ² /s)
20	36,58	302	22/2/117	13	1662975	1220607	81919	34303	2999804	27,90	0,7017	
60	36,58	303	20/19/16	12	460799	368639	36863	16895	883196	26,10	1,7712	
20	85,78	304	21/20/16	11	929791	462847	28671	12415	1433724	28,00	0,7127	
60	85,78	305	23/21/16	13	2981887	1056767	28159	8063	4074876	28,00	1,8661	
20	136,45	306	22/20/15	12	2621439	647167	20991	7423	3297020	27,80	0,7290	
60	136,45	307	22/21/20	13	978943	712703	258047	249855	2199548	26,00	1,8557	

Os resultados completos dos registros efetuados pelo contador de partículas encontram-se no Anexo 11.

Aparentemente, o efeito da tamanho na determinação da contagem de partículas influencia fortemente a medição da contaminação, fazendo com que os resultados variem excessivamente entre as condições experimentais. As condições SDPC não foram registradas.

Dando sequência aos resultados, a próxima tabela refere-se a condição experimental "1c". A tabela 7-8 traz o registro dos resultados dessa condição.

Tabela 7-8 Dados de aquisição para óleo com contaminante – condição "1c"

RMS SI	MÉDIDAS		NÍVEL DE CONTAMINAÇÃO REGISTRADO - 1c									
	Temp. Óleo (°C)	Total Part.	Registro	ISO Grau	NAS Grau	2 µm	5 µm	15 µm	25 µm	Total	Temp. Óleo (°C)	Médias (mm ² /s)
20	36,58	308	19/19/17	10	154623	177151	20479	99327	451580	28,00	0,7597	
60	36,58	309	19/18/15	10	231423	163839	11711	4959	411932	26,10	1,8586	
20	85,78	310	21/19/17	10	733183	226303	21375	104447	1085308	27,50	0,7747	
60	85,78	311	21/18/14	11	1343487	205823	7647	3343	1560300	26,20	2,0286	
20	136,45	312	21/18/14	10	1228799	166911	5343	2735	1403788	27,60	0,8547	
60	136,45	313	21/18/13	10	1441791	187391	4767	2255	1636204	27,00	2,0150	

Os resultados completos dos registos efetuados pelo contador de partículas encontram-se no **Anexos 11 e 12**.

Os próximos resultados, mostrados através da tabela 7-9, referem-se a condição experimental "1d", banho de óleo contaminado com 1,0 g/l de quartzo.

Tabela 7-9 Dados de aquisição para óleo com contaminante – condição "1d"

RMS SI	MEDIÇÕES		NÍVEL DE CONTAMINAÇÃO REGISTRADO - 1d									
	Temp. Óleo (m2/s)	Total Part. (oc)	Registo	Grav	ISO	NAS	2 µm	5 µm	15 µm	25 µm	Total Part. (oc)	Temp. Óleo (m2/s)
60	1,5071	26,10	319	22/20/16	12	1802239	581631	36351	15423	243644	26,10	1,5071
20	0,6557	26,60	318	22/20/16	11	1687561	475135	27135	13695	2203516	26,60	0,6557
60	1,6000	26,10	317	21/19/15	11	1003519	305151	16511	7007	1332188	26,10	1,6000
20	0,7114	26,40	316	21/19/15	11	1138687	374783	19711	8255	1541436	26,40	0,7114
60	1,7018	26,00	315	21/19/16	11	10644959	411647	22143	10943	1509692	26,00	1,7018
20	0,7279	28,00	314	21/20/18	11	987135	475135	39679	133119	1635068	28,00	0,7279

Os resultados completos dos registos efetuados pelo contador de partículas

encontram-se no **Anexo 12**

Dando sequência aos resultados, a tabela 7-10 refere-se a condição experimental "1e", que corresponde a adição de 2 g/l de quartzo no óleo de teste.

Tabela 7-10 Dados de aquisição para óleo com contaminante – condição "1e"

RMS SI	MEDIÇÕES		NÍVEL DE CONTAMINAÇÃO REGISTRADO - 1e									
	Temp. Óleo (m2/s)	Total Part. (oc)	Registo	Grav	ISO	NAS	2 µm	5 µm	15 µm	25 µm	Total Part. (oc)	Temp. Óleo (m2/s)
60	1,0301	26,60	320	23/22/18	13	3620863	1941503	143359	84991	5790716	27,90	0,4638
20	0,4638	27,90	321	23/22/18	13	4079615	2007039	132095	68095	6286844	26,60	1,0301
60	1,3789	27,60	322	24/23/19	14	5963775	3751935	153599	150527	10019836	27,60	0,3789
20	0,3789	27,60	323	24/22/19	14	6062079	2670591	109055	200703	9042428	26,30	2,2021
60	2,2021	26,30	324	24/22/18	14	6520831	2949119	97791	47615	9615356	27,10	0,7170
20	0,7170	27,10	325	24/22/18	14	6422527	3391487	96767	40969	9951740	26,10	2,4222

Os resultados completos dos registos efetuados pelo contador de partículas

encontram-se no **Anexo 13**.

Dando sequência aos resultados, a última tabela desta sequência refere-se a condição experimental "1f", identificada pela adição de 5 g/l de quartzo na faixa de 105 a 75 µm. A tabela 7-11 traz o registo dos resultados da condição.

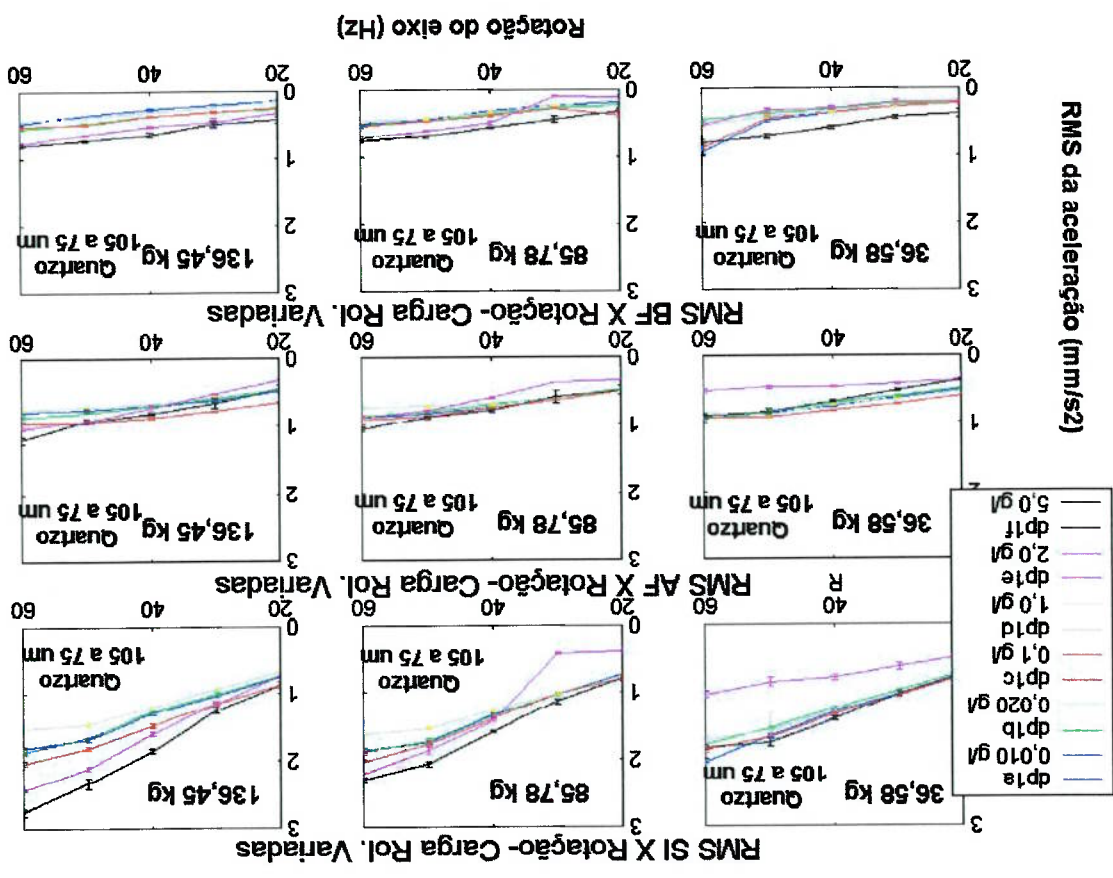


Figura 7-16 Gráficos do RMS nas três faixas de frequências X rotação do eixo -

3 cargas

Percebe-se que para alguns carregamentos e cálculos de RMS, a distinção entre concentrações fica prejudicada. É possível que aqui, também como nos casos de AF e BF da segunda fase de experiências, o corte da faixa de frequência do espectro que foi adotado não tenha contribuído o suficientemente para uma adequada distinção entre concentrações. Entretanto, há casos como no gráfico RMS SI com 136,45 kg, que esta identificação ficou bem caracterizada.

A seguir, serão mostrados e comentados rapidamente da um dos nove gráficos gerados.

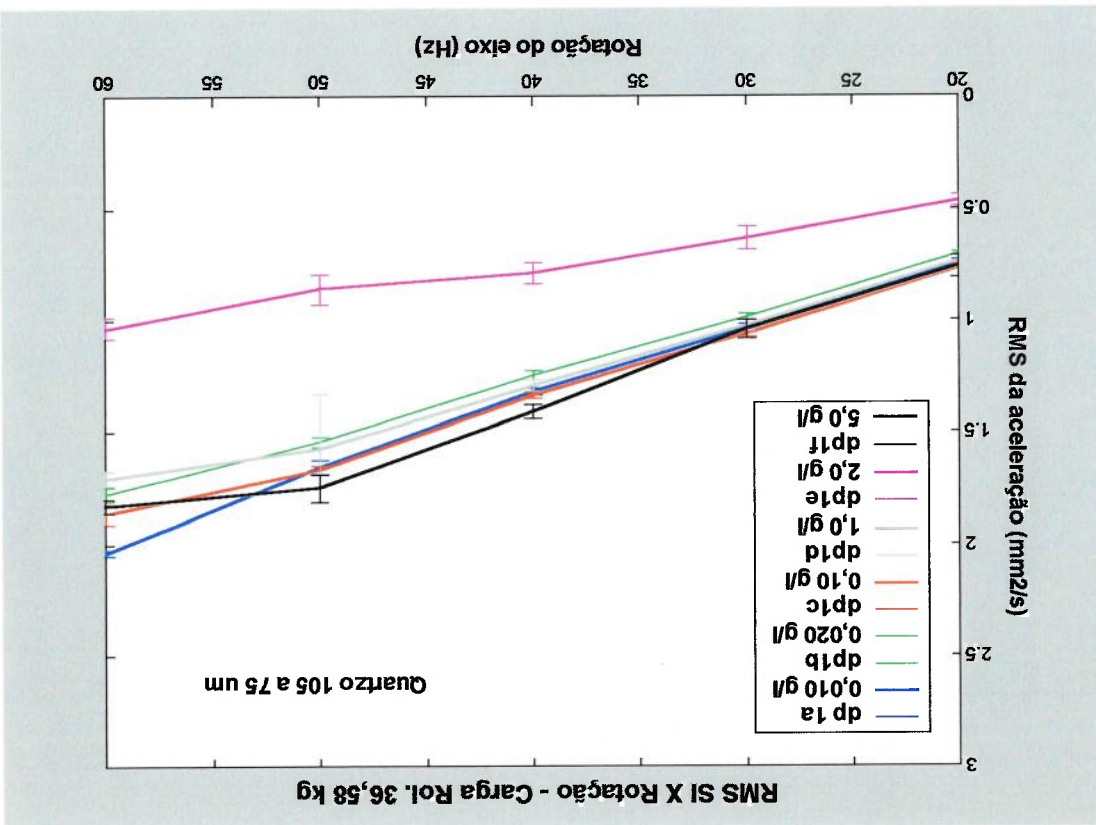


Figura 7-17. Gráfico de RMS SI X rotação do eixo - Carga de 36,58 kg

Observando-se o gráfico da figura 7-17 que mostra os resultados obtidos com o carregamento de 36,58 kg, percebe-se que os resultados do RMS SI mantêm a tendência dos experimentos anteriores, ou seja, aumentam conforme a elevação da rotação. Todas as condições de contaminação, exceto a de 2,0 g/l, que variou de forma diferente, apresentaram valores próximos uns dos outros em todas as rotações registradas, ficando difícil identificar diferenças de concentração.

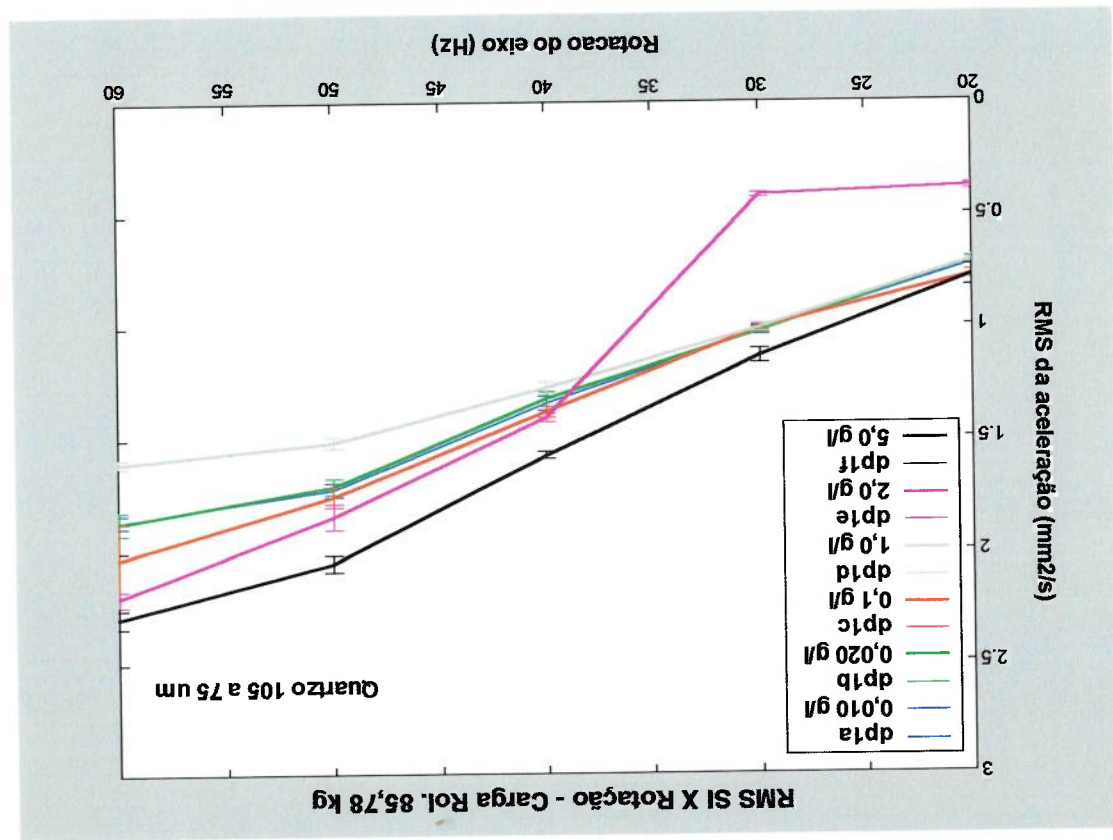


Figura 7-18 Gráfico de RMS SI X rotação do eixo - Carga de 85,78 kg

Observando-se os resultados do gráfico da figura 7-18, carregamento de 85,78 kg, percebe-se também que o RMS SI aumenta com a rotação. No entanto, com este carregamento, ao contrário do anterior, já percebem-se diferenças em relação ao nível de contaminação. Os maiores valores de aceleração correspondem a aqueles de maior concentração de contaminantes (condição "1f"). Novamente a condição "1e", que equivale a 2,0 g/l, apresentou em algumas rotações, um comportamento bastante diferente das demais.

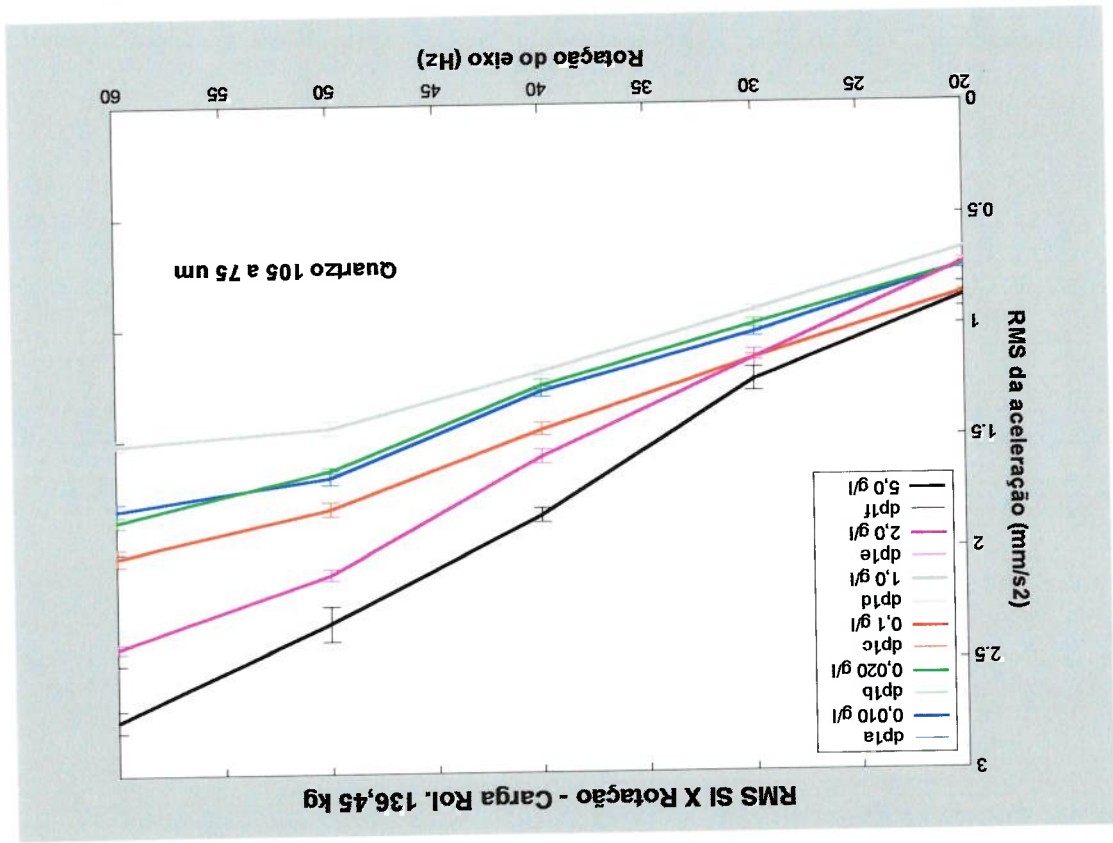


Figura 7-19 Gráfico de RMS SI X rotação do eixo - Carga de 136,45 kg

O gráfico da figura 7-19 refere-se ao maior carregamento, e nele observamos outro tipo de comportamento. Mantida a relação RMS SI com rotação, verifica-se que as duas maiores concentrações de contaminantes ("Ie e If") apresentam os maiores valores de vibrações. Isto sugere a possibilidade que o acúmulo excessivo de contaminante na região do contato possa ter influência no comportamento e na quantificação do valor do RMS SI.

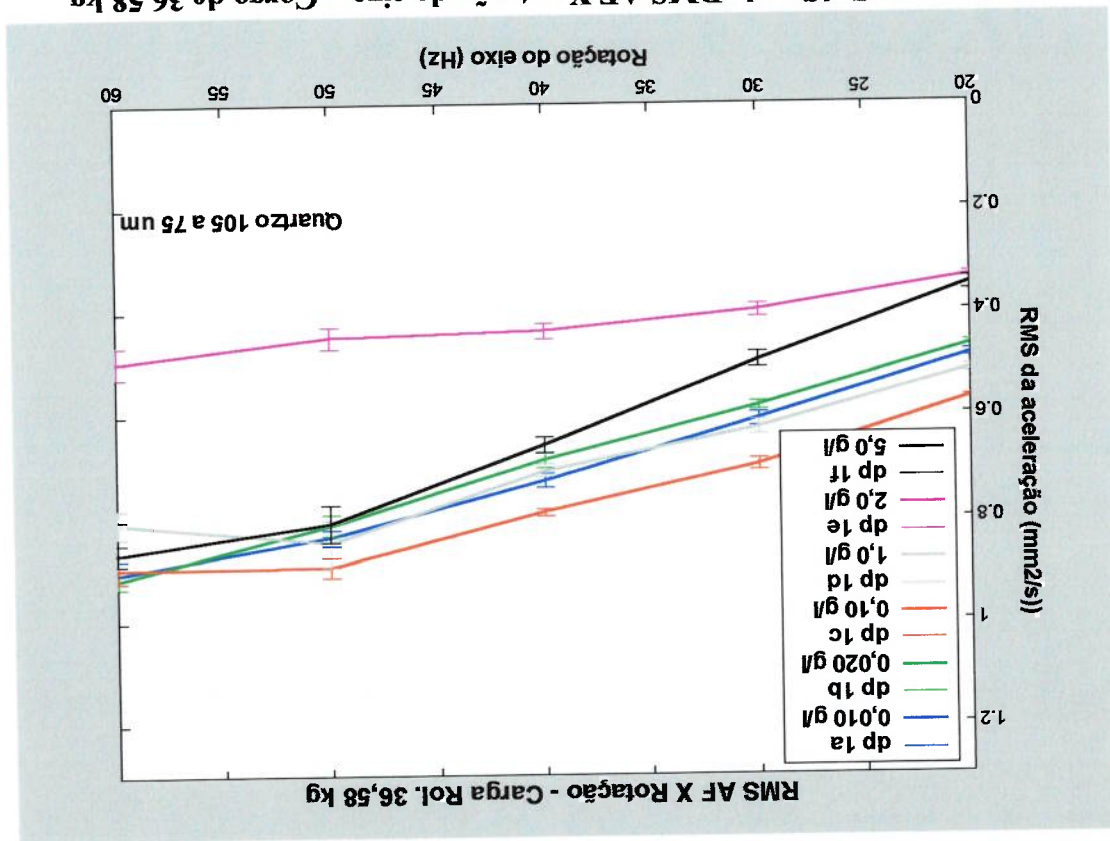


Figura 7-20 Gráfico de RMS AF X Rotação do eixo - Carga de 36,58 kg

O gráfico da figura 7-20 apresenta os resultados obtidos com o carregamento de 36,58 kg. Analisados dessa forma, RMS AF também acompanha a rotação, porém há concentrações em 60 Hz onde isto não ocorreu. Todas as condições de contaminação, exceto a "1e" de 2,0 g/l, com o menor valor de todas, e a "1c" de 0,10 g/l, com o maior valor de todas (exceto para 60 Hz), apresentaram valores próximos em todas as rotações registradas, ficando difícil identificar diferenças.

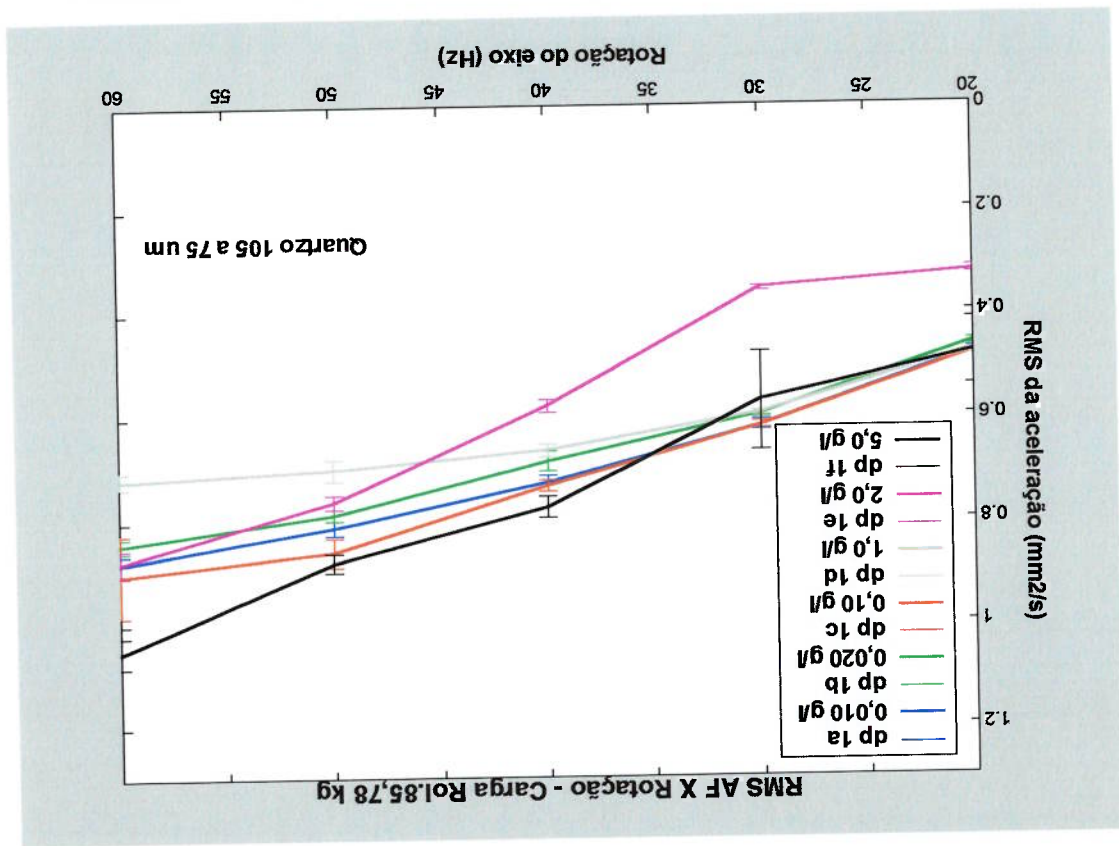
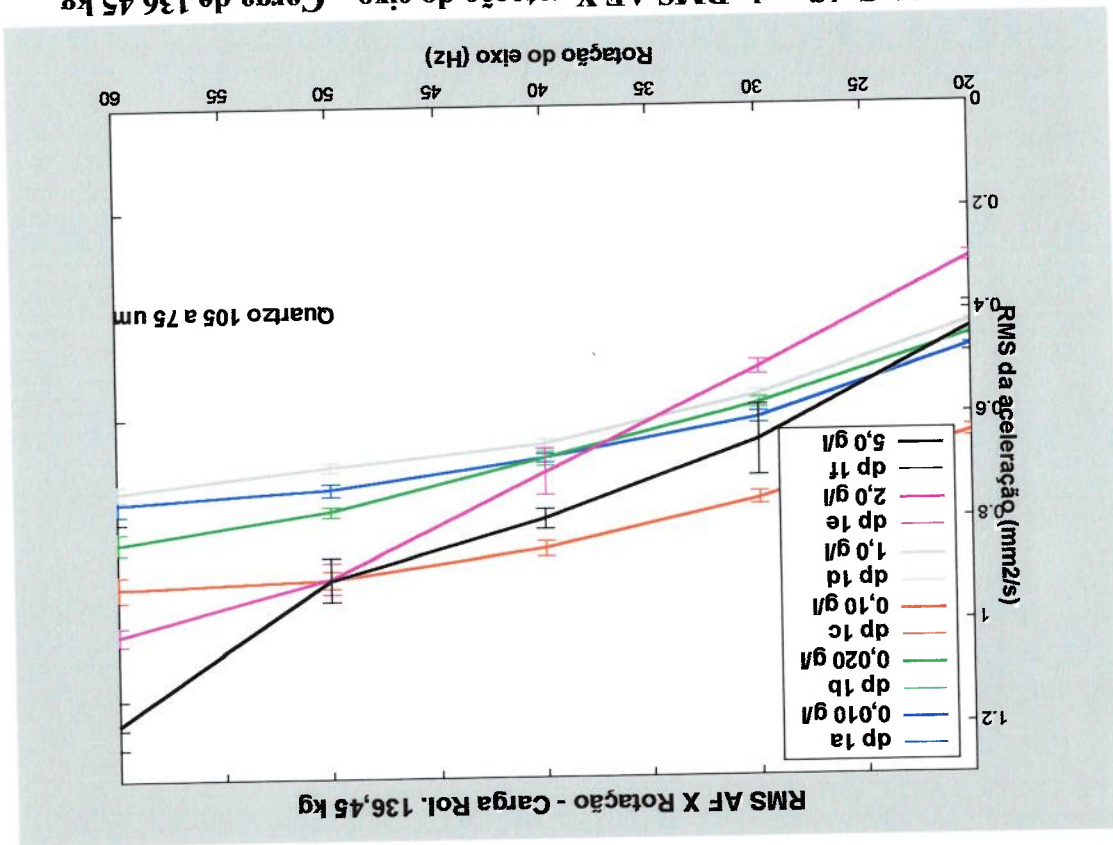


Figura 7-21 Gráfico de RMS AF X rotação do eixo - Carga de 85,78 kg

O gráfico da figura 7-21 referente ao carregamento de 85,78 kg, em algumas rotações, a condição "1e" de 2,0 g/l, apresenta destacadamente o menor valor de RMS AF entre todas. As demais condições apresentaram valores próximos em todas as rotações registradas, ficando difícil identificar diferenças.

Segundo o gráfico da figura 7-22, para o carregamento de 136,45 kg, para todas as rotações e condições de concentração, os valores de RMS AF se interceptam, sendo difícil identificar diferenças significativas ou algum comportamento específico entre as condições testadas.

Figura 7-22 Gráfico de RMS AF X rotação do eixo – Carga de 136,45 kg



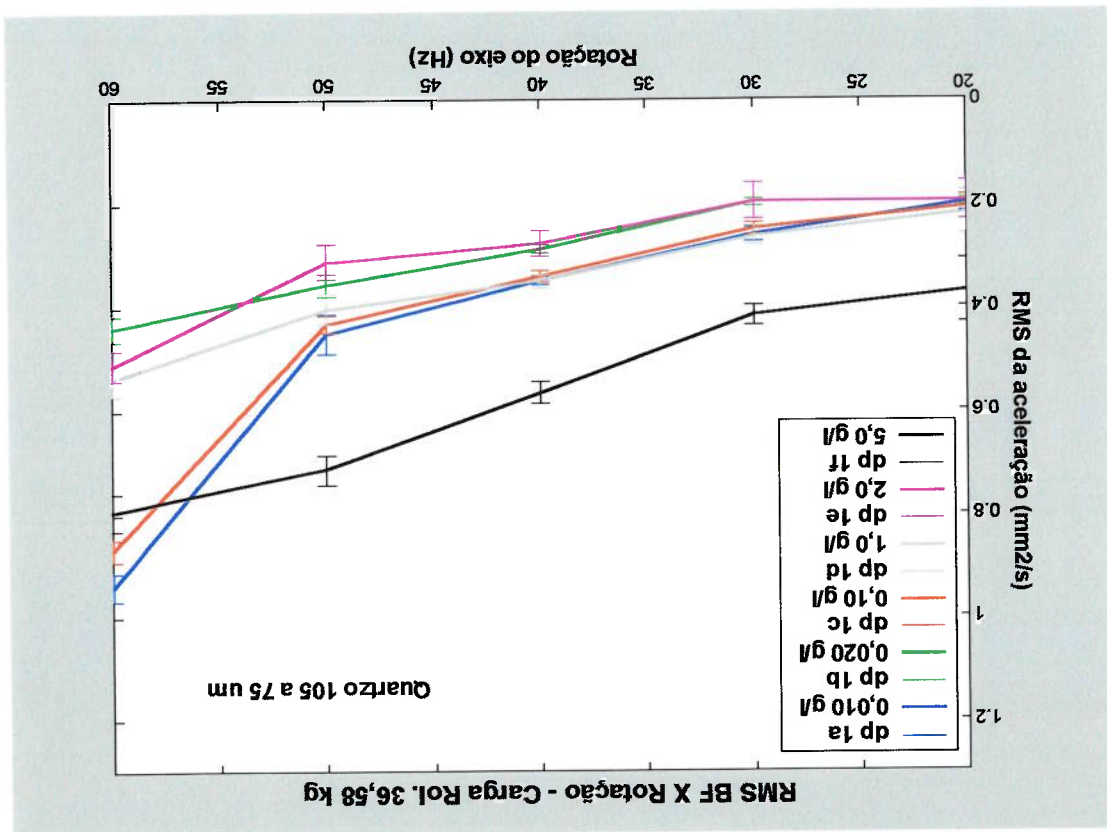


Figura 7-23 Gráfico de RMS BF X rotação do eixo – Carga de 36,58 kg

Observando-se o gráfico da figura 7-23 referente aos resultados obtidos com o carregamento de 36,58 kg, utilizando o RMS BF. Observa-se um aumento do RMS BF com a rotação, independente do nível de contaminação. Todas as condições de contaminação, exceto a “1f” de 5,0 g/l, com o maior valor de todas (exceto para 60 Hz), apresentaram valores próximos em todas as rotações registradas, com algumas pequenas variações, ficando difícil identificar diferenças. A condição “1f” se destaca por ser a de maior valor de RMS BF, exceto na frequência de rotação de 60 Hz.

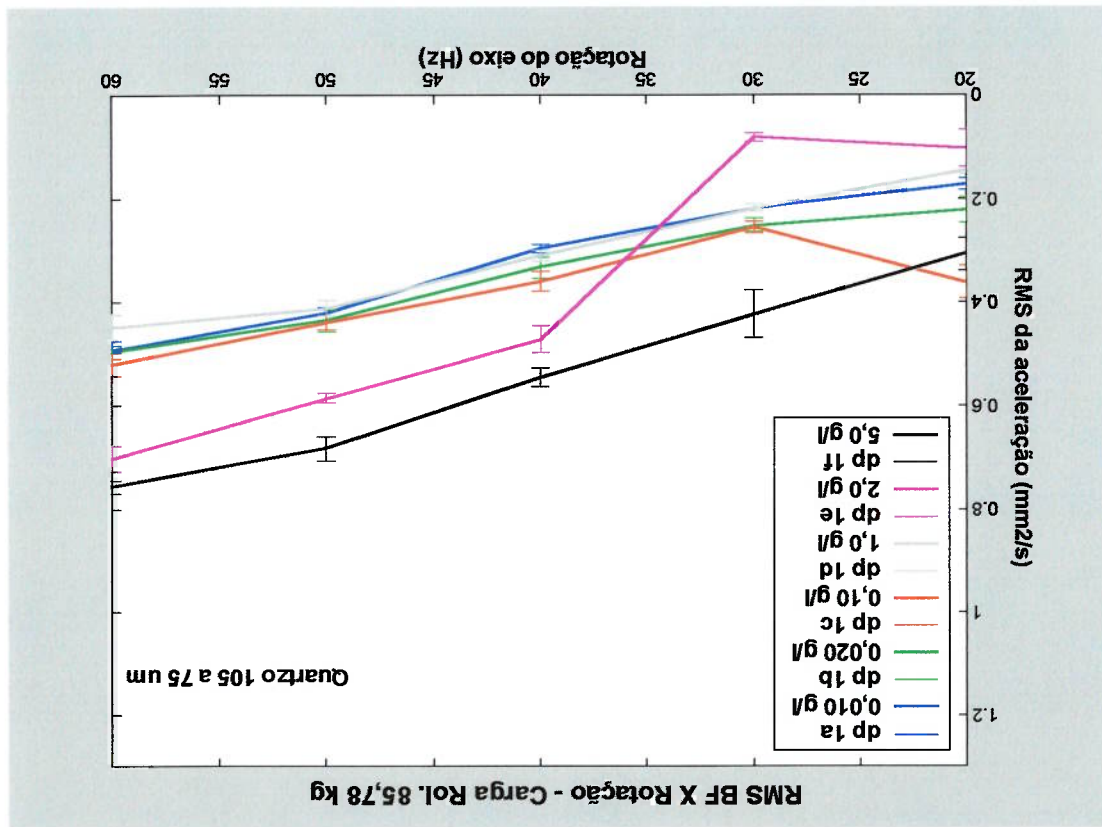


Figura 7-24 Gráfico de RMS BF X rotação do eixo - Carga de 85,78 kg

No gráfico da figura 7-24, aparecem os resultados do RMS BF para uma carga de 85,78 kg, todas as condições de contaminação, exceto a "1e" de 5,0 g/l, com o maior valor de todas (exceto para 20 Hz), seguida da condição "1e" de 2,0 g/l (exceto para 20 e 30 Hz), apresentaram valores próximos em todas as rotações registradas, ficando difícil identificar diferenças.

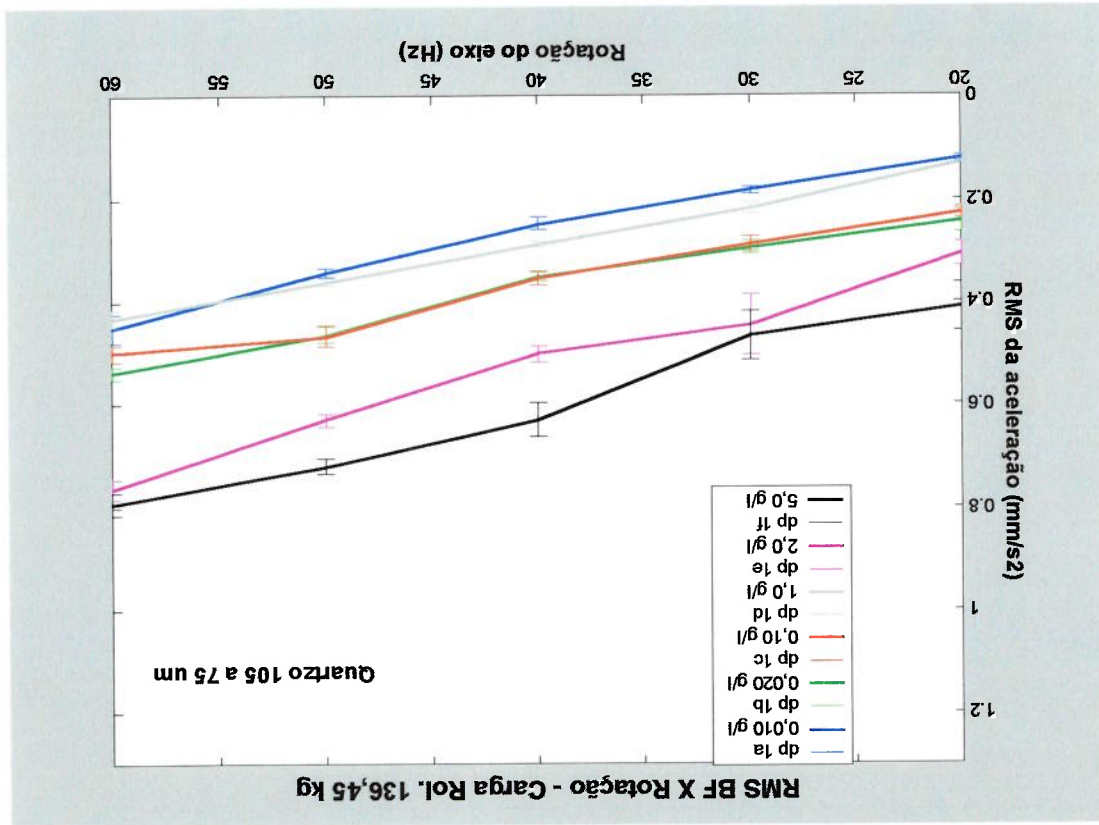


Figura 7-25 Gráfico de RMS SI X rotação do eixo - Carga de 136,45 kg

Finalmente, o gráfico da figura 7-25 apresenta os resultados do RMS BF para uma carga de 136,45 kg, todas as condições de contaminação, exceto a "1f" de 5,0 g/l, com o maior valor de todas (exceto para 30 e 60 Hz), seguida da condição "1e" de 2,0 g/l (exceto para 30 e 60 Hz), apresentaram valores próximos em todas as rotações registradas, ficando difícil identificar diferenças.

7.3.3. Correlação de resultados entre nível ISO de contaminação e vibração

A avaliação da correlação entre os registros da contaminação e os valores medidos e calculados do RMS SI para todas as condições experimentais foram feitos através dos gráficos das figuras 7-26, 7-27 e 7-28. Nesses gráficos todas as seis concentrações foram avaliadas em conjunto para cada uma das cargas aplicadas.

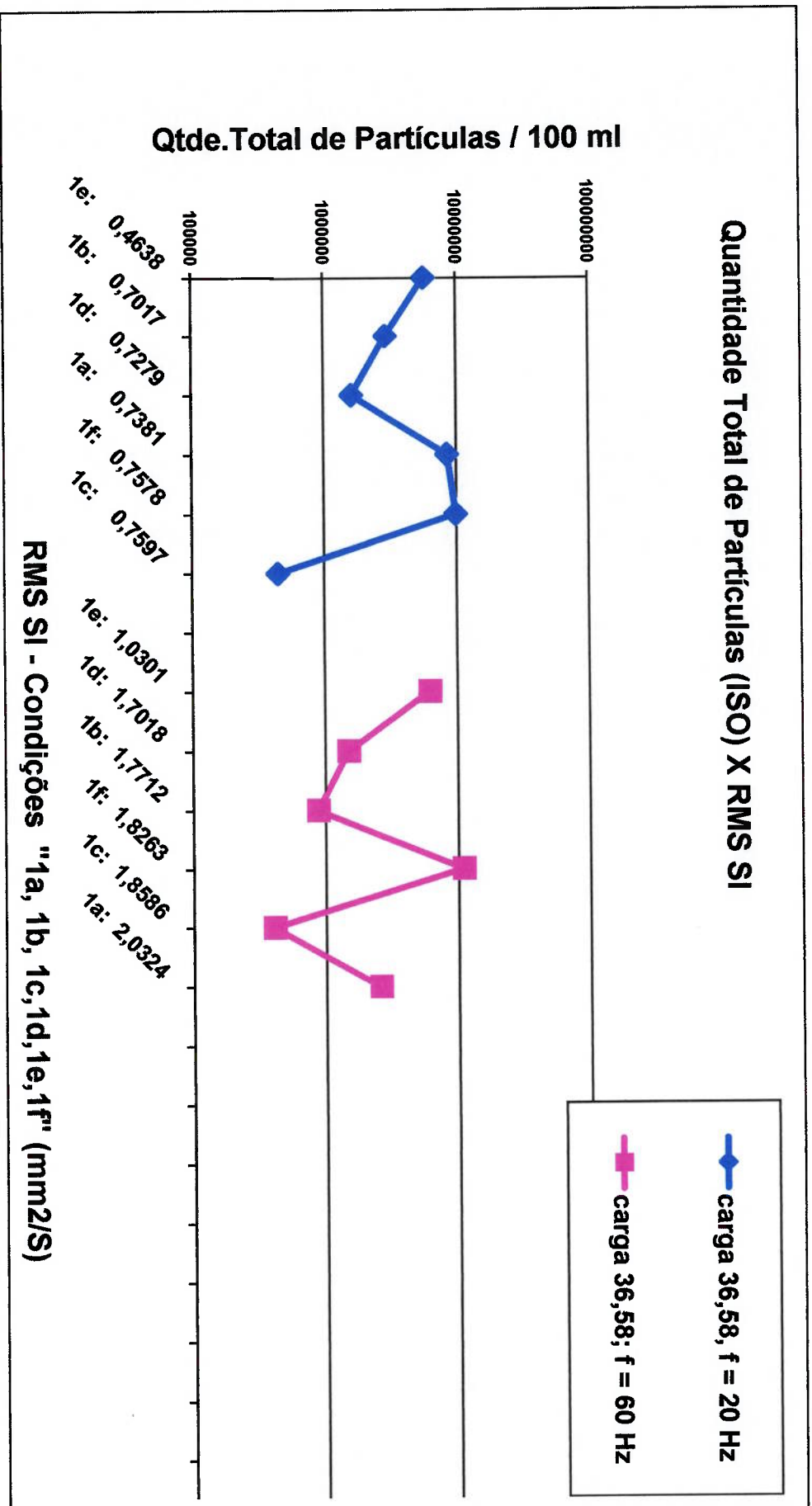


Figura 7-26 Gráfico comparativo entre contaminação e vibração – Carga de 36,58 kg

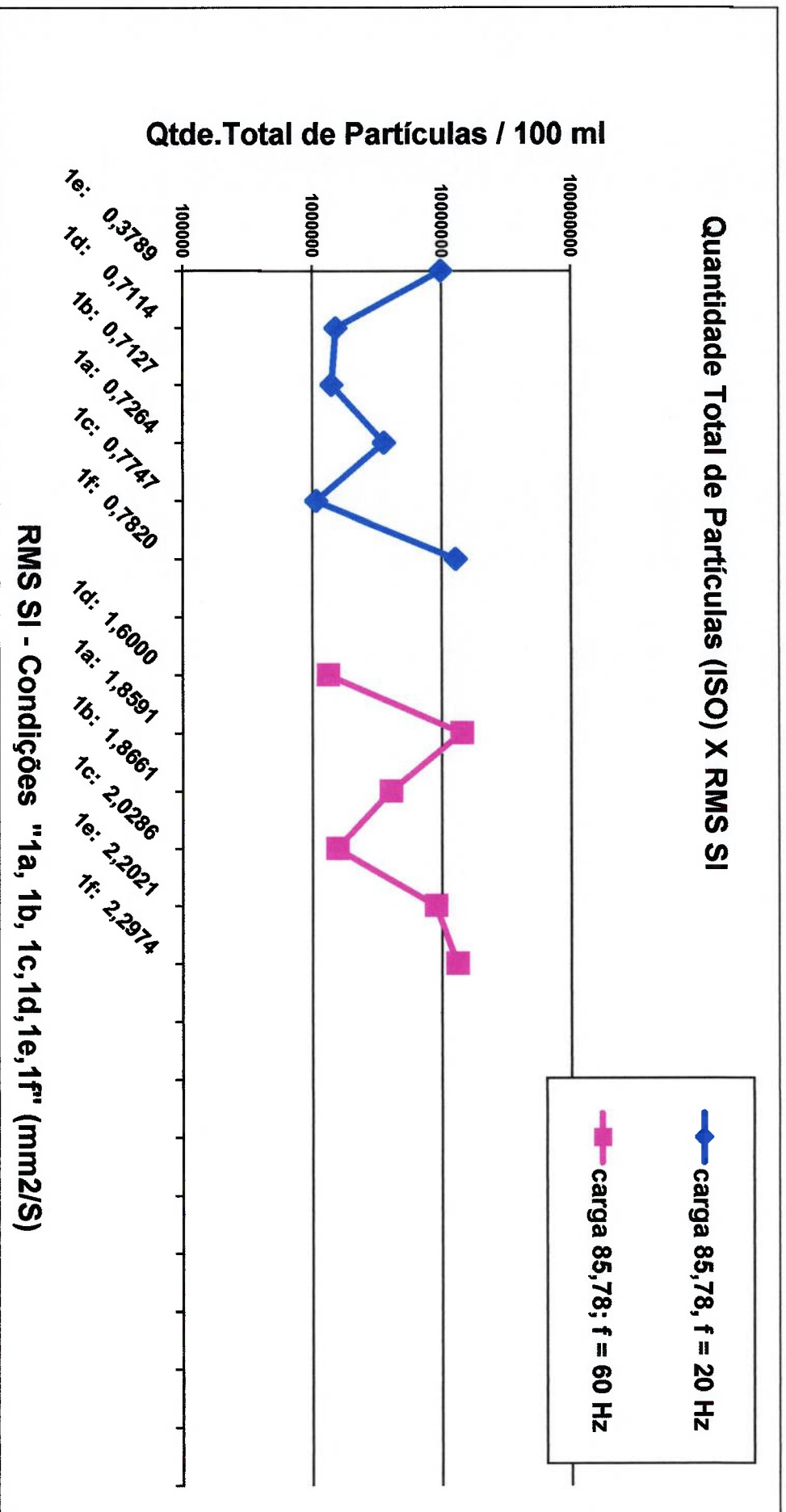


Figura 7-27 Gráfico comparativo entre contaminação e vibração – carga de 85,78 kg

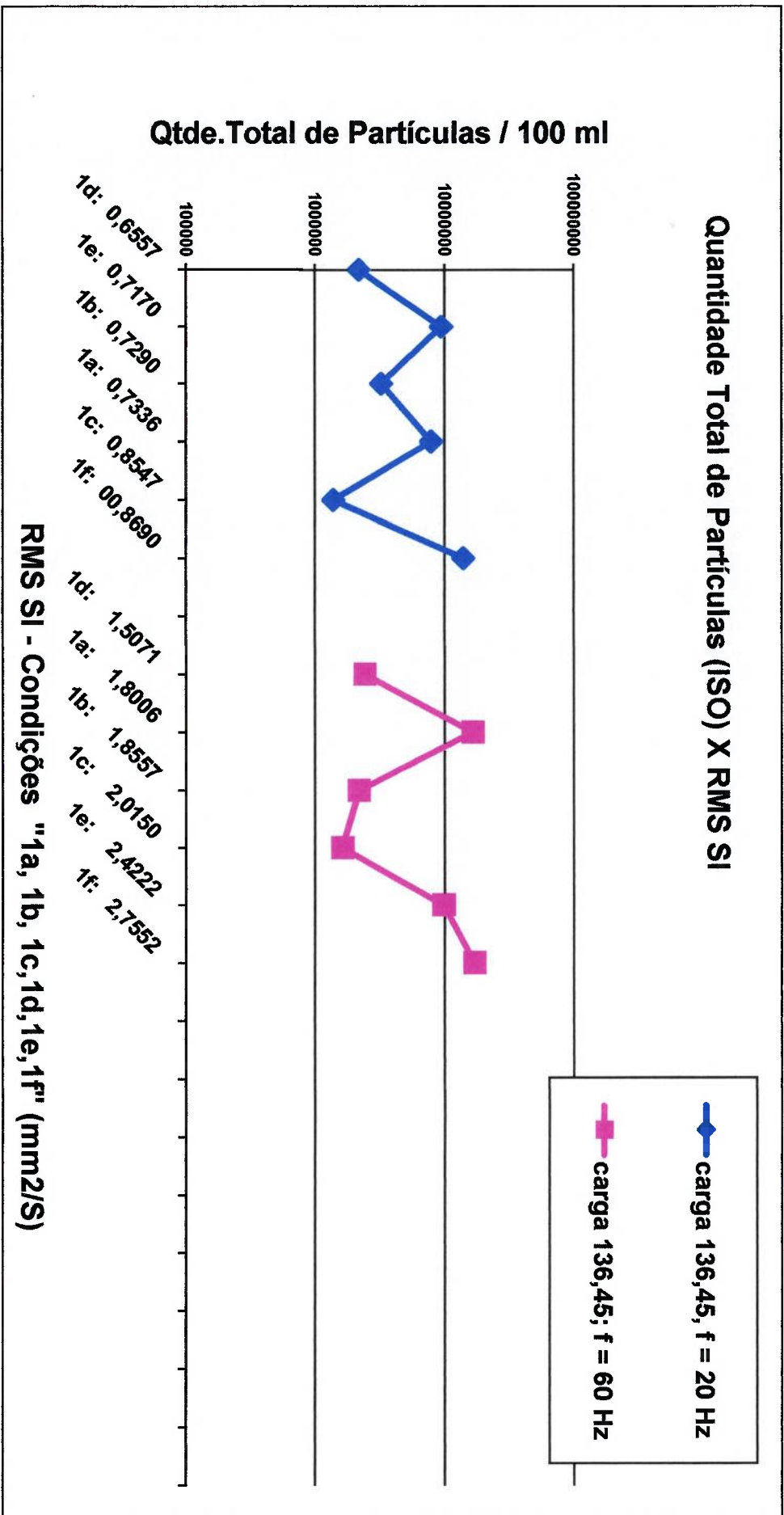


Figura 7-28 Gráfico comparativo entre contaminação e vibração – carga de 136,45 kg

Os gráficos das figuras 7-26, 7-27 e 7-28, foram divididos em três grupos, um para cada uma das cargas radiais aplicadas. Analisando-se os resultados podemos registrar que:

- nas seis variações executadas, as concentrações dos contaminantes não apresentaram um alinhamento lógico que acompanhe a evolução do RMS SI. Mesmo se descartarmos a condição "1a", pelos motivos já discutidos, o comportamento de queda do nível ISO que poderia **sugerir decantação** não se completa, pois a condição "1F" apresenta elevado nível ISO em todos os carregamentos;
- os resultados mostraram extrema diversidade que varia conforme a carga radial e a frequência de rotação, ou seja, não há um comportamento previsível e estável que possa ser estabelecido como predominante para as seis variações executadas;

- observa-se que a condição de contaminação "1F" (5,0 g/l) apresentou o maior valor de RMS SI em quatro das seis concentrações utilizadas;
- nas condições em que foram realizados os ensaios, os resultados sugerem a ocorrência de baixa correlação entre o valor do RMS SI da aceleração e a o nível ISO de contaminação definido pela concentração dos contaminantes utilizados.

7.3.4. Discussão dos resultados

Da mesma forma que na fase experimental anterior, para uma melhor discussão dos resultados foi elaborado uma tabela que resume como se deu o comportamento da contaminação em cada uma das etapas do ensaio. A mesma será discutida e em seguida o serão os resultados dos valores de vibração, fechando com comentários adicionais sobre a tabela de correlações entre contaminação e vibração.

A tabela 7-12, descreve o comportamento dos resultados de contaminação ao longo do desenvolvimento dos registros. Como já explicado anteriormente, registrou-se para cada carga aplicada, o nível de contaminação quando o rolamento operava a 20 Hz de rotação e um segundo registro foi realizado quando o rolamento operava em 60 Hz de rotação. Os símbolos triangulares refletem se o comportamento do grau de contaminação do óleo, ou seja, elevou-se, diminuiu ou manteve-se constante.

Tabela 7-12 Comportamento das partículas ao longo dos registros

Condição Experimental	Partículas > 2 µm	Partículas > 5 µm	Partículas > 15 µm	Partículas > 25 µm	Qtde. Total de Partículas
1 a	36,58 kg	▼▲	▼	▲	▲
	85,78 kg	▼▲	▲	▼	▼
	136,45 kg	▼▲	▼	▲	▼
1 b	36,58 kg	▲	▲	▲	▲
	85,78 kg	▼	▼	▲	▼
	136,45 kg	▲	▼	▼	▲
1 c	36,58 kg	▼	▲	▲	▲
	85,78 kg	▼	▼	▲	▼
	136,45 kg	▼	▼	▲	▼
1 d	36,58 kg	▼	▲	▲	▲
	85,78 kg	▲	▲	▲	▲
	136,45 kg	▼	▼	▼	▼
1 e	36,58 kg	▼	▲	▲	▼
	85,78 kg	▼	▲	▲	▲
	136,45 kg	▲	▼	▲	▼
1 f	36,58 kg	▲	▼	▼	▼
	85,78 kg	▲	▲	▼	▼
	136,45 kg	▼	▼	▼	▼

Percebe-se pela tabela 7-12, expurgando-se a condição '1a', reportada como anormal, que a grande tendência verificada pelos resultados da contagem de partículas foi a de diminuição geral da quantidade de contaminantes no decorrer dos ensaios. No entanto, essa diminuição pode ser considerada pequena perto dos índices registrados, ou seja, mesmo sob efeito da filtração realizada pelo filtro interno do equipamento, as quantidades de partículas de contaminantes não diminuíram, e os níveis de contaminação medidos foram considerados muito elevados. Em função disso, é razoável supor que parte das partículas tenham se decantado e uma parcela delas tenha se alojado na região de contato da pista com os elementos rolantes.

A grande diversidade no alinhamento das retas observada na maioria dos resultados dessa terceira fase experimental pode estar relacionada ao nível de concentração do contaminante no banho. A figura 7-29 serve para ilustrar o possível mecanismo que teria ocorrido.

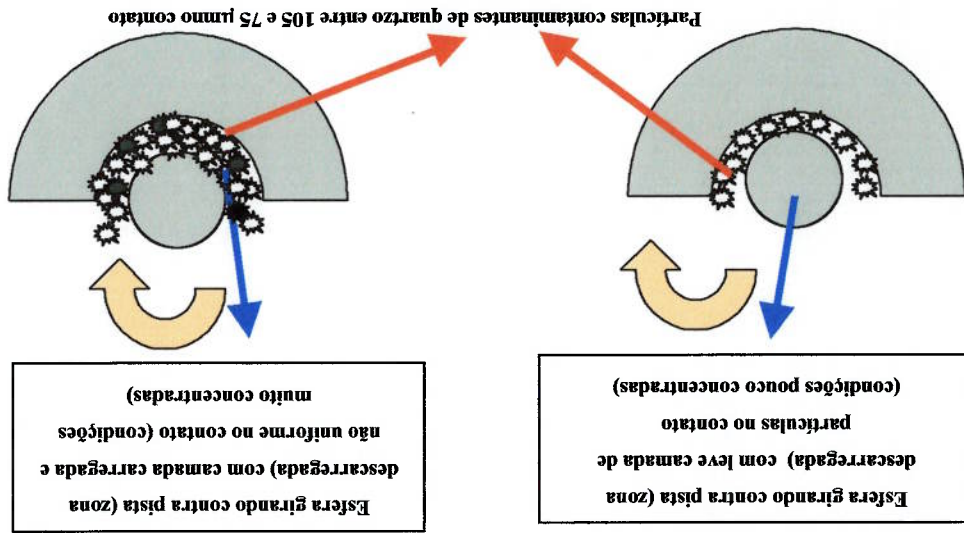


Figura 7-29 Possível mecanismo ocasionado por partículas de quartzo

É possível portanto, que devido a sequência que esta fase experimental foi conduzida (a mesma utilizou seis sequências consecutivas de partículas de mesmo tamanho e com concentrações diferentes), que a formação de deposição de partículas grandes de quartzo na zona descarregada do rolamento tenha se dado de forma irregular, ou seja, partículas poderiam se posicionar no contato de modo diferente dependendo da sequência de teste, sugerindo uma medição não uniforme dos valores de RMS da aceleração.

Assim, analisando-se os nove gráficos de RMS em três carregamentos e em todas as faixas de frequências adotadas (Figuras 7-16 a 7-25), pudemos constatar que:

- analisando o RMS SI da vibração, o melhor alinhamento ocorreu com a carga radial de 136,45 kg (Figura 7-19);

- em 36,58 kg, para todas as faixas a condição “1e” (2,0 g/l) apresentou os menores valores, não existindo uma explicação razoável para esta constatação;
- a condição “1f” (5,0 g/l), com exceção da condição RMS AF e 136,45 kg, apresentou **sempre** os maiores valores de RMS, sendo que a hipótese que pode explicar esta constatação foi abordada no item 7.3.2;

• A avaliação da concentração de contaminantes através do RMS da vibração parece ser possível de ser realizada, para algumas condições de contaminação, dependendo da concentração e tamanho do contaminante e da quantidade prévia de saturação do banho de óleo.

Abordando agora o assunto correlação contaminação-vibração, percebeu-se que analisando-se as seis concentrações simultaneamente, baixa correlação contaminação-vibrações foi identificada. Entretanto, se dividirmos os resultados em dois grupos de concentração, um de baixa concentração (0,010 a 0,10 g/l), (expurgando-se da análise a condição “1a”, reportada como anormal) e um segundo grupo de média-elevada concentração (1,0 a 5,0 g/l), percebe-se um comportamento diferente. Esses dois gráficos encontram-se nas figuras 7-30 e 7-31, colocadas na sequência.

Constatou-se que:

- Condições “1b e 1c”: apresentam para a frequência de 20 Hz um comportamento parecido, que lembra o da segunda fase de ensaios. Aparentemente, quando as duas frequências de rotação e para as três cargas, há pequena tendência de quebra de partículas, sugerindo pequena **trituração (massa de pó baixa)** e grande decantação de partículas. Se desconsiderarmos a condição “1a”, a quantidade de partículas ISO cai conforme a concentração aumenta;
- Dessa forma, para todas as condições de contaminação, a condição de maior concentração (“1c”) **tendeu a apresentar o maior valor de RMS SI**, exceção feita para a carga de 36,58 kg e 60 Hz;

• Já para as condições “1d, 1e e 1f”, que correspondem as maiores concentrações, o comportamento para carga leve sugere a ocorrência de já discutidas ocorrências de **decantação seguida de trituração de**

- partículas.** É possível que a concentração tenha influência nesse processo. Entretanto, esse comportamento também é instável e não se mantém para todas as cargas e velocidades. O gráfico da figura 7-31 mostra uma suposta mudança de condição onde esse fenômeno deixa de ocorrer (após frequência de rotação de 60 Hz e carregamento de 85,78 kg), pois conforme a concentração aumenta, aumenta o nível ISO e o RMS;
- Também aqui chama a atenção que para as três maiores condições de concentrações, a condição de maior concentração ("1") apresentou o maior valor de RMS SI;

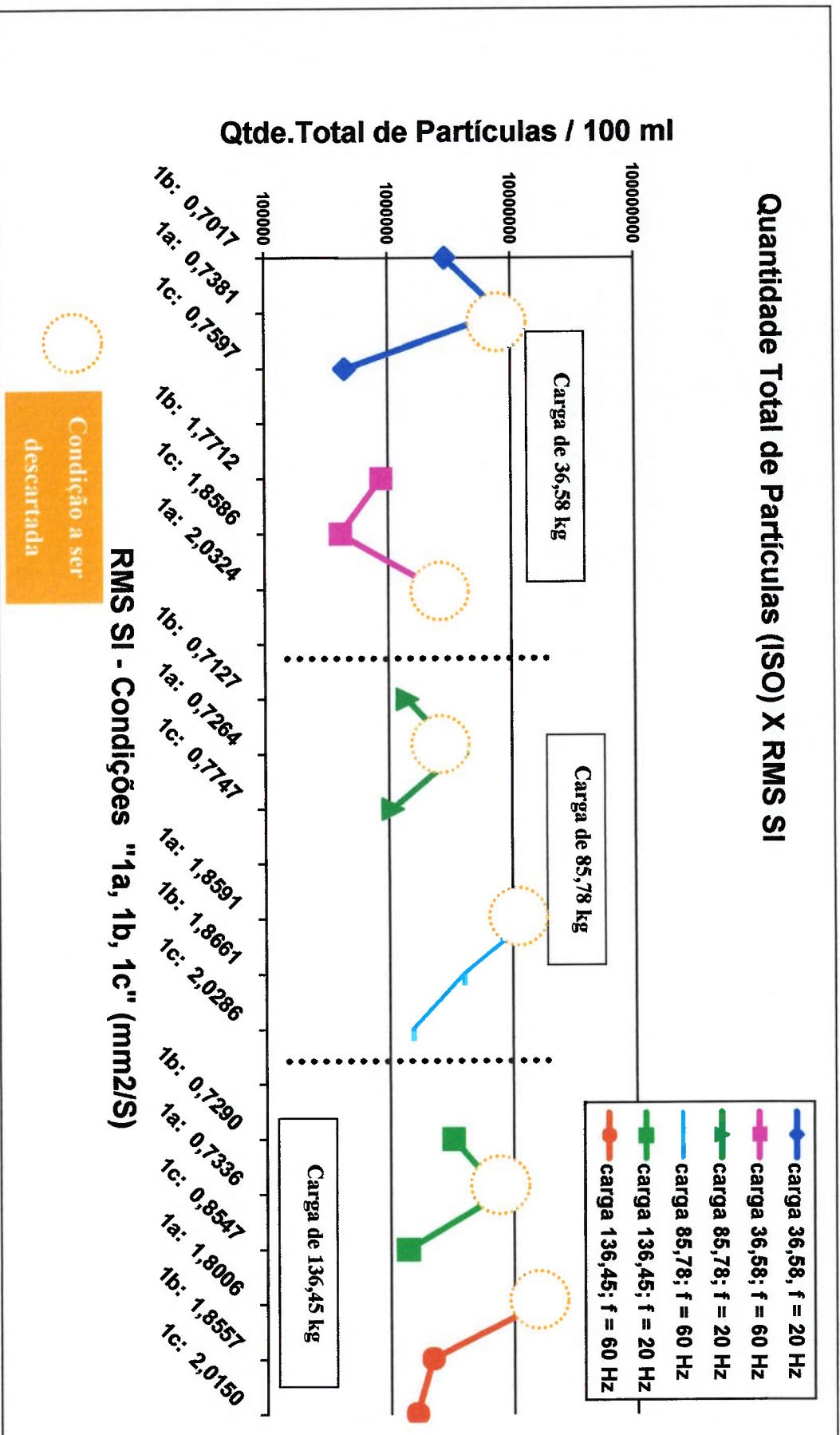


Figura 7-30 Gráfico comparativo entre contaminação e vibração – Condições "1a,1b,1c"

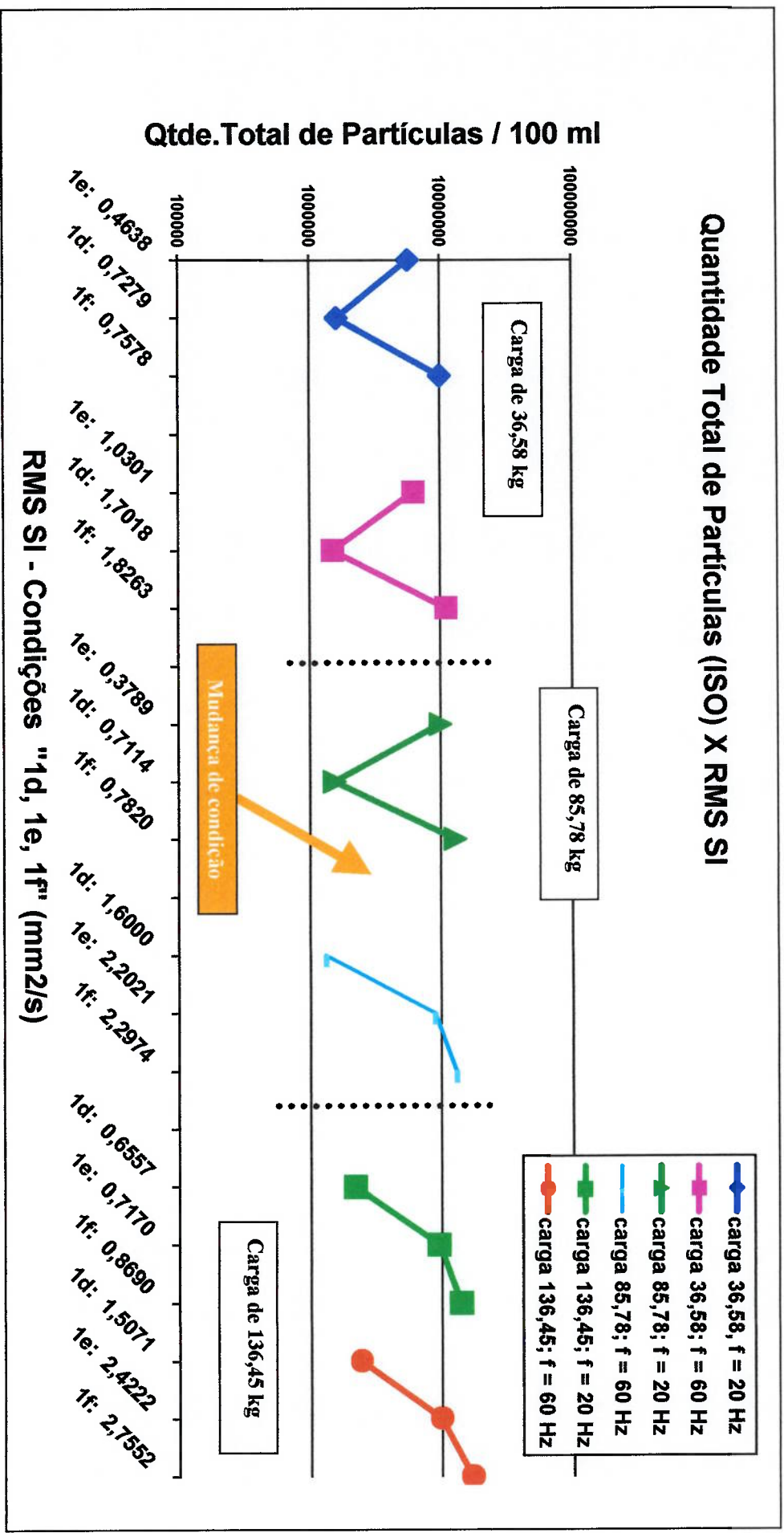


Figura 7-31 Gráfico comparativo entre contaminação e vibração – Condições "1d, 1e, 1f"

7.4. 4º Fase Experimental: Avaliação do comportamento da taxa de contaminação (g/l) X RMS da aceleração para óleos limpos e contaminados

Nesta quarta e última fase de experimentos, duas faixas de contaminantes foram utilizadas: uma menor do que 20 µm e outra entre 75 e 53 µm. Como visto no item 5.4, os tamanhos médios de partículas de quartzo encontrados no primeiro grupo foram de 16 µm e no segundo grupo 86 µm. Amostras de óleo com seis concentrações diferentes foram preparadas, conforme Tabela 6-3.

O objetivo desta quarta fase experimental é avaliar se a agitação forçada do banho de óleo, procedimento introduzido para se evitar ao máximo a decantação, pode influir na avaliação da contaminação através da vibração. Também nesta fase experimental faremos constatações de como ficou a superfície do rolamento e quais os impactos de desgaste (através de ferrografia) após a realização dos ensaios, visando avaliar impactos de contaminantes no desgaste e na vibração dos rolamentos. Nesta fase as alterações realizadas nos ensaios foram a ausência do contador de partículas e a agitação manual forçada do banho. O objetivo dessa intervenção foi de fato polir ao máximo o contato do rolamento, ou seja, visou-se simular a introdução contínua de contaminantes na zona descarregada pistas-ésteras.

Nesta última fase experimental, durante o processamento dos sinais foram mantidos os mesmos critérios anteriores de cálculos dos valores de RMS, ou seja, para o sinal inteiro e filtrados em alta e baixa frequência. Os resultados são mostrados através de gráficos agrupados onde pode-se analisar melhor o efeito da presença do contaminante no contato dos rolamentos.

7.4.1. Óleos sem contaminantes e com contaminantes menores que 20 µm

Foram adquiridas na primeira parte da experiência, cinco diferentes condições experimentais, referentes a tamanhos de contaminantes entre 0 e 20 µm.

Inicialmente os sinais dos rolamentos com óleo lubrificante sem contaminante foram coletados, condição que será considerada como condição base para comparações. Em seguida, realizaram-se aquisições com óleos contaminados, utilizando faixas de tamanho e concentrações conhecidas, conforme tabela 6-3.

Foram preparadas as seguintes amostras:

- 0,10 g/l de quartzo entre 0 e 20 μm , discriminada como condição experimental "2c";

- 1,0 g/l de quartzo entre 0 e 20 μm , discriminada como condição experimental "2d";

- 5,0 g/l de quartzo entre 0 e 20 μm , discriminada como condição experimental "2e";

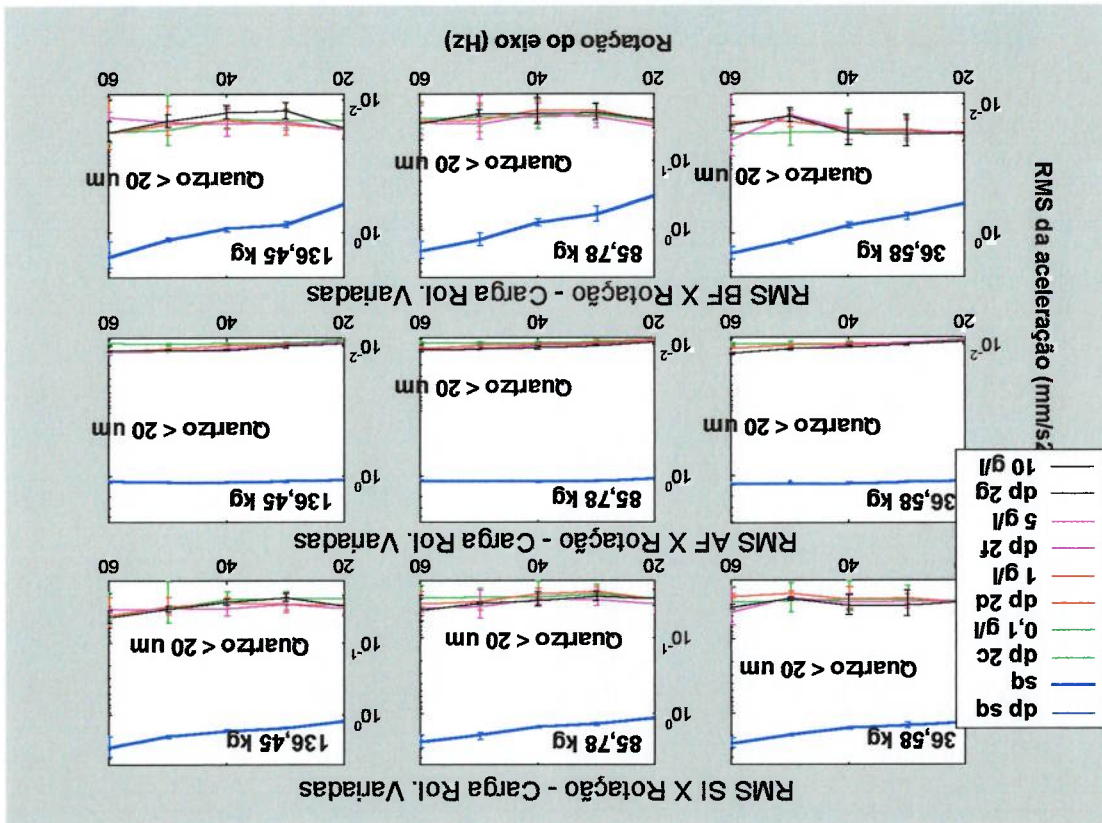
- 10,0 g/l de quartzo entre 0 e 20 μm , discriminada como condição experimental "2g";

Os resultados serão mostrados na forma de gráficos. Inicialmente, apenas para efeito comparativo, serão plotadas conjuntamente todas as condições experimentais.

Observa-se nos gráficos da figura 7-32 um nível de vibração muito mais elevado para a condição limpa do que aqueles observados nas condições contaminadas. No entanto, a ordem de grandeza da identificação é bastante superior àquelas observadas nas duas fases anteriores, quando comparadas à primeira fase. Diferenças de RMS da ordem de 100 vezes entre os óleos limpos e contaminados são inaceitáveis para o experimento.

Nesta fase do trabalho, registra-se que essa grande diferença existente entre os valores de RMS da aceleração existente entre óleo sem o contaminante quartzo e o das condições com a presença do contaminante foram melhor investigadas. Avaliaram-se a assinatura do sinal no tempo e suas transformadas de Fourier para vários sinais originais adquiridos no tempo. Para os sinais sem contaminante, o sinal no tempo tem uma aparência adequada, ao passo que para vários sinais originais referentes a condições contaminadas, o aspecto geral apresenta-se distorcido,

Figura 7-32 Gráfico de RMS SI, AF, BF X rotação do eixo - 3cargas com óleo limpo - < 20 µm



sugerindo a ocorrência de problemas de instrumentação durante as aquisições, sendo portanto seus cálculos pouco confiáveis. Por esse motivo, todo o banco de dados contendo os resultados referentes a quarta fase experimental foi descartado.

7.4.2. Óleos sem contaminantes e com contaminantes entre 75 e 53 µm

A mesma diferença foi percebida para os resultados com os contaminantes com tamanho entre 75 e 53 µm. Da mesma forma que no item anterior, foram preparadas quatro amostras, referentes as condições “7c, 7d, 7f e 7g”, segundo tabela 6-3. As amostras foram preparadas com:

- 0,10 g/l de quartzo entre 75 e 53 µm, discriminada como condição experimental “7c”;
- 1,0 g/l de quartzo entre 75 e 53 µm, discriminada como condição experimental “7d”;
- 5,0 g/l de quartzo entre 75 e 53 µm, discriminada como condição experimental “7f”;
- 10,0 g/l de quartzo entre 75 e 53 µm, discriminada como condição experimental “7g”;

O gráfico da figura 7-33 refere-se aos resultados dessas aquisições.

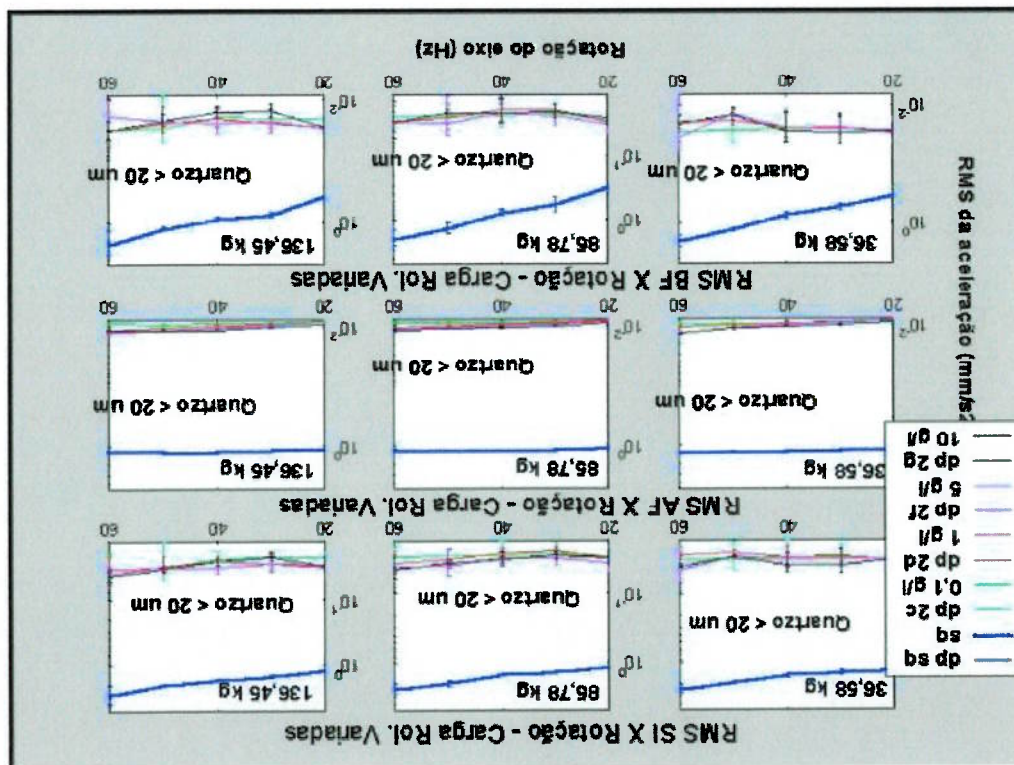


Figura 7-33 Gráfico de RMS SI, AF, BF X rotação do eixo – 3 cargas, com óleo limpo – 75 a 53 µm

Assim como observado com as partículas de tamanhos menores, observou-se pela análise do gráfico da figura 7-33 que o RMS para a condição de óleo limpo é muito superior aos das condições contaminadas, evidenciando novamente a ocorrência de problemas de instrumentação, provavelmente iniciados na aquisição dos sinais com óleos contaminados.

7.5. Avaliação das folgas radiais, rugosidades e superfícies

Nesta parte do texto, foram realizadas algumas avaliações comparativas entre um rolamento novo, sem uso, e o rolamento utilizado nos testes após o mesmo ser submetido aos ensaios. A seguir serão mostrados os resultados comparativos, através da avaliação tanto das folgas internas, como da medição das rugosidades, e finalmente os registros visuais das superfícies de trabalho.

7.5.1. Avaliação das folgas internas

Após a realização dos ensaios na bancada, os rolamentos que já tinham tido sua folga radial previamente medida, retornaram ao fabricante para medição dos valores e medição do nível de ruído, através de um aparelho chamado andrômetro. Os resultados são mostrados na tabela 7-13.

Tabela 7-13. Valores de folga interna radial e nível de ruído

Condição Experimental	Aumento			Reprovado
	Nível de ruído antes dos ensaios	Nível de ruído após os ensaios	(%)	
Folga real antes dos ensaios(µm)	17	28	64	
Folga real após os ensaios(µm)				

7.5.2. Avaliação das rugosidades superficiais

Da mesma forma que no item anterior, reportados agora os resultados das medições da rugosidades superficiais do rolamento antes e após serem utilizados nos experimentos.

Dois rolamentos, um novo sem uso e outro utilizado nas sequências experimentais, foram lavados, secos e retornaram ao fabricante. Lá após terem sua folga interna medida (vide item anterior) foram cortados em seis partes iguais, tendo assim tido separados seus anéis, gaiolas e esteras.

As medições de rugosidade foram feitas no rugosímetro do LFS-Poli, da marca Kosakalab, modelo Surforder SE1700α. Os parâmetros de medições utilizados foram:

- Conforme normas ISO97/JIS2001
- Velocidade: 0,050 mm/s
- Corte: $\lambda_c = 0,080$ mm
- Comprimento: 0,400 mm

Os registros das medições encontram-se nos Anexos 15 a 20.

A tabela 7-14 mostra os resultados obtidos. Os números obtidos são valores médios que se referem à regiões distintas do mesmo rolamento.

Tabela 7-14. Valores médios de rugosidade medidos após ensaios

Valores médios de R_a medidos (μm) Médias de 3 ou 4 regiões distintas				aproximado(%)	
Anel Externo (Fixo)	Anel Interno (rotativo)	Esfera	0,0380	0,1478	289,0
		Sem Uso	0,0937	0,1791	333,0
		Aumento			91,0
		Após ensaio			

Através da análise dos resultados da tabela, percebe-se claramente que os efeitos abrasivos das partículas de quartzo são potencialmente mais danosos quando as superfícies giram e provocam uma taxa de riscamento maior. A pista do anel externo do rolamento, que manteve-se fixa durante as experiências, teve sua rugosidade aumentada, porém com uma taxa de aumento bastante inferior a das esferas e da pista interna do anel interno.

No item 6.7.2 havíamos calculado o parâmetro λ com base nas rugosidades teóricas informadas pelo fabricante dos rolamentos. O parâmetro foi teoricamente considerado elasto-hidrodinâmico para todas as quinze seqüências de teste, com λ variando entre 3,1 e 8,0, nas duas conjunções.

O cálculo foi referido baseado nas rugosidades médias registradas após os ensaios, o que é mostrado na tabela 7-15.

Tabela 7-15. Novos cálculos de λ e regimes de lubrificação

Avaliação	Novo Cálculo λ (real)	R_a Pista Externa (μm)	R_a Pista Interna (μm)	R_a estera (μm)	$h_{o\text{min}}$ (μm)	
Misto ou Limite	1,27	-	0,1804	0,1478	0,29718	Conjunção Estera - Pista Interna - Min
Misto ou Limite	2,45	-	0,1804	0,1478	0,57050	Conjunção Estera - Pista Interna - Máx
Misto ou Limite	1,54	0,1791	-	0,1478	0,35805	Conjunção Estera - Pista Externa - Min
Misto ou Limite	2,96	0,1791	-	0,1478	0,68737	Conjunção Estera - Pista Externa - Máx.

Nota-se que teoricamente houve a possibilidade da ocorrência de uma alteração no regime de lubrificação. Esta ocorrência que teria sido provocada pelos experimentos será avaliada e investigada no item 7.6, através dos resultados das análises dos resíduos de desgaste nas amostras de óleo utilizadas.

Apesar de apenas a sequência mais severa ter sido analisada, é bastante possível aceitar que os mesmos fenômenos tenham ocorrido pra a condição entre 0 e 20 μm .

7.5.3. Avaliação das superfícies

Inicialmente mostraremos a superfície das esteras de um rolamento sem uso e as esteras de um outro rolamento submetido às condições experimentais com contaminação por quartzo.

Analisando-se as fotos apresentadas na figura 7-34, percebe-se uma coloração diferenciada da esfera submetida aos ensaios, com aparência mais opaca e sem brilho, ocasionada pelo trabalho da esfera em meio lubrificante com contaminação de origem sólida.

A esfera correspondente ao rolamento novo, sem uso, apresenta brilho e aparência lapidada.

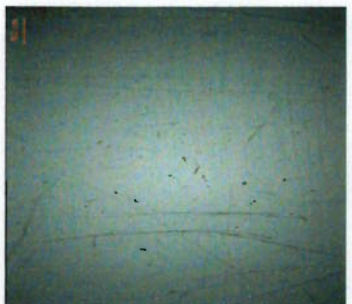
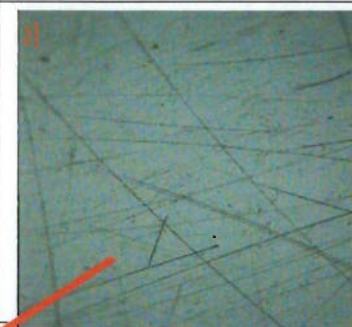
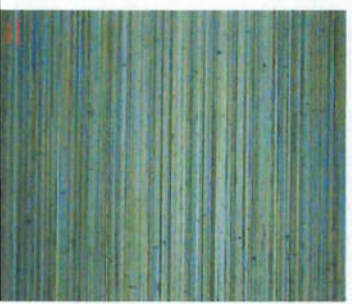
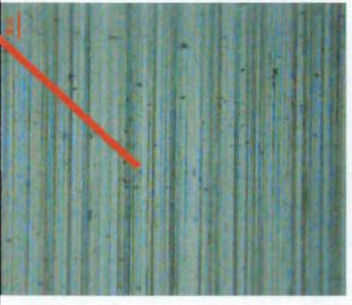
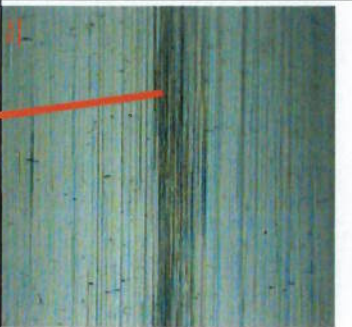


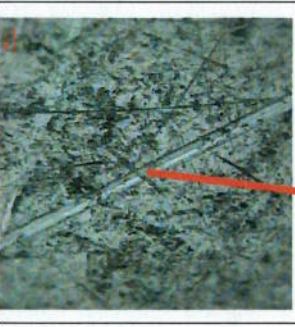
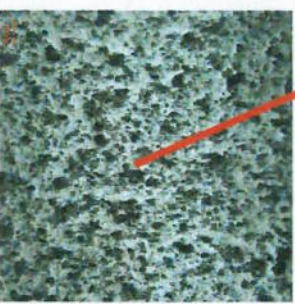
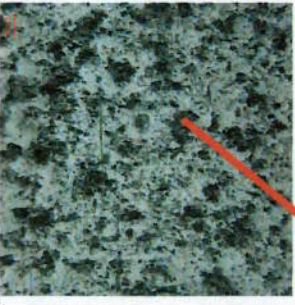


É possível identificar claramente os efeitos abrasivos dos cristais de quartzo nas superfícies das esferas que trabalharam em óleos sem e com a presença de contaminantes.

As micro-fotos mostradas na tabela 7-16 referem-se a superfícies de esferas e pistas internas do anel interno e pistas externas do anel externo, de um rolamento sem uso e do rolamento testado após as duas condições experimentais, analisadas em microscópio e aumentadas de 100 e 200 vezes.

Figura 7-34. Fotos de esferas dos rolamentos



Tabela 7-16. Micro fotos das esferas e pistas do rolamento Riscos originais de usinagem

	Riscos por manipulação pós polimento		Riscos originais de usinagem					
	Esfera	Esfera	Pista do Anel Interno	Pista do Anel Interno	Pista do Anel Externo	Idem		
	Aumento 100 X	Aumento 200 X	Aumento 100 X	Aumento 200 X	Aumento 100 X	Aumento 200 X		
Sem uso							Não registrado	
Após ensaios							Não registrado	

Provável risco devido a abrasão do quartzo

Prováveis marcas de desgaste oxidativo (superfícies que giraram)

Marcas de desgaste de superfície mantida fixa (deslizamento)

Prováveis óxidos escuros advindos da oxidação do óleo

Em relação às micro-fotos dos componentes sem uso, registaremos algumas observações. Para os componentes sem uso destacamos:

- Estêras sem uso: apesar das superfícies serem originariamente lapidadas e isentas de riscos, é possível que a manipulação tenha ocasionado riscos superficiais;
- A região das pistas internas e pistas externas sem uso aparentemente apresentaram-se preservadas;

Para os componentes com uso destacamos as seguintes constatações:

- Nas estêras, que trabalharam girando tanto com folga equivalente ao filme de óleo como isentas de contato na zona descarregada, foram observadas as presenças de marcas que lembram mecanismos de desgaste oxidativo (não comprovadas por análises complementares), provavelmente ocasionadas pelos cristais de quartzo, além de óxidos escuros que provavelmente foram originados dos efeitos de oxidação das moléculas do óleo (isento de qualquer aditivação) nos contatos;

- Já nas pistas do anel interno, que tiveram cargas rotativas aplicadas enquanto giravam, as marcas desses prováveis alojamentos de óxidos foram ainda mais evidenciadas, tornando a superfície com um efeito que lembra a figura e uma “couve-flor”. Os efeitos da oxidação do óleo também são muito evidentes e estão bem caracterizados;
- Já as pistas do anel externo também apresentaram significativas alterações em suas superfícies, porém o grau de desgaste observado foi muito menor que o da pista interna, uma vez que este anel permaneceu fixo durante os experimentos.

7.6. Resultados das análises de resíduos de desgaste nos óleos

Nesta última parte do texto que envolve as avaliações da experiência, foram realizadas para algumas seqüências, ensaios de resíduos de desgaste nos óleos lubrificantes utilizados. Com isso, poderão ser melhor avaliadas algumas das hipóteses levantadas anteriormente.

As amostras de óleos de todas as concentrações ensaiadas, uma vez concluída a aquisição de dados, foram coletadas em frascos e enviadas ao laboratório Tribolab

para análise. As amostras de todas as concentrações foram submetidas a ensaios de espectrometria. Apenas as amostras das duas condições de maior concentração, a “2g” e a “7g”, com cerca de 10 g/l de quartzo cada, avaliadas como as condições onde foram impostas uma maior severidade aos contatos, e que foram submetidas às análises complementares de ferrografia quantitativa e analítica

Em função da quantidade de contaminante adicionada ao banho, a expectativa era que esse tipo de análise não só reportasse a contaminação, como também a partir de técnicas especiais de filtragem e ataque de superfícies, pudesse informar a forma e o tamanho das partículas de desgaste encontradas nos ferogramas.

A seguir serão mostrados os resultados, seguido de comentários e observações, dos resultados de ensaios envolvendo as técnicas de espectrometria (detecção de partículas < 15 µm), ferrografia quantitativa e ferrografia analítica.

7.6.1. Resultados dos ensaios de espectrometria

. Os resultados dos principais metais de desgaste e contaminação são mostrados na tabela 7-17.

Tabela 7-17. Valores dos metais no óleo através de espectrometria

Condição Experimental	Fe (ppm)	Cr (ppm)	Pb (ppm)	Sn (ppm)	Al (ppm)	Si (ppm)	Demais metais de desgaste (ppm)
Óleo Novo	0	0	1	0	0	0	0
(Filtrado)							
Óleo de amaciamento	0	0	0	0	0	0	0
Sem Contaminante	0	0	0	0	0	0	0
Quartzo < 20 µm							
2c	1	0	0	1	0	2	0
2d	2	0	1	1	0	5	0
1,0 g/l							
2f	12	0	1	0	2	64	0
5,0 g/l							
2g	23	0	0	0	5	128	0
10,0 g/l							
Quartzo entre 75 e 53 µm							
7c	5	0	1	1	0	10	0
0,1 g/l							
7d	9	0	1	0	0	11	0
1,0 g/l							
7f	30	0	0	0	0	29	0
5,0 g/l							
7g	53	1	0	0	1	55	0
10,0 g/l							

Os laudos com os resultados das análises encontram-se nos Anexos 21 a 31.

A fim de acompanhar a evolução dos valores, mostraremos os resultados na

forma de dois gráficos, representados pelas figuras 7-47 e 7-48.

Figura 7-35 Gráfico de metais no óleo por espectrometria: condições "sc" a "2g"

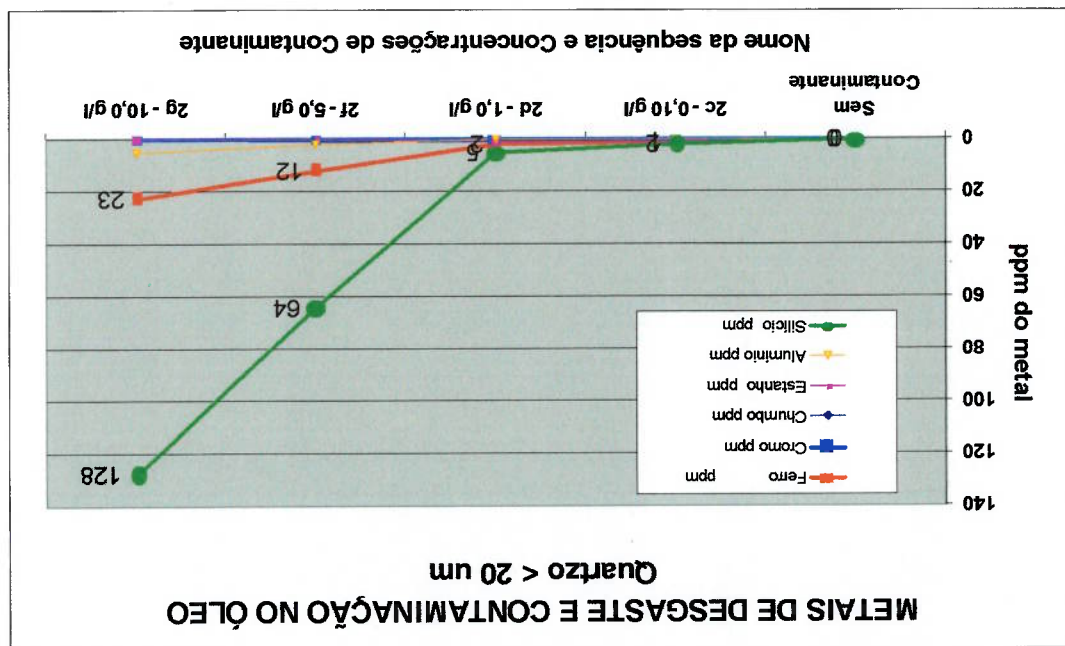
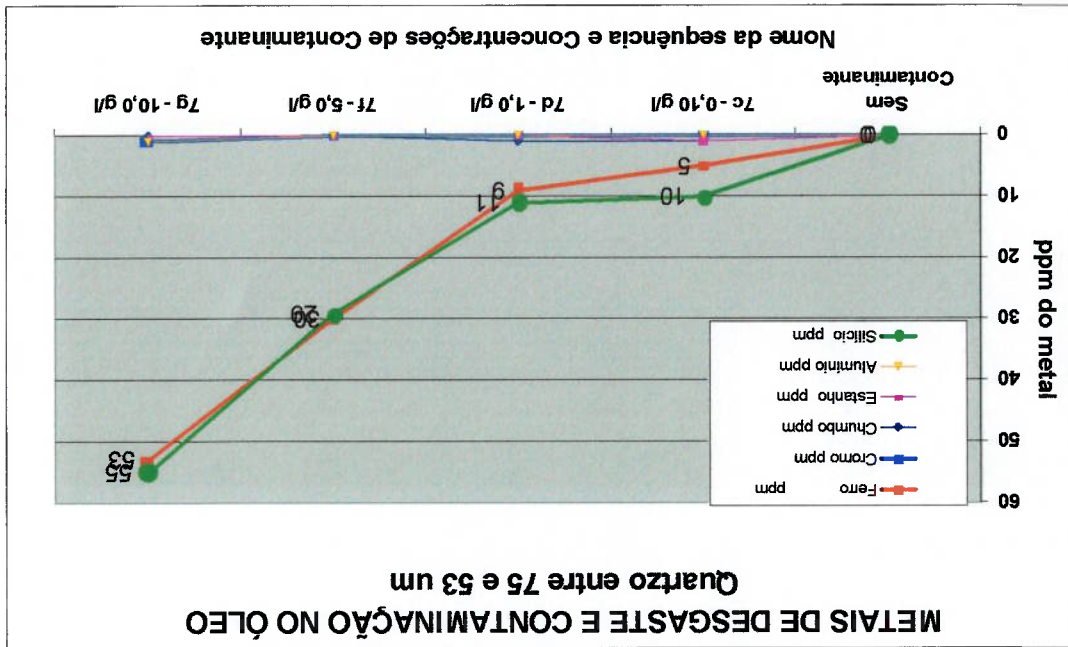


Figura 7-36 Gráfico de metais no óleo por espectrometria: condições "sc" a "7g"



Através da análise dos gráficos das figuras 7-35 e 7-36, podemos observar que os teores do metal de desgaste ferro e do contaminante silício evoluíram a medida que se aumenta a concentração do contaminante. Entretanto essa evolução se mostrou diferenciada para cada faixa de contaminante. Ao passo que para contaminantes na faixa menor que 20 µm (diâmetro médio de 16 µm pelo método de espalhamento de laser) o teor de silício na condigão “2g” com 10 g/l atingiu o valor de 128 ppm, para a condigão “7g” com quartzo na faixa entre 75 e 53 µm (diâmetro médio de 86 µm pela técnicas de espalhamento do laser), o teor de silício atingiu apenas 55 ppm. Isto pode ser explicado tanto pela característica de medição do aparelho, ou seja, a espectrometria mediu preferencialmente as partículas que tinham tamanho menor entre os dois banhos, no caso as partículas da condigão “2g”. A própria estrutura molecular do quartzo, caracterizada pela grande distância entre seus átomos favorece no caso da espectrometria, a medição de partículas de menor tamanho em detrimento as de maior tamanho.

No caso dos metais de desgaste foi observado um outro comportamento. Apenas o metal ferro apresentou variação significativa. Percebe-se entretanto que para o metal de desgaste ferro, o tamanho maior de contaminante foi responsável por uma perda de massa maior desse metal, confirmando a referência bibliográfica de Fitzsimmons, Clevenger (1975) citada no item 3.1, a qual coloca que desgastes em rolamentos “tendem a ser mais severos proporcionalmente ao tamanho do contaminante”. Esses dados foram confirmados pelos ensaios de ferrografia analítica, que em seguida serão apresentados.

7.6.1. Resultados dos ensaios de ferrografia

A seguir serão reportados os principais resultados obtidos pelas exames das ferrografias quantitativa e analítica.

O laudo da condigão “2g” que refere-se as partículas de quartzo > 20 µm numa concentração de 10,0 g/l indicou:

- Valores de ferrografia quantitativa não puderem ser usados como parâmetro devido a excessiva contaminação da amostra. Na verdade, houve grande decantação de partículas antes das mesmas adentrarem ao ferrograma;

- Identificada as presenças de partículas ferrosas geradas por estolhação com tamanho médio de 6 µm;

- Pequenos sinais de *pitting*, identificado por partículas laminares de até 30 µm;
- Óxidos de ferro sinalizando rompimento de filme lubrificante, conforme já havia sido previsto no item anterior;

- Abrasão causada por grande quantidade de contaminantes;

- Cristais de quartzo com tamanho médio de 20 µm, sugerindo que 90 % do volume inicial de contaminante que tinha diâmetro de cerca de 27 µm, sofreram uma redução de tamanho de cerca de 26 %;

A conclusão geral do ensaio é a de provável ocorrência de desgaste no rolamento com pequeno rompimento de filme lubrificante.

O laudo da condição “7g” que refere-se as partículas de quartzo entre 75 e 53 µm numa concentração de 10,0 g/l indicou um resultado muito parecido com a condição “2g”, a saber:

- Valores de ferrografia quantitativa não puderem ser usados como parâmetro devido a excessiva contaminação da amostra;
- Identificada as presenças de partículas ferrosas geradas por estolhação com tamanho médio de 6 µm;

- Maior presença de sinais de *pitting*, identificado por partículas laminares de até 20 µm;


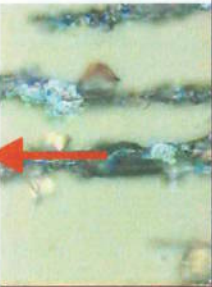

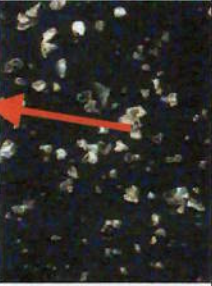

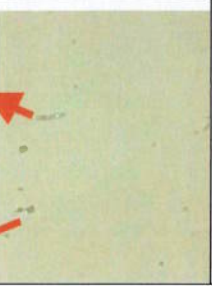
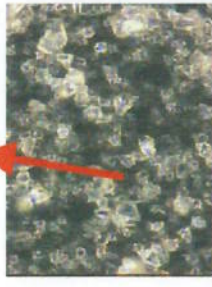


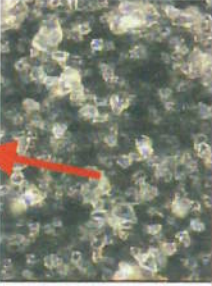


- Óxidos de ferro sinalizando rompimento de filme lubrificante, conforme já havia sido previsto no item anterior;

- Cristais de quartzo com tamanho médio de 25 µm, sugerindo que 90 % do volume inicial de contaminante que tinha diâmetro de cerca de 120 µm, sofreram uma redução de tamanho de cerca de 80 %;

A conclusão geral do ensaio é a de provável ocorrência de pequena presença de *pitting* no rolamento, sem falha iminente, com a recomendação de manutenção de “apenas” tratar o óleo lubrificante.

A seguir serão mostradas através da tabela 7-18 alguns ferrogramas obtidos pela técnica de ferrografia analítica.

Tabela 7-18. Principais fotos dos ferrogramas das condições “2g” e “7g”

1. Visão Geral Ferrograma	2. Detalhe de Óxidos Escuros	3. Partícula de Abrasão	4. Ferrograma com quartzo expurgado	5. Óxidos Vermelhos	6. Pequenas part. ferrosas < 0,5 µm
<p>Quartzo: < 20 µm</p> <p>Aumento 500 X</p> <p>população de cristais de quartzo (uso de filtro)</p> 	<p>Aumento 500 X</p> <p>óxidos escuro (rompimento de filme)</p> 	<p>Aumento 1000 X</p> <p>partícula de abrasão</p> 	<p>Aumento 100 X</p> <p>cristais de quartzo (com aumento)</p> 	<p>Aumento 500 X</p> <p>partícula de óxido vermelho (rompimento parcial de filme)</p> 	<p>Aumento 1000 X</p> <p>part. de esfoliação part. de quartzo</p> 
<p>Quartzo: 75 a 53 µm</p> <p>Aumento 500 X</p> <p>população de cristais de quartzo (uso de filtro)</p> 	<p>Aumento 1000 X</p> <p>óxido escuro esfoliação</p> 	<p>Aumento 1000 X</p> <p>partícula de abrasão</p> 	<p>Aumento 500 X</p> <p>cristais de quartzo (sem expurgo)</p> 	<p>Aumento 500 X</p> <p>óxido vermelho (romp. parcial de filme)</p> 	<p>Aumento 1000 X</p> <p>part. de esfoliação part. de quartzo</p> 

Em relação as ferrogafias realizadas, algumas observações foram realizadas. A visão geral do ferrograma, para as duas condições de contaminação acompanhou a tendência que já havia sido observada nas micro-fotos, a saber:

- A ocorrência de comunicação ou tritramento das partículas de quartzo ficou bem caracterizada pela visão geral dos dois ferrogramas;
- A identificação de óxidos escuros e vermelhos nos dois ferrogramas ratifica a hipótese levantada pelos resultados anteriores, que sugeriam a hipótese de ocorrência de rompimento de filme durante os ensaios. A presença de óxidos escuro também evidencia o fato da falta de aditivação anti-desgaste nos ensaios, parâmetro imposto aos experimentos;

- Partículas laminares e de abrasão podem ter relação com a ocorrência de possível desgaste oxidativo, ou efeito “couve-flor” (hipótese não confirmada experimentalmente);

- A identificação da presença de micro-partículas inferiores a 0,5 µm, reforçam a ideia de grande ocorrência de grande trituração nos contatos;

- Percebe-se também através desta técnica que entre as duas concentrações testadas, o tamanho maior de contaminante foi responsável por uma maior taxa de estofação e partículas laminares. O resultado obtido, apesar de ocorrer em um ensaio onde a questão do desgaste não foi concebida como objetivo, mas sim como uma decorrência natural, confirma a referência bibliográfica de Fitzsimmons; Cleenger (1975) citada no item 3.1., a qual coloca que desgastes em rolamentos “tendem a ser mais severos proporcionalmente ao tamanho do contaminante”;

Em relação as ferrogafias realizadas, algumas observações foram realizadas. A visão geral do ferrograma, para as duas condições de contaminação acompanhou a tendência que já havia sido observada nas micro-fotos, a saber:

- A ocorrência de comunicação ou tritramento das partículas de quartzo ficou bem caracterizada pela visão geral dos dois ferrogramas;
- A identificação de óxidos escuros e vermelhos nos dois ferrogramas ratifica a hipótese levantada pelos resultados anteriores, que sugeriam a hipótese de ocorrência de rompimento de filme durante os ensaios. A presença de óxidos escuro também evidencia o fato da falta de aditivação anti-desgaste nos ensaios, parâmetro imposto aos experimentos;
- Partículas laminares e de abrasão podem ter relação com a ocorrência de possível desgaste oxidativo, ou efeito “couve-flor” (hipótese não confirmada experimentalmente);

- A identificação da presença de micro-partículas inferiores a 0,5 µm, reforçam a ideia de grande ocorrência de grande trituração nos contatos;
- Percebe-se também através desta técnica que entre as duas concentrações testadas, o tamanho maior de contaminante foi responsável por uma maior taxa de estolhação e partículas laminares. O resultado obtido, apesar de ocorrer em um ensaio onde a questão do desgaste não foi concebida como objetivo, mas sim como uma decorrência natural, confirma a referência bibliográfica de Fitzsimmons; Clevenger (1975) citada no item 3.1., a qual coloca que desgastes em rolamentos “tendem a ser mais severos proporcionalmente ao tamanho do contaminante”;

8 CONCLUSÕES

“Devia ter complicado menos.....
 Trabalhado menos.....
 Ter visto o Sol se pôr.....”
Música: EPTAFIO
Canta : Tiias

Os resultados experimentais indicaram as seguintes conclusões para a finalização deste trabalho:

- Os valores de RMS da aceleração variam de forma variada segundo as cargas radiais aplicadas sobre os rolamentos;
- Os valores de RMS em rolamentos aumentam à medida que se eleva a frequência de rotação do eixo;
- É possível diferenciar, através do RMS da aceleração, principalmente em altas frequências, as condições de lubrificação por óleo limpo e sujo, quaisquer que sejam a condição suja;
- Em banhos de óleo monitorados por contador de partículas óptico, baixa correlação entre nível ISO 4406 de contaminação e RMS da aceleração foram encontradas;
- Variação proporcional entre tamanho de contaminante e valores de RMS SI foram identificadas, para todos os tamanhos avaliados nas experiências;
- Algumas correlações entre contagem de contaminantes e valores de RMS SI com elevada carga foram identificadas, para todas as concentrações avaliadas. O grau de contaminação prévia do banho

interferiu nos resultados, sugerindo que existem limitações para a detecção da concentração através da vibração;

- As faixas de frequência que foram adotadas para as definições dos cálculos de RMS deste conjunto de experiências foram consideradas satisfatórias. Entretanto, deve ser registrado que para os casos onde a avaliação da contaminação por vibrações não ficou bem caracterizada, os mesmos poderiam ter sido constatados mediante uma pesquisa e utilização de uma faixa de frequência do espectro adequada, que contemplasse a informação da contaminação no banho de óleo;

• É possível, para algumas das condições testadas, avaliar-se a contaminação sólida de lubrificantes de rolamentos através da assinatura dos sinais de vibração.

A adequada definição de como se mede a contaminação sólida em um lubrificante faz parte da metodologia.

Os resultados apesar de apresentarem uma diminuição de valores de RMS de aceleração quando foram introduzidos contaminantes, compararam-se com os de Komiya (1992) sob o ponto de vista de possibilidade de diferenciação. A experiência de Komiya (1992) levou ao incremento de vibração ao se adicionar contaminantes aos lubrificantes, ao passo que a experiência realizada neste trabalho levou a atenuação dos valores de vibração quando contaminantes foram adicionados ao óleo, comparativamente aos óleos sem contaminação.

Na parte de análise de superfícies e resíduos de desgaste, foram constatadas as seguintes ocorrências:

- Rolamentos em banho de óleo em condições de contaminantes sólidos à base de quartzo com dureza de mesma ordem ou até um pouco superior à os rolamentos, como citado em Smallman e Bishop (1995), mesmo operando por pequeno intervalo de tempo, estão sujeitos a expressivas modificações de folga interna radial, rugosidade bem como alterações visuais nas superfícies das esferas e das pistas. Verificou-se visualmente

superfícies marcadas distintas para o anel do rolamento que girou com o eixo e para o anel que permaneceu fixo;

- Operando nas condições acima relatadas, a análise dos resíduos de desgaste por espectrometria apresentaram valores do metal de desgaste e ferro diretamente proporcionais ao tamanho médio do contaminante e inversamente proporcional ao metal de contaminação sílicio. Apesar do experimento não se tratar de um ensaio de desgaste, e sim um ensaio dinâmico de rolamento em banho de óleo contaminado, os resultados reforçam os resultados da experiência de Fitzsimmons, Cleveger (1975)

- Valores de ferrografia analítica apontaram condições de desgaste severo para rolamentos operando nessas condições, evidenciando contaminação (tritramento de partículas) e rompimento de filme lubrificante, relacionados com a introdução de meio sólido abrasivo nos contatos. Esses resultados compactuam com as referências utilizadas, Dwyer-Joyce (1993) e Jacobson (2000).

- É possível admitir também que a alteração significativa dos valores de rugosidade do rolamento tenham ocasionado a alteração no regime de lubrificação. Interessante registrar que mesmo identificando aumento de rugosidade, desgastes e alterações nas superfícies além de rompimento de filme lubrificante, os valores de RMS da aceleração das condições contaminadas apresentaram-se menores que os das condições “limpas”, com níveis de grandeza variados. Isto sugere a existência de fenômenos de superfície (que foram discutidos no texto) mas não comprovados experimentalmente, relacionados com uma efetiva diminuição dos valores de vibração em rolamentos que operam em condições de contaminação de óleo lubrificante muito elevada.

9 TRABALHOS FUTUROS

Sugerem-se os seguintes pontos não abordados por este trabalho que podem vir a serem continuados no futuro:

- A) Formas distintas de se utilizar a informação de vibração:
 - Avaliar informação em outras bandas de espectro, através de uma análise mais detalhada do conteúdo espectral dos sinais de vibração;
 - Utilizar outros parâmetros estatísticos que não o RMS da vibração;
 - Utilizar envelope do sinal;
 - Utilizar redes neurais para a classificação da contaminação.
- B) Modificação nos parâmetros de ensaio:
 - Investigar os efeitos dos sinais de vibração comparativamente com baixo e elevado tempo de operação contínua do rolamento;
 - Utilizar um rolamento diferente para cada amostra de óleo, avaliando e correlacionado conjuntamente vibração com os efeitos superficiais no rolamento e nos resíduos de desgaste gerados.
- C) Alterando-se os elementos do ensaio:
 - Utilizar outros tipos de rolamentos, como rolos, autocompensador, axiais;
 - Utilizar outros tipos de contaminantes sólidos, como óxido de ferro, areia comum, metais moles,
 - Utilizar outros tipos de contaminantes, como água, solventes;
 - Alterar o tipo e viscosidade de óleo lubrificante (sintético, reretinado);
 - Fazer testes com graxas limpas e contaminadas;
 - Variar o nível de óleo no interior da cuba.

- ABNT P-MB 325 Determinação de Insolúveis em Óleos Lubrificantes Usados
- AEROSPACE INDUSTRIES ASSOCIATION OF AMERICA, INC. - NASA Cleanliness Requirements of Parts Used in Hydraulic Systems - NAS 1638. Estados Unidos, 1964.
- ALMEIDA, M.T.; GÓZ, R.D.S. Curso de Análise Avançada – Rolamentos e Engrenagens FUPAI, Itajubá, 1995
- ANDERSON, Daniel P. *Wear Particle Atlas*, Advanced Technology Office, Naval Air Engineering Center, USA: Telus, 1982.
- ANON. Cost-Effective Oil Analysis Using Proper Sampling Techniques and Standardized Application Programs. *Practical Lubrication and Maintenance*, v.10, n.1, p.19-22, mar. 1987.
- AZOVITSEV, Y.A.; BARKOV, A.V.; YUDIN, I. A. Automatic Diagnostics and Condition Prediction of Rolling Element Bearing Using Enveloping Methods, 1994 Disponível em: <http://www.vibrotek.com/articles/new94vi/> Acesso em: 16/06/2003
- BALL, P.G. Machine Wear Analysis – A Rational Approach to Methods Integration for Maximum Benefits. *Lubrication Engineering*, v.54, n.3, p.18-22, mar. 1998.
- BARONI, T.A.D., GOMES, G.F. *Ferrografia – Controlando o desgaste das máquinas*, Apostila, p.1 – 16, Brasil, 2002.
- BARKOV, A.; BARKOVA, N. Condition Assessment and Life Prediction of Rolling Element Bearings – Part 2 *Sound and Vibration*, p. 27-31, 1995
- BERG, S. A Study of Sample Withdrawal for Lubricated Systems. Part 1: Influence of Flow Characteristics, Sampling, Techniques and Locations. *Industrial Lubrication and Tribology*, v.53, n.1, p.22-31, 2001.

- BERRY, J.E. How to Track Rolling Element Bearing Health with Vibration Signature Analysis **Sound and Vibration**, p.24 -35, 1991 .
- BLOCH, H.P. In Lub Oil contamination and On-stream Oil Purification, Synthetic Lubricants, In: **Practical Lubrication for Industrial Facilities**. Lilburn, USA: Fairmont Press, 2000. 612 p
- BOOSER, E.R. In: BOOSER, E.R. **Theory and Practice of Tribology –V.II – Theory and Design**. CRC Handbook of Lubrication: 1984 p. 626.
- CAMPBELL, W.S.; IACOPINI, J.. Suction Roll Pilot Bearing Failure Due to Inadequate Lubrication. **Tappi Journal**, v. 77, n.12, p.233-236, dez. 1994.
- CARRATEIRO, R.P., MOURA, C.R.S..Óleos Lubrificantes, p. 31-68. In **Lubrificantes e Lubrificação** São Paulo: Makron Books, 1987.
- CLARKE, R.A. Aceites Lubrificantes para Rodamientos. **La Revista de Rodamientos**, v.170, p.26-29, 1972.
- DOWSON, D. Elastohydrodynamic and micro-elastohydrodynamic lubrication **Wear**, v.190, n.2, p.125-138, dec. 1995.
- DWYER-JOYCE, R.S. **The effects of lubricant contamination on rolling bearing performance**. 1993. 238p. Tese (Doutorado) - Department of Mechanical Engineering. Imperial College of Science. London. Micro filme.
- ELEFTHERAKIS, J.G.; SHELTON, D.C.; LONG, R. Accurate Assessment of Particle Counts in Liquids. **Lubrication Engineering**, v.51, n.3, p.205-208, mar. 1995.
- FITZSIMMONS, B; CAVE, B.J. Lubricant Contaminants and their Effects on Tapered Roller Bearing **Wear. Asle Transactions**, vol.20, 2, p. 97-107, out 1977.

- FITZSIMMONS, B.; CLEVENGER, H.D. Contaminated Lubricants and Tapered Roller Bearing Performance Contaminants and their Effects on Tapered Roller Bearing Performance Wear. *Tribology International* abr1977.
- GARVEY, R. Integrating Vibration and Oil Analysis Within Today, 2001 Disponível em: [http://www.csi.com/articles/](http://www.csi.com/articles/ Acesso em: 20/10/2003)
- GFT-Work sheet n.º 3 *Rolling Bearing Lubrication Handbook*. Fuchs Petrolub AG, p.40-42, 1999.
- GLÄNTZ, W. Contamination in Lubrication Systems for Bearings in Industrial Gearboxes. *Ball Bearing Journal* 242, p.20-26, 1992.
- GODFREY, D. Recognition and Solutions Some Common Wear Problems Relates to Lubricants and Hydraulic Fluids. *Journal of the American Society of Lubrication Engineers*, p.111-114, 1987.
- GODFREY, D. Clean, Dry, Oil Prolongs Life of Lubricated Machines. *Lubrication Engineering*, v.45, n.1, p.4-9, jan. 1989.
- GODFREY, D.; Herguth, R, Physical and Chemical Properties of Industrial Mineral Oils Affecting Lubrication. *Lubrication Engineering*, v.52, n.2, p145-148, feb. 1996.
- HANROCK, Bernard J. *Lubrication of Machine Elements* NASA Reference Publication, 1126. Washington, DC: National Aeronautics and Space Administration, 1984. 84p.
- HAYDEN, H.W.; MOFATT, W.G.; WULFF, J. *The structure and properties of materials*. In: *Mechanical Behavior*, v.3, 3.ed. New York: John Wiley & Sons, 1967. 247p.

- HUTCHINGS, I.M. Lubricants and Lubrication. In: *Tribology – Friction and Wear of Engineering Materials*. United Kingdom: 1992. p 1-58-73.
- HYDAC Fluid Control Unit FCU 2010/2110 , fev 2002 Hydac International , Alemanha, Folheto Técnico
- INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. Hydraulic Fluid Power – Fluids – Method for Coding Level of Contamination by Solid Particles - ISO 4406. Suíça, dezembro 1987.
- INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. Hydraulic Fluid Power – Fluids – Method for Coding Level of Contamination by Solid Particles - ISO 4406. Suíça, dezembro 1999.
- IOANNIDES, E; Contamination and the SKF New Life Theory for Rolling Bearings *NLGI Spokesman*, vol. 54, n.º 9, p. 14-368 a 19-373, 1989.
- IOANNIDES, E; JACOBSON, B. Lubricantes Sucios – Menor Duración de los Rodamientos. *La Revista de Rodamientos*. Ed. Esp. p.22-27, 1989.
- IOANNIDES, E.; BEGHINI, E.; JACOBSON, B.; BERGLING, G.; WUTTKOWSKI, J.G. Cleanliness and its Importance to Bearing Performance. *Lubrication Engineering*, v.49, n.9, p. 657-663, 1993.
- JACOBSON, B. Thin Film Lubrication of Real Surfaces. *Tribology International*, v.33, n.3-4, p.205-210, mar./apr. 2000.
- JONES, M.H.; Ferrography Applied to Diesel Engine Oil Analysis. *Wear*, v.56, n.1, p. 93-103, 1979.
- JONES, R; Enveloping for Bearing Analysis. *Sound and Vibration* p. 10-15, 1996.

- KOMIYA, H. Effect of Contaminant in Lubricant on Noise of Ball Bearings NLGI Spokesman, v.56, n.5, p.173-180, aug. 1992.
- LASKOWSKI, J. Ferrography Powerful Maintenance Technique. The Oil & Gas Journal, v.82, n.45, p.85-92, nov. 1984.
- LCT – Laboratório de Caracterização Tecnológica. Resultados de Análise de Tamanho de Partículas. Escola Politécnica. Depto. de Engenharia de Minas. Tabela de Penetramento, 2003, Excell
- LOCKWOOD, DALLEY ASM Handbook vol. 18 Friction, Lubrication and Wear Technology ASM International, p. 299 a 312 USA, 1992
- LOEWENTHAL, S.H.; MOYER, D.W.; NEEDELMAN, W.M.; Effects of Ultra-Clean and Centrifugal Filtration on Rolling Element Bearing Life. Journal of Lubrication Technology, ASME Transactions, v.104, n.3, p. 283-292, jul. 1982.
- MASSOUROS, G.P. Normal Vibration of a Plain Bearing Working under Boundary Lubrication Conditions Tribology International 33, vol.16, n.5, p. 235238, out. 1983.
- METALS HANDBOOK: Mechanical Testing Terms and Definitions, s. 11, 9th Edition. ASM Vol. 8, 1985
- MIETTINEN, J.; ANDERSSON, P. Acoustic Emission of Rolling Bearings Lubricated with Contained Grease Tribology International 33, p. 777-787, 2000.
- MOFFATT, G.W., PEARSAULT, G.W., WULFF, J. The structure and properties of materials Vol. I Structure USA: John Wiley & Sons, 1964
- NEALE, M.J. Mineral Oils, p. 9. In NEALE, M.J. A Tribology Handbook Inglaterra: Butterworth Heinemann, 1993.

- NEPOMUCENO, L.X. Identificação da Origem das Vibrações. Monitoração. In *Técnicas de Manutenção Preditiva*. Vol.1. São Paulo: Editora Edgard Blücher Ltda., 1989, p.96-411-498
- NIKAS, G.K.; SAYLES, R.S.; IOANNIDES, E. Effects of Debris Particles in Sliding/Rolling Elastohydrodynamic Contacts *Proc. Inst. Mech. Engin. Vol. 212 parte 1* p. 333-343, 1998.
- NSK. *NSK Bearing Doctor* – Diagnóstico Rápido de Ocorrências em Rolamentos. p.23. novembro 2001.
- NSK NSK ROLAMENTOS Catálogo Pr B01 2002
- NUNES, M.A.C.; *Diagnóstico de Defeitos em Rolamentos pela técnica do Envelope*, 110 p Dissertação (Mestrado) Universidade Federal de Santa Catarina Florianópolis 1989
- NUNNARI, J.J.; DALLEY, R.J. An Overview of Ferrography and its Use in Maintenance. *Tappi Journal*, v.74, n.8. p.85-92, ago. 1991.
- OLIVER, W.C.; PHARR, G.M. An Improved Technique for Determining Hardness and Elastic Modulus Using Load and Displacement Sensing Indentation Experiments. *Journal of Materials Research Society*, v.7, n.6, p. 1564 -1583, jun. 1992.
- PADOVASE, L.R.; *Processamento de Sinais Aplicado à Engenharia Mecânica* Escola Politécnica da USP Apostila mar 2001
- PARKER Filtration *Manual de Filtragem Hidráulica* Parker Hannifin Ind. e Com. Ltda. HTM-2 – BR, Brasil, 1998

- PARDUE, E.F.; PIETY, K.; MOORE, R. Elements of Reliability-Based Machinery Maintenance **Sound and Vibration**, p.14-20, mai. 1992.
- PENG, Z.; KESSISSOGLOU An Integrated Approach to Fault of Machinery Using Wear Debris and Vibration Analysis (provável ano de publicação: 2002).
- PHILLIPS, G.J. Measuring the Size of Rolling Element Flaws **Sound and Vibration** p. 9 a 16, abr 1989
- REDA, A.A.; BOWEN, R.; WESTCOTT, V.C. Characteristics of Particles Generated at the Interface Between Sliding Steel Surfaces. **Wear**, v.34, n.3, p.261-273, 1975.
- RONEN, A.; MALKIN, S. Investigation of Friction and Wear of Dynamically Loaded Hydrodynamic Bearings with Abrasive Contaminants. **Journal of Lubrication Technology**. Transactions of the ASME, v.105, n.4, p.559-568, out. 1983.
- ROTH, H.; JOOS, M.F.; DOTTERNHAUSSEN; GEIBEL, W.; Redução de Custo Através da Otimização de Lubrificação do Mancal de Rolamento. **UPTIME Magazine**, v.8. n.2, p.17-20, 2000.
- RUNGE, P.; DUARTE, Cap. 8 Interpretação dos Resultados de Análise das Amostras, p. 221 A 282 In **Lubrificantes nas Indústrias São Paulo**:Triboncept, 1987.
- SAE RECOMMENDED PRACTICE. Reporting Cleanliness Levels of Hydraulic Fluids – SAE J 1165 JUL 79.
- SAKURAI, T.; Role os Chemistry in the Lubrication of Concentrated Contacts **Journal of Lubrication Technology**, v.103, n.3, p.473–485, out. 1981.

- SASAKI, A.; et all. A Study of Hydraulic Valve Problems Lubricating *Engineering*, v.45, n.3, p.140-46, mar. 1989.
- SAYLES, R.S.; HAMER, J.C.; IOANNIDES, E. The Effects of Particulate Contamination in Rolling Bearings – A State of the Art Review *Proc. Inst. Mech. Engin. Vol. 204* p. 29 a 36, 1990
- SCOTT, D. Failure Diagnosis and Investigation. *Tribology*, p. 21-28, fevereiro 1970.
- SCOTT, D. Predictive Maintenance by Ferrography. *Wear*, v.44, n.1, p.173-182, 1977.
- SCOTT, D.; SEIFERT, W.W.; WESTCOTT, V.C. Ferrography – An Advanced Aid for the 80's. *Wear*, v.34, n.3, p.251-260, 1975.
- SERRIDGE, M. Fault Detection Techniques for Reliable Machine Condition Monitoring *Sound and Vibration*. p.18-22, mai. 1989.
- SKF Application Note **What are Enveloping and SEF ?** Application Note CM 3014, SKF Condition Monitoring, Inc. jun 1995
- SKF INDUSTRIES, INC. **A Guide to Better Bearing Lubrication** – Reg. N.º 740. USA, novembro 1980, p.2
- SKF. **Falhas de Rolamentos e Suas Causas** – Registro BR 7604 Pb.p.27 - 39 . 1988
SKF Informacion de Producto 400 **Lubricación de Rodamientos** Publicación PI 400 Sp Reg. 74 20 000 out. 1985
- SMALLMAN, R.E.; BISHOP, R.J. **Metals and Materials: science, processes, applications**. Oxford, UK: Butterworth-Heinemann, 1995. 431p.

- SMULDERS, A.J.; KADUSHIN, D. Acoustic Emission Technology: a Viable Predictive Maintenance Tool for the Paper Industry. *Tappi Journal*, v.77, n.12, p.58-64, dez. 1994.
- STACHOWIAK, G.W.; BATCHELOR, A.W. Fundamentals of Contact Between Solids In: *Engineering Tribology* – 2.a edição USA Butterworth Heimemann 2001.
- STULGYS, P. *Análise de Óleo para Manutenção* São Paulo, KTL Assessoria Consultoria Ltda, 1998
- STULGYS, P. *Limpeza de Sistemas Hidráulicos e de Lubrificação* São Paulo, KTL Assessoria Consultoria Ltda, jan 2001
- SU, Y-T.; SHEEN, Y-T.; LIN M.H.; Signature Analysis of Roller Bearing Vibrations: Lubrication Effects *Proced. Inst. Mech. Engin.*, v. 206 p. 193-202, 1992
- TANDON, N.; CHOUDHURY, A. A Review of Vibration and Acoustic Measurement Methods for the Detection of Defects in Rolling Element Bearings. *Tribology International*, v.32, n.8, p.469-480, aug. 1999.
- VICKERS. *Vickers Guide to Systemic Contamination Control*. Michigan, USA: Vickers, 31p.Apostila, 1996
- VILLE, F. *Pollution Solide des Lubrifiants, Indentation et Fatigue des Surfaces*. 163 p Tese Institut National des Sciences Appliquées de Lyon, Lyon, 1998
- WALLIN, E. Inspección Y Entretención Preventivo de los Rodamientos. *La Revista de Rodamientos*, v.146, p.13-29, Reg. 766, 18, 1966.
- WISEMAN, M; AH-SUE, A. Monitoring Oil Degradation Using FTIR Analysis *Lubrication Engineering*, v.48, n.3, p.236-241, mar.1992.

- WOWK, V. Typical Vibration Problems. In: *Machinery Vibration : Measurement and Analysis*. New York, London : McGraw-Hill, 1991. p. 125-234. 358p.
- YAMAGUCHI, T.; KAWAURA, S.; HONDA, T.; UEDA, M.; Iwai, Y. Investigation of Oil Contamination by Colorimetric Analysis. *Lubrication Engineering*, v.58, n.1, p.12-17, jan. 2002.
- YARDLEY, E.D. The Use of Ferrography and Spectrographic Oil Analysis to Monitor the Performance of Three 90 KW Gearboxes. *Wear*, v.56, n.1, p.213-226, 1979.
- ZIOGAS, V.I., RAGULSKIS, K.M., RONDOMANSKAS, SKURKAITE, O.M.A. Diagnostics of Ball Bearing Lubrication by High Frequency Vibration Parameters. *Vibratio Engineering*, v.1, p.347-353, 1987.

N.º ANEXO	DESCRIÇÃO
ANEXO 1	Certificado de calibração do Contador de Partículas
ANEXO 2	Resultados de Análise de Tamanho de Partículas - Quartzo - 20 µm
ANEXO 3	Resultados de Análise de Tamanho de Partículas - Quartzo - 75 + 53 µm
ANEXO 4	Certificado de Ensaio de Óleo Lubrificante (ISO VG 32)
ANEXO 5	Registros do Contador de Partículas - Condição "sq"
ANEXO 6	Registros do Contador de Partículas - Condição "sq"
ANEXO 7	Função RMS ALTA e RMS BAIXA para Matlab
ANEXO 8	Registros do Contador de Partículas (óleo filtrado) e condição "3d"
ANEXO 9	Registros do Contador de Partículas - Condições "3d, 7d, 1d"
ANEXO 10	Registros do Contador de Partículas Condições "1d" e "1 a"
ANEXO 11	Registros do Contador de Partículas - Condições "1b, 1c"
ANEXO 12	Registros do Contador de Partículas - Condições "1c, 1d"
ANEXO 13	Registros do Contador de Partículas - Condições "1e, 1f"
ANEXO 14	Registros do Contador de Partículas - Condições "1f"
ANEXO 15	Registros do Rugosímetro - Esferas sem uso
ANEXO 16	Registros do Rugosímetro - Anel Interno sem uso
ANEXO 17	Registros do Rugosímetro - Anel Externo sem uso
ANEXO 18	Registros do Rugosímetro - Esferas após contaminante
ANEXO 19	Registros do Rugosímetro - Anel Interno após contaminante
ANEXO 20	Registros do Rugosímetro - Anel Externo após contaminante

RELACÃO DE ANEXOS

"Pode ir armado o coreto e preparando aquele feijão preto

Eu tô voltando

Põe meia duzia de Brahma pra gelar, muda a roupa de cama

Eu tô voltando

Leva o chinelo pra sala de jantar

Que é lá mesmo que a mala eu vou largar

Quero te abraçar, pode se perfumar

Porque eu tô voltando"

Música: TÔ VOLTANDO

Canta: Simone

N.º ANEXO	DESCRIÇÃO
ANEXO 21	Relatório de Exames Físico Químicos – Oleo Novo
ANEXO 22	Relatório de Exames Físico Químicos – Oleo de Amaciamento
ANEXO 23	Relatório de Exames Físico Químicos – Oleo sem contaminante
ANEXO 24	Relatório de Exames Físico Químicos – Amostra “2c”
ANEXO 25	Relatório de Exames Físico Químicos – Amostra “2d”
ANEXO 26	Relatório de Exames Físico Químicos – Amostra “2f”
ANEXO 27	Relatório de Exames Ferrogáficos – Amostra “2g”
ANEXO 28	Relatório de Exames Físico Químicos – Amostra “7c”
ANEXO 29	Relatório de Exames Físico Químicos – Amostra “7d”
ANEXO 30	Relatório de Exames Físico Químicos – Amostra “7f”
ANEXO 31	Relatório de Exames Ferrogáficos – Amostra “7g”

Kalibrier-Zertifikat

Calibration-Certificate / Certificat de Calibrage

Gerät (subject/appareil): Fluid Control Unit (contamination controller/contrôleur de pollution)
FCU 2110-4
148G01312
20895
Serienr. (serial-no./n° de série):
Sensorr. (sensor-no./n° de la cellule de mesure):

Das Gerät wurde von der Firma HYDAC FILTERTECHNIK GmbH geprüft und durch Abgleich mit einem Präzisionspartikelzähler kalibriert.
A. m. subject was calibrated and approved at HYDAC FILTERTECHNIK GmbH by comparison with b. m. precision particle counter.
L'appareil a été calibré par la société HYDAC FILTERTECHNIK GmbH par comparaison au compteur de particule de précision.

Partikelzähler (particle counter/compteur de particule)
Typ (type):
Serienr. (serial-no./n° de série):
Sensor (sensor/cellule de mesure):
Typ (type):
Serienr. (serial-no./n° de série):
kalibriert in Anlehnung an ISO 4402 am
(calibrated acc. to ISO 4402, date/calibré suivant ISO 4402 le):

PAMAS 3116
310-3
HCB - LD - 25/25
L-2525-82
04.04.2001

Die Kalibrierung erfolgte mit der Flüssigkeit:
A. m. subject was calibrated with fluid:
La calibration a été effectuée avec le fluide:

MIL-H-5606, Nato Code H 515
Fabrikat (brand/fournisseur):
Typ (type):

Shell
Aeroshell Fluid 41

Die Durchführung erfolgte nach der Prüfanweisung Nr.: 77 xxx 968 4 1204936 für die Kalibrierung der FCU.
The calibration was executed according to test procedure no.: 77 xxx 968 4 1204936 for calibration of FCU.
Le processus de calibrage s'est déroulé conformément à la procédure de contrôle n° 77 xxx 968 4 1204936, relative au calibrage du FCU.

HYDAC FILTERTECHNIK GmbH
Industriegebiet
D-66280 Sulzbach-Neuweiler

Datum(date) 07.12.2001

Prüfer (signature)
.....
(Responsable du processus de calibrage)

ANEXO 2 Resultados de Análise de Tamanho de Partículas - Quartzo - 20 µm

Escola Politécnica da Universidade de São Paulo
 Departamento de Engenharia de Minas e de Petróleo
 Laboratório de Caracterização Tecnológica - LCT
 Av. Prof. Mello Moraes, 2373 - CEP 05508-900 São Paulo - SP e-mail: lct@poli.usp.br
 TEL: (0XX11) 3091-5151, 3091-5551 e 3091-5787 FAX (0XX11) 3815-5785



RESULTADOS DE ANÁLISE DE TAMANHO DE PARTÍCULAS

Detalhes da Amostra

Histórico: Certificado: 536/03
 Arquivo: 536
 Sample Path: C:\SIZERSDATA\20031
 Notas: AMOSTRA: Quartzo - 20 micron
 CLIENTE: FUNDAÇÃO CAPES/ LINLSON R. PADOVESE
 Meio de Dispersão: álcool isopropílico
 Veloc. bomba: 2500 rpm

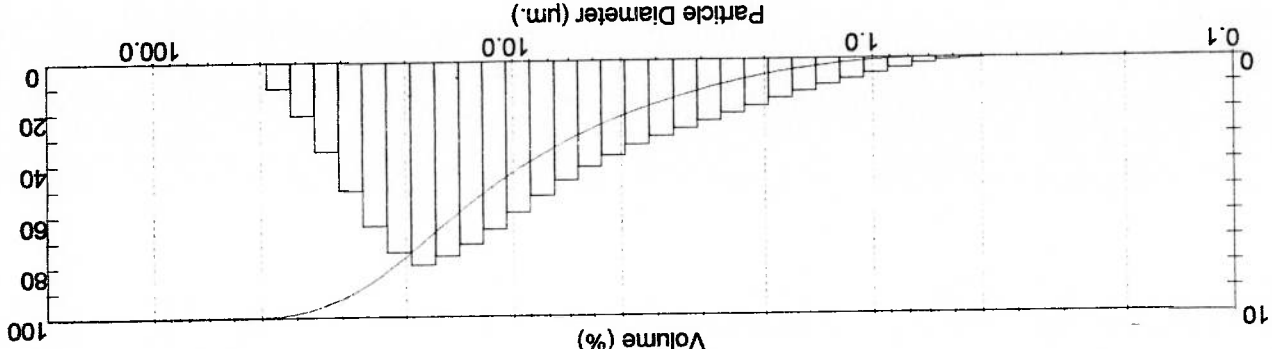
Detalhes do Sistema

Range Lens: 300RF mm
 Beam Length: 2.40 mm
 Particle R.I. = (1.7290, 0.1000); Dispersant R.I. = 1.3300
 Sampler:
 Obscuration: 16.1 %
 Residual: 0.758 %
 Modifications: None
 Analysis Model: Polydisperse

Resultados Estatísticos

Tipo de Distribuição: Volume
 Diâmetros Médios: D [4, 3] = 13.61 µm
 D [3, 2] = 6.17 µm
 Concentração = 0.0130 %Vol
 Densidade = 2.650 g / cub. cm/area Superf. Espec. = 0.3667 sq. m / g
 D (V, 0.1) = 2.62 µm
 D (V, 0.5) = 11.71 µm
 D (V, 0.9) = 27.42 µm
 Uniformidade = 6.633E-01
 Span = 2.118E+00

Diâm. Inferior (µm)	No Intervalo % Diâm. Superior (µm)	Acum. Abaixo %	Diâm. Inferior (µm)	No Intervalo % Diâm. Superior (µm)	Acum. Abaixo %	Diâm. Inferior (µm)	No Intervalo % Diâm. Superior (µm)	Acum. Abaixo %
0.05	0.00	0.00	6.63	4.67	34.13			
0.06	0.00	0.00	7.72	5.27	39.40			
0.07	0.00	0.00	9.00	5.91	45.32			
0.08	0.00	0.00	10.48	6.55	51.87			
0.09	0.00	0.00	12.21	7.13	59.00			
0.11	0.00	0.00	14.22	7.59	66.59			
0.13	0.00	0.00	16.57	7.94	74.53			
0.15	0.00	0.00	19.31	7.43	81.96			
0.17	0.00	0.00	22.49	6.40	88.36			
0.20	0.00	0.00	26.20	5.00	93.36			
0.23	0.00	0.00	30.53	3.49	96.85			
0.27	0.00	0.00	35.56	2.11	98.96			
0.31	0.00	0.00	41.43	1.02	99.97			
0.36	0.00	0.00	48.27	0.03	100.00			
0.42	0.01	0.00	56.23	0.00	100.00			
0.49	0.06	0.00	65.51	0.00	100.00			
0.58	0.13	0.00	76.32	0.00	100.00			
0.67	0.24	0.00	88.91	0.00	100.00			
0.78	0.41	0.00	103.58	0.00	100.00			
0.83	0.61	0.00	120.67	0.00	100.00			
0.91	0.91	0.00	140.58	0.00	100.00			
1.06	1.06	0.00	163.77	0.00	100.00			
1.17	1.24	0.00	190.80	0.00	100.00			
1.24	1.05	0.00	222.28	0.00	100.00			
1.44	1.29	0.00	258.95	0.00	100.00			
1.68	1.56	0.00	294.46	0.00	100.00			
1.95	1.84	0.00	331.01	0.00	100.00			
2.28	2.12	0.00	368.55	0.00	100.00			
2.65	2.41	0.00	407.06	0.00	100.00			
3.09	2.70	0.00	446.53	0.00	100.00			
3.60	3.09	0.00	487.95	0.00	100.00			
4.19	3.60	0.00	531.32	0.00	100.00			
4.88	4.19	0.00	577.64	0.00	100.00			
5.69	4.88	0.00	626.85	0.00	100.00			
6.63	5.69	0.00	678.96	0.00	100.00			



Maivern Instruments Ltd. Malvern, UK
 Tel: +[44] (0) 1684-892456 Fax: +[44] (0) 1684-892789
 Prof. Dr. Henrique Kamin
 Coordenador do LCT - EPUSP
 MasterSizer S long bed Ver. 2.19
 Serial Number: 33544-299
 Dr. M. Mariana M. Le Tassinari
 Pesquisadora do LCT - EPUSP
 23 Sep 03 14:5

ANEXO 4 Certificado de Ensaio de Oleo Lubrificante (ISO VG 32)

LABORATORIO DE ENSAIO

N.º 2774/03

ABCOM INDUSTRIAS QUIMICAS LTDA.
 Rua Dr. Ulisses Guimarães, 119, Bairro Beltracimino
 CEP: 05201-970, Mauá, SP, Fone e Fax: (011) 755-6922

Local: COENLUB
 Endereo: BOMBONA
 Cliente: FUNDACO CARPES/INTILSON

Quantidade: 40l
 Produto: ABCOM 140PS

150 PNL 30 (Mo 10/15)

Data Fiscal: 18/10
 Data de Fabricao: 14/04/03
 Data de Validade: NAO PERCIBEL

ENSAIOS E RESULTADOS

ENSAIOS METODO RESULTADO

180 4.10-23

180 4.10-02

180 4.10-11

180 4.10-01

180 4.10-10

180 4.10-08

180 4.10-06

180 4.10-07

180 4.10-00

180 4.10-03

180 4.10-19

180 4.10-19

180 4.10-04

180 4.10-05

180 4.10-05

180 4.10-05

180 4.10-05

180 4.10-09

180 4.10-16

180 4.10-16

180 4.10-17

180 4.10-22

180 4.10-21

LUBRIFICADO

218

29,54

4,9 a 50

180 4.10-09

Produto Liberado para Venda

Observao: -

Certificado emitido em 13/09/03

Certificado emitido eletronicamente-NAO necessria a assinatura.

Online Log: 235
FCU 2110-4 U3.12

TESTE USP.
Start: 09.07.2003 13:32
Averaging interval: 1 min
Test volume: 100 ml

Time 0
h:m 02..05..15..25 >25 ml
0:00 08 09 08 09 118

Last Measurement:
size counts per 100ml
µm diff cum NMS ISO

2	192311	290332	08	19
5	89887	39821	08	17
15	6143	8734	08	14
25	2391	2391	08	09

Online Log: 234
FCU 2110-4 U3.12

TESTE USP.
Start: 09.07.2003 13:30
Averaging interval: 1 min
Test volume: 100 ml

Time 0
h:m 02..05..15..25 >25 ml
0:00 08 10 09 14 122

Last Measurement:
size counts per 100ml
µm diff cum NMS ISO

2	250879	549756	08	28
5	183295	298877	08	18
15	20351	115382	08	17
25	95231	95231	08	14

Online Log: 233
FCU 2110-4 U3.12

TESTE USP.
Start: 09.07.2003 13:26
Averaging interval: 1 min
Test volume: 100 ml

Time 0
h:m 02..05..15..25 >25 ml
0:00 08 09 08 09 72

Last Measurement:
size counts per 100ml
µm diff cum NMS ISO

2	274431	414548	08	19
5	122487	140109	08	13
15	8959	12622	08	14
25	3663	3663	08	09

Online Log: 242
FCU 2110-4 U3.12

TESTE USP.
Start: 09.07.2003 14:53
Averaging interval: 1 min
Test volume: 100 ml

Time 0
h:m 02..05..15..25 >25 ml
0:00 08 09 07 09 110

Last Measurement:
size counts per 100ml
µm diff cum NMS ISO

2	179199	264924	08	19
5	78335	85225	08	17
15	5279	7390	07	13
25	2111	2111	08	09

Online Log: 237
FCU 2110-4 U3.12

TESTE USP.
Start: 09.07.2003 13:36
Averaging interval: 1 min
Test volume: 100 ml

Time 0
h:m 02..05..15..25 >25 ml
0:00 07 08 07 08 113

Last Measurement:
size counts per 100ml
µm diff cum NMS ISO

2	142335	210996	07	18
5	63231	68661	08	17
15	3775	5430	07	13
25	1655	1655	08	08

Online Log: 236
FCU 2110-4 U3.12

TESTE USP.
Start: 09.07.2003 13:34
Averaging interval: 1 min
Test volume: 100 ml

Time 0
h:m 02..05..15..25 >25 ml
0:00 07 09 07 09 115

Last Measurement:
size counts per 100ml
µm diff cum NMS ISO

2	152695	232756	07	18
5	73215	80861	08	17
15	4757	6946	07	13
25	2879	2879	08	09

Online Log: 245
FCU 2110-4 U3.12

TESTE USP.
Start: 09.07.2003 15:00
Averaging interval: 1 min
Test volume: 100 ml

Time 0
h:m 02..05..15..25 >25 ml
0:00 08 08 07 08 102

Last Measurement:
size counts per 100ml
µm diff cum NMS ISO

2	166911	224564	08	18
5	52991	52991	08	16
15	3199	4652	07	13
25	1463	1463	08	08

Online Log: 244
FCU 2110-4 U3.12

TESTE USP.
Start: 09.07.2003 14:50
Averaging interval: 1 min
Test volume: 100 ml

Time 0
h:m 02..05..15..25 >25 ml
0:00 08 08 07 08 103

Last Measurement:
size counts per 100ml
µm diff cum NMS ISO

2	163839	233068	08	18
5	63487	69229	08	17
15	3951	5742	07	13
25	1791	1791	08	08

Online Log: 243
FCU 2110-4 U3.12

TESTE USP.
Start: 09.07.2003 14:56
Averaging interval: 1 min
Test volume: 100 ml

Time 0
h:m 02..05..15..25 >25 ml
0:00 08 08 07 08 109

Last Measurement:
size counts per 100ml
µm diff cum NMS ISO

2	17815	243692	08	18
5	60671	65517	08	17
15	3391	4946	07	13
25	1455	1455	08	08

Online Log: 246
FCU 2110-4 U3.12

TESTE USP

Start: 09.07.2003 15:03
Averaging Interval: 1 min
Test Volume: 100 ml
Time 0
NMS 1638
h:m 02..05..15..25 >25 ml
0:00 07 08 06 08 102

Last Measurement:
size counts per 100ml
µm diff cum. NMS 190

2	139263	189188	07	18
5	44543	49917	08	16
15	3167	5324	07	13
25	2287	2287	08	08

Online Log: 248
FCU 2110-4 U3.12

TESTE USP

Start: 09.07.2003 15:07
Averaging Interval: 1 min
Test Volume: 100 ml
Time 0
NMS 1638
h:m 02..05..15..25 >25 ml
0:00 07 08 07 09 102

Last Measurement:
size counts per 100ml
µm diff cum. NMS 190

2	129823	175508	07	18
5	39423	43365	08	16
15	2495	4182	06	13
25	1687	1687	08	08

Online Log: 247
FCU 2110-4 U3.12

TESTE USP

Start: 09.07.2003 15:05
Averaging Interval: 1 min
Test Volume: 100 ml
Time 0
NMS 1638
h:m 02..05..15..25 >25 ml
0:00 07 08 06 08 102

Last Measurement:
size counts per 100ml
µm diff cum. NMS 190

2	129823	175508	07	18
5	39423	43365	08	16
15	2495	4182	06	13
25	1687	1687	08	08

Online Log: 249
FCU 2110-4 U3.12

TESTE USP

Start: 09.07.2003 15:10
Averaging Interval: 1 min
Test Volume: 100 ml
Time 0
NMS 1638
h:m 02..05..15..25 >25 ml
0:00 07 08 06 08 102

Last Measurement:
size counts per 100ml
µm diff cum. NMS 190

2	126279	178908	07	18
5	39679	43723	08	16
15	2447	4094	06	13
25	1647	1647	08	08

Online Log: 249
FCU 2110-4 U3.12

TESTE USP

Start: 09.07.2003 15:10
Averaging Interval: 1 min
Test Volume: 100 ml
Time 0
NMS 1638
h:m 02..05..15..25 >25 ml
0:00 07 08 06 08 102

Last Measurement:
size counts per 100ml
µm diff cum. NMS 190

2	126279	178908	07	18
5	39679	43723	08	16
15	2447	4094	06	13
25	1647	1647	08	08

Online Log: 250
FCU 2110-4 U3.12

TESTE USP

Start: 09.07.2003 15:12
Averaging Interval: 1 min
Test Volume: 100 ml
Time 0
NMS 1638
h:m 02..05..15..25 >25 ml
0:00 07 08 06 08 102

Last Measurement:
size counts per 100ml
µm diff cum. NMS 190

2	116223	156372	07	18
5	35839	40149	08	16
15	2399	4318	06	13
25	1911	1911	08	08

Online Log: 251
FCU 2110-4 U3.12

TESTE USP

Start: 09.07.2003 15:14
Averaging Interval: 1 min
Test Volume: 100 ml
Time 0
NMS 1638
h:m 02..05..15..25 >25 ml
0:00 07 08 06 08 102

Last Measurement:
size counts per 100ml
µm diff cum. NMS 190

2	102911	134956	07	18
5	26239	29803	07	15
15	1583	2885	06	12
25	1223	1223	08	08

ANEXO 7 Função RMS ALTA e RMS BAIXA para Matlab

```

functon [rmsbaixa,rmsalta]=filtro(s);
%[rmsbaixa rmsalta]=filtro(s);
%filtra sinal s passa baixa e passa alta
%rmsbaixa e rmsalta s~ao os valores de RMS para os sinais filtrados passa baixa e
%a frequencia de corte do filtro passa baixa e de 1 khz e do passa alta de 8 khz
%coeficientes do filtro passa baixa
abaixa = [1.0000 -3.8587 6.0629 -4.8248 1.9389 -0.3131];
baixa = [0.0570 -0.1441 0.0897 -0.1441 0.0570];
%coeficientes do filtro passa alta
aalta = [1.0000 2.1732 2.3818 0.0947 -0.0947 -0.0745 -0.1080];
%baixa = [0.1080 0.0745 0.0947 1.3334 0.4224 0.0411];
%alta = [1.0000 2.1732 2.3818 0.0947 -0.0947 -0.0745 -0.1080];
rmsbaixa=std(filtro(baixa,abaixa,s));
rmsalta=std(filtro(balta,aalta,s));

```

Time	NMS	1638	0	Averaging interval: 1 min	Test volume: 100 ml	Start: 09.07.2003 11:44	FCU 2110-4 U3.12	Online log: 215
0:00	05	05	04	06	77			
h:m	02...	05...	15...	25	25			
size	counts per 100ml							
µm	diff	cum	NMS	ISO				
2	23935	31678	05	13				
5	6829	7743	05	13				
15	451	864	04	10				
25	413	413	06					
Last Measurement:								
0:02	13	14	12	14	01			
0:00	Flow rate error							
h:m	02...	05...	15...	25	25			
size	counts per 100ml							
µm	diff	cum	NMS	ISO				
2	576767	8416232	13	24				
5	2424631	2649885	14	22				
15	156671	22824	12	18				
25	67583	67583	14					
Last Measurement:								
0:02	13	14	12	14	01			

Time	NMS	1638	0	Averaging interval: 1 min	Test volume: 100 ml	Start: 10.07.2003 20:56	FCU 2110-4 U3.12	Online log: 267
0:00	13	14	12	14	01			
h:m	02...	05...	15...	25	25			
size	counts per 100ml							
µm	diff	cum	NMS	ISO				
2	5781631	8469388	13	24				
5	252315	2767869	14	22				
15	17385	244734	12	18				
25	71629	71629	14					
Last Measurement:								
0:00	13	14	12	14	01			
h:m	02...	05...	15...	25	25			
size	counts per 100ml							
µm	diff	cum	NMS	ISO				
2	511887	6987644	12	23				
5	1662975	1793837	13	21				
15	98383	132862	12	18				
25	34559	34559	13					
Last Measurement:								
0:00	12	13	12	13	78			
h:m	02...	05...	15...	25	25			
size	counts per 100ml							
µm	diff	cum	NMS	ISO				
2	511887	6987644	12	23				
5	1662975	1793837	13	21				
15	98383	132862	12	18				
25	34559	34559	13					
Last Measurement:								
0:00	12	13	12	13	78			

Time	NMS	1638	0	Averaging interval: 1 min	Test volume: 100 ml	Start: 09.07.2003 21:29	FCU 2110-4 U3.12	Online log: 278
0:00	12	13	11	12	78			
h:m	02...	05...	15...	25	25			
size	counts per 100ml							
µm	diff	cum	NMS	ISO				
2	4882431	6332156	12	23				
5	1343487	1449725	13	21				
15	7835	106238	11	17				
25	27983	27983	12					
Last Measurement:								
0:00	12	13	12	13	78			
h:m	02...	05...	15...	25	25			
size	counts per 100ml							
µm	diff	cum	NMS	ISO				
2	4882431	6332156	12	23				
5	1343487	1449725	13	21				
15	7835	106238	11	17				
25	27983	27983	12					
Last Measurement:								
0:00	12	13	12	13	78			
h:m	02...	05...	15...	25	25			
size	counts per 100ml							
µm	diff	cum	NMS	ISO				
2	4882431	6332156	12	23				
5	1343487	1449725	13	21				
15	7835	106238	11	17				
25	27983	27983	12					
Last Measurement:								
0:00	12	13	12	13	78			

Time	NMS	1638	0	Averaging interval: 1 min	Test volume: 100 ml	Start: 10.07.2003 21:53	FCU 2110-4 U3.12	Online log: 277
0:00	12	12	10	11	77			
h:m	02...	05...	15...	25	25			
size	counts per 100ml							
µm	diff	cum	NMS	ISO				
2	4223671	4997628	12	23				
5	733883	778037	12	20				
15	27519	3274	18	16				
25	9835	9835	11					
Last Measurement:								
0:00	12	12	10	11	77			

Online Log: 288
FCU 2110-4 03.12

TESTE USP,
Start: 10.07.2003 22:32

Averaging Interval: 1 min
Test volume: 100 ml

Time NMS 1638

H:m 02...05...15...25 25 ml

0:00 13 14 11 12 75

Last Measurement:
size counts per 100ml
µm diff cum NMS ISO

2	7993391	10373836	13	24
5	2277375	2379645	14	22
15	74751	182278	11	17
25	27519	27519	12	

Online Log: 314
FCU 2110-4 03.12

TESTE USP,
Start: 11.07.2003 04:42

Averaging Interval: 1 min
Test volume: 100 ml

Time NMS 1638

H:m 02...05...15...25 25 ml

0:00 10 11 10 15 118

Last Measurement:
size counts per 100ml
µm diff cum NMS ISO

2	987135	1635868	10	21
5	475135	647933	11	20
15	39629	172798	10	18
25	133119	133119	15	

Online Log: 315
FCU 2110-4 03.12

TESTE USP,
Start: 11.07.2003 04:45

Averaging Interval: 1 min
Test volume: 100 ml

Time NMS 1638

H:m 02...05...15...25 25 ml

0:00 10 11 09 11 117

Last Measurement:
size counts per 100ml
µm diff cum NMS ISO

2	1064959	1509692	10	21
5	411647	444733	11	19
15	22143	33806	09	16
25	10943	10943	11	

Online Log: 277
FCU 2110-4 03.12

TESTE USP,
Start: 10.07.2003 22:33

Averaging Interval: 1 min
Test volume: 100 ml

Time NMS 1638

H:m 02...05...15...25 25 ml

0:00 13 15 13 14 24

Last Measurement:
size counts per 100ml
µm diff cum NMS ISO

2	536639	12168588	13	24
5	4292687	4623869	15	23
15	226203	331262	13	19
25	104959	104959	14	

Online Log: 278
FCU 2110-4 03.12

TESTE USP,
Start: 10.07.2003 22:36

Averaging Interval: 1 min
Test volume: 100 ml

Time NMS 1638

H:m 02...05...15...25 25 ml

0:00 13 14 12 13 76

Last Measurement:
size counts per 100ml
µm diff cum NMS ISO

2	8292083	12185212	13	24
5	3653631	3814909	14	22
15	121343	161278	12	18
25	39935	39935	13	

Online Log: 279
FCU 2110-4 03.12

TESTE USP,
Start: 10.07.2003 22:49

Averaging Interval: 1 min
Test volume: 100 ml

Time NMS 1638

H:m 02...05...15...25 25 ml

0:00 13 14 12 13 24

Last Measurement:
size counts per 100ml
µm diff cum NMS ISO

2	835839	1142038	13	24
5	2932735	3072389	14	22
15	98383	130724	12	18
25	41471	41471	13	

Online Log: 273
FCU 2110-4 03.12

TESTE USP,
Start: 10.07.2003 21:35

Averaging Interval: 1 min
Test volume: 100 ml

Time NMS 1638

H:m 02...05...15...25 25 ml

0:00 12 12 09 11 78

Last Measurement:
size counts per 100ml
µm diff cum NMS ISO

2	3768319	4418620	12	20
5	618495	658381	12	20
15	27783	31806	09	15
25	9023	9023	11	

Online Log: 274
FCU 2110-4 03.12

TESTE USP,
Start: 10.07.2003 22:17

Averaging Interval: 1 min
Test volume: 100 ml

Time NMS 1638

H:m 02...05...15...25 25 ml

0:00 12 12 13 15 72

Last Measurement:
size counts per 100ml
µm diff cum NMS ISO

2	2736127	4066308	12	23
5	981119	1338173	12	21
15	242687	429054	13	19
25	186367	186367	15	

Online Log: 276
FCU 2110-4 03.12

TESTE USP,
Start: 10.07.2003 22:23

Averaging Interval: 1 min
Test volume: 100 ml

Time NMS 1638

H:m 02...05...15...25 25 ml

0:00 13 15 13 14 78

Last Measurement:
size counts per 100ml
µm diff cum NMS ISO

2	7897887	14404604	13	24
5	6229919	6587317	13	23
15	211967	281398	13	19
25	69631	69631	14	

Online Log: 316
FCU 2110-4 U3.12

TESTE USP.

Start: 11.07.2003 04:49

Averaging Interval: 1 min

Test volume: 100 ml

Time NMS 1638

h:m 02...05...15...25 >25 ml

0:00 10 11 09 11 115

size counts per 100ml

µm diff cum NMS ISO

2 113887 154436 10 21

5 374783 402749 11 19

15 19711 27966 09 15

25 8255 8255 11

Online Log: 317
FCU 2110-4 U3.12

TESTE USP.

Start: 11.07.2003 04:52

Averaging Interval: 1 min

Test volume: 100 ml

Time NMS 1638

h:m 02...05...15...25 >25 ml

0:00 10 11 09 10 114

size counts per 100ml

µm diff cum NMS ISO

2 1003519 1332188 10 21

5 305151 328669 11 19

15 16311 23518 09 15

25 7007 7007 10

Online Log: 318
FCU 2110-4 U3.12

TESTE USP.

Start: 11.07.2003 04:59

Averaging Interval: 1 min

Test volume: 100 ml

Time NMS 1638

h:m 02...05...15...25 >25 ml

0:00 11 11 10 11 115

size counts per 100ml

µm diff cum NMS ISO

2 1687531 2203516 11 22

5 475135 519565 11 20

15 27135 40030 10 16

25 13695 13695 11

Online Log: 295
FCU 2110-4 U3.12

TESTE USP.

Start: 11.07.2003 02:32

Averaging Interval: 1 min

Test volume: 100 ml

Time NMS 1638

h:m 02...05...15...25 >25 ml

0:00 15 15 15 115

size counts per 100ml

µm diff cum NMS ISO

2 0 861385 <02 24

5 6356991 861385 15 >23

15 1409823 2256894 15 >21

25 847871 847871 >15

Online Log: 297
FCU 2110-4 U3.12

TESTE USP.

Start: 11.07.2003 02:37

Averaging Interval: 1 min

Test volume: 100 ml

Time NMS 1638

h:m 02...05...15...25 >25 ml

0:00 12 12 15 113

size counts per 100ml

µm diff cum NMS ISO

2 0 259910 <02 22

5 0 259910 <02 22

15 174079 259910 12 >21

25 2424831 2424831 >15

Online Log: 298
FCU 2110-4 U3.12

TESTE USP.

Start: 11.07.2003 02:43

Averaging Interval: 1 min

Test volume: 100 ml

Time NMS 1638

h:m 02...05...15...25 >25 ml

0:00 15 15 15 113

size counts per 100ml

µm diff cum NMS ISO

2 0 3653630 <02 22

5 0 3653630 <02 22

15 171217 3653630 >15 >21

25 1941503 1941503 >15

Online Log: 299
FCU 2110-4 U3.12

TESTE USP.

Start: 11.07.2003 02:46

Averaging Interval: 1 min

Test volume: 100 ml

Time NMS 1638

h:m 02...05...15...25 >25 ml

0:00 15 15 15 112

size counts per 100ml

µm diff cum NMS ISO

2 0 14368763 <02 24

5 11730943 14368763 >15 >23

15 1794047 2632822 >15 >21

25 843775 843775 >15

Online Log: 300
FCU 2110-4 U3.12

TESTE USP.

Start: 11.07.2003 02:52

Averaging Interval: 1 min

Test volume: 100 ml

Time NMS 1638

h:m 02...05...15...25 >25 ml

0:00 15 15 15 115

size counts per 100ml

µm diff cum NMS ISO

2 0 8032253 <02 24

5 6029311 8032253 15 >23

15 1294335 2002942 15 >21

25 708607 708607 >15

Online Log: 301
FCU 2110-4 U3.12

TESTE USP.

Start: 11.07.2003 02:54

Averaging Interval: 1 min

Test volume: 100 ml

Time NMS 1638

h:m 02...05...15...25 >25 ml

0:00 15 15 15 113

size counts per 100ml

µm diff cum NMS ISO

2 0 16674013 <02 24

5 1532031 16674013 >15 >23

15 860159 1147702 15 >21

25 282623 282623 >15

Online Log: 382
FCU 2110-4 U3.12

TESTE USP.

Start: 11.07.2003 03:17
Averaging interval: 1 min
Test volume: 100 ml

Time	NMS	1638
0:00	11	13 113
h:m 02...05...15...25 >25 ml		

Last Measurement:

size	counts per 100ml
2	1662975
5	1228607
15	81919
25	34303

Online Log: 383
FCU 2110-4 U3.12

TESTE USP.

Start: 11.07.2003 03:21
Averaging interval: 1 min
Test volume: 100 ml

Time	NMS	1638
0:00	09	11 10 12 113
h:m 02...05...15...25 >25 ml		

Last Measurement:

size	counts per 100ml
2	460799
5	368639
15	36863
25	16895

Online Log: 384
FCU 2110-4 U3.12

TESTE USP.

Start: 11.07.2003 03:28
Averaging interval: 1 min
Test volume: 100 ml

Time	NMS	1638
0:00	10	11 10 11 113
h:m 02...05...15...25 >25 ml		

Last Measurement:

size	counts per 100ml
2	92791
5	462047
15	28671
25	12415

Online Log: 387
FCU 2110-4 U3.12

TESTE USP.

Start: 11.07.2003 03:38
Averaging interval: 1 min
Test volume: 100 ml

Time	NMS	1638
0:00	10	12 13 15 93
h:m 02...05...15...25 >25 ml		

Last Measurement:

size	counts per 100ml
2	978943
5	712763
15	258047
25	249855

Online Log: 385
FCU 2110-4 U3.12

TESTE USP.

Start: 11.07.2003 03:30
Averaging interval: 1 min
Test volume: 100 ml

Time	NMS	1638
0:00	12	13 10 10 111
h:m 02...05...15...25 >25 ml		

Last Measurement:

size	counts per 100ml
2	2981887
5	1056767
15	28159
25	8063

Online Log: 386
FCU 2110-4 U3.12

TESTE USP.

Start: 11.07.2003 03:35
Averaging interval: 1 min
Test volume: 100 ml

Time	NMS	1638
0:00	12	09 10 113
h:m 02...05...15...25 >25 ml		

Last Measurement:

size	counts per 100ml
2	2621439
5	647167
15	28991
25	7423

Online Log: 387
FCU 2110-4 U3.12

TESTE USP.

Start: 11.07.2003 03:38
Averaging interval: 1 min
Test volume: 100 ml

Time	NMS	1638
0:00	10	12 13 15 93
h:m 02...05...15...25 >25 ml		

Last Measurement:

size	counts per 100ml
2	299548
5	712763
15	258047
25	249855

Online Log: 388
FCU 2110-4 U3.12

TESTE USP.

Start: 11.07.2003 04:10
Averaging interval: 1 min
Test volume: 100 ml

Time	NMS	1638
0:00	10	09 10 14 120
h:m 02...05...15...25 >25 ml		

Last Measurement:

size	counts per 100ml
2	73183
5	226303
15	12322
25	10447

Online Log: 388
FCU 2110-4 U3.12

TESTE USP.

Start: 11.07.2003 04:00
Averaging interval: 1 min
Test volume: 100 ml

Time	NMS	1638
0:00	07	10 09 14 122
h:m 02...05...15...25 >25 ml		

Last Measurement:

size	counts per 100ml
2	154623
5	177151
15	20479
25	99327

Online Log: 389
FCU 2110-4 U3.12

TESTE USP.

Start: 11.07.2003 04:02
Averaging interval: 1 min
Test volume: 100 ml

Time	NMS	1638
0:00	08	10 09 10 119
h:m 02...05...15...25 >25 ml		

Last Measurement:

size	counts per 100ml
2	231423
5	163839
15	11711
25	4959

Online Log: 390
FCU 2110-4 U3.12

TESTE USP.

Start: 11.07.2003 04:10
Averaging interval: 1 min
Test volume: 100 ml

Time	NMS	1638
0:00	10	10 10 14 120
h:m 02...05...15...25 >25 ml		

Last Measurement:

size	counts per 100ml
2	108588
5	32125
15	12322
25	10447

Online Log: 391
FCU 2110-4 U3.12

TESTE USP.

Start: 11.07.2003 04:10
Averaging interval: 1 min
Test volume: 100 ml

Time	NMS	1638
0:00	10	10 10 14 120
h:m 02...05...15...25 >25 ml		

Last Measurement:

size	counts per 100ml
2	108588
5	32125
15	12322
25	10447

Online Log: 311
FCU 2110-4 U3.12

TESTE USP.

Start: 11.07.2003 04:12

Averaging Interval: 1 min
Test volume: 100 ml

Time NMS 1638 0

M: 02...05...15...25 >25 #1

0:00 11 10 08 09 118

Last Measurement:

size	counts per 100ml
µm diff	cum NMS ISO
2	1342487 1560300 11 21
5	205823 216913 10 18
15	7647 10990 08 14
25	3343 3343 09

Online Log: 312
FCU 2110-4 U3.12

TESTE USP.

Start: 11.07.2003 04:16

Averaging Interval: 1 min
Test volume: 100 ml

Time NMS 1638 0

M: 02...05...15...25 >25 #1

0:00 18 10 07 09 117

Last Measurement:

size	counts per 100ml
µm diff	cum NMS ISO
2	1228799 1402788 10 21
5	166911 174989 10 18
15	5343 8028 07 14
25	2735 2735 09

Online Log: 313
FCU 2110-4 U3.12

TESTE USP.

Start: 11.07.2003 04:18

Averaging Interval: 1 min
Test volume: 100 ml

Time NMS 1638 0

M: 02...05...15...25 >25 #1

0:00 10 11 07 09 115

Last Measurement:

size	counts per 100ml
µm diff	cum NMS ISO
2	1441791 1636204 11 21
5	187391 194413 10 18
15	4267 7022 07 13
25	2255 2255 09

Online Log: 314
FCU 2110-4 U3.12

TESTE USP.

Start: 11.07.2003 04:42

Averaging Interval: 1 min
Test volume: 100 ml

Time NMS 1638 0

M: 02...05...15...25 >25 #1

0:00 10 11 09 11 117

Last Measurement:

size	counts per 100ml
µm diff	cum NMS ISO
2	1064959 1589692 10 21
5	411647 444733 11 19
15	22143 33006 09 16
25	10943 10943 11

Online Log: 315
FCU 2110-4 U3.12

TESTE USP.

Start: 11.07.2003 04:49

Averaging Interval: 1 min
Test volume: 100 ml

Time NMS 1638 0

M: 02...05...15...25 >25 #1

0:00 10 11 09 11 115

Last Measurement:

size	counts per 100ml
µm diff	cum NMS ISO
2	1138687 1541436 10 21
5	374783 402749 11 19
15	1271 2796 09 15
25	8235 8235 11

Online Log: 316
FCU 2110-4 U3.12

TESTE USP.

Start: 11.07.2003 05:01

Averaging Interval: 1 min
Test volume: 100 ml

Time NMS 1638 0

M: 02...05...15...25 >25 #1

0:00 11 12 10 11 114

Last Measurement:

size	counts per 100ml
µm diff	cum NMS ISO
2	1882239 2435644 11 22
5	581631 633485 12 20
15	36351 51774 10 16
25	15423 15423 11

Online Log: 317
FCU 2110-4 U3.12

TESTE USP.

Start: 11.07.2003 04:52

Averaging Interval: 1 min
Test volume: 100 ml

Time NMS 1638 0

M: 02...05...15...25 >25 #1

0:00 10 11 09 10 114

Last Measurement:

size	counts per 100ml
µm diff	cum NMS ISO
2	1003519 1332188 10 21
5	305151 328669 11 19
15	16511 23518 09 15
25	7007 7007 10

Online Log: 318
FCU 2110-4 U3.12

TESTE USP.

Start: 11.07.2003 04:59

Averaging Interval: 1 min
Test volume: 100 ml

Time NMS 1638 0

M: 02...05...15...25 >25 #1

0:00 11 11 10 11 115

Last Measurement:

size	counts per 100ml
µm diff	cum NMS ISO
2	1687551 2283516 11 22
5	475135 515965 11 20
15	27135 40830 10 16
25	13695 13695 11

Online Log: 319
FCU 2110-4 U3.12

TESTE USP.

Start: 11.07.2003 05:01

Averaging Interval: 1 min
Test volume: 100 ml

Time NMS 1638 0

M: 02...05...15...25 >25 #1

0:00 11 12 10 11 114

Last Measurement:

size	counts per 100ml
µm diff	cum NMS ISO
2	1882239 2435644 11 22
5	581631 633485 12 20
15	36351 51774 10 16
25	15423 15423 11

Online Log: 320
FCU 2110-4 U3.12

TESTE USP.

Start: 11.07.2003 05:01

Averaging Interval: 1 min
Test volume: 100 ml

Time NMS 1638 0

M: 02...05...15...25 >25 #1

0:00 11 12 10 11 114

Last Measurement:

size	counts per 100ml
µm diff	cum NMS ISO
2	1882239 2435644 11 22
5	581631 633485 12 20
15	36351 51774 10 16
25	15423 15423 11

Online Log: 321
FCU 2110-4 U3.12

TESTE USP.

Start: 11.07.2003 05:01

Averaging Interval: 1 min
Test volume: 100 ml

Time NMS 1638 0

M: 02...05...15...25 >25 #1

0:00 11 12 10 11 114

Last Measurement:

size	counts per 100ml
µm diff	cum NMS ISO
2	1882239 2435644 11 22
5	581631 633485 12 20
15	36351 51774 10 16
25	15423 15423 11

Online Log: 322
FCU 2110-4 U3.12

TESTE USP.

Start: 11.07.2003 05:01

Averaging Interval: 1 min
Test volume: 100 ml

Time NMS 1638 0

M: 02...05...15...25 >25 #1

0:00 11 12 10 11 114

Last Measurement:

size	counts per 100ml
µm diff	cum NMS ISO
2	1882239 2435644 11 22
5	581631 633485 12 20
15	36351 51774 10 16
25	15423 15423 11

Online Log: 323
FCU 2110-4 U3.12

TESTE USP.

Start: 11.07.2003 05:01

Averaging Interval: 1 min
Test volume: 100 ml

Time NMS 1638 0

M: 02...05...15...25 >25 #1

0:00 11 12 10 11 114

Last Measurement:

size	counts per 100ml
µm diff	cum NMS ISO
2	1882239 2435644 11 22
5	581631 633485 12 20
15	36351 51774 10 16
25	15423 15423 11

Online Log: 324
FCU 2110-4 U3.12

TESTE USP.

Start: 11.07.2003 05:01

Averaging Interval: 1 min
Test volume: 100 ml

Time NMS 1638 0

M: 02...05...15...25 >25 #1

0:00 11 12 10 11 114

Last Measurement:

size	counts per 100ml
µm diff	cum NMS ISO
2	1882239 2435644 11 22
5	581631 633485 12 20
15	36351 51774 10 16
25	15423 15423 11

Online Log: 325
FCU 2110-4 U3.12

TESTE USP.

Start: 11.07.2003 05:01

Averaging Interval: 1 min
Test volume: 100 ml

Time NMS 1638 0

M: 02...05...15...25 >25 #1

0:00 11 12 10 11 114

Last Measurement:

size	counts per 100ml
µm diff	cum NMS ISO
2	1882239 2435644 11 22
5	581631 633485 12 20
15	36351 51774 10 16
25	15423 15423 11

Online Log: 326
FCU 2110-4 U3.12

TESTE USP.

Start: 11.07.2003 05:01

Averaging Interval: 1 min
Test volume: 100 ml

Time NMS 1638 0

M: 02...05...15...25 >25 #1

0:00 11 12 10 11 114

Last Measurement:

size	counts per 100ml
µm diff	cum NMS ISO
2	1882239 2435644 11 22
5	581631 633485 12 20
15	36351 51774 10 16
25	15423 15423 11

Online Log: 327
FCU 2110-4 U3.12

TESTE USP.

Start: 11.07.2003 05:01

Averaging Interval: 1 min
Test volume: 100 ml

Time NMS 1638 0

M: 02...05...15...25 >25 #1

0:00 11 12 10 11 114

Last Measurement:

size	counts per 100ml
µm diff	cum NMS ISO
2	1882239 2435644 11 22
5	581631 633485 12 20
15	36351 51774 10 16
25	15423 15423 11

Online Log: 328
FCU 2110-4 U3.12

TESTE USP.

Start: 11.07.2003 05:01

Averaging Interval: 1 min
Test volume: 100 ml

Time NMS 1638 0

M: 02...05...15...25 >25 #1

0:00 11 12 10 11 114

Last Measurement:

size	counts per 100ml
µm diff	cum NMS ISO
2	1882239 2435644 11 22
5	581631 633485 12 20
15	36351 51774 10 16
25	15423 15423 11

Online Log: 329
FCU 2110-4 U3.12

TESTE USP.

Start: 11.07.2003 05:01

Averaging Interval: 1 min
Test volume: 100 ml

Time NMS 1638 0

M: 02...05...15...25 >25 #1

0:00 11 12 10 11 114

Last Measurement:

size	counts per 100ml
µm diff	cum NMS ISO
2	1882239 2435644 11 22
5	581631 633485 12 20
15	36351 51774 10 16
25	15423 15423 11

Online Log: 330
FCU 2110-4 U3.12

TESTE USP.

Start: 11.07.2003 05:01

Averaging Interval: 1 min
Test volume: 100 ml

Time NMS 1638 0

M: 02...05...15...25 >25 #1

0:00 11 12 10 11 114

Last Measurement:

size	counts per 100ml
µm diff	cum NMS ISO
2	1882239 2435644 11 22
5	581631 633485 12 20
15	36351 51774 10 16
25	15423 15423 11

Online log: 328
FCU 2110-4 U3.12

TESTE USP.
Start: 11.07.2003 05:13
Averaging interval: 1 min
Test volume : 100 ml

Time NMS 1638
h:m 02...05...15...25 >25 ml

0:00 13 12 14 113

Last Measurement:
size counts per 100ml
µm diff cum NMS ISO

2	3620863	5790716	12	23
5	1941503	2169653	13	22
15	143359	228350	12	18
25	84991	84991	14	14

Online log: 321
FCU 2110-4 U3.12

TESTE USP.
Start: 11.07.2003 05:15
Averaging interval: 1 min
Test volume : 100 ml

Time NMS 1638
h:m 02...05...15...25 >25 ml

0:00 13 12 14 113

Last Measurement:
size counts per 100ml
µm diff cum NMS ISO

2	4079615	6286844	12	23
5	2007039	2207229	13	22
15	132895	200190	12	18
25	68095	68095	14	14

Online log: 322
FCU 2110-4 U3.12

TESTE USP.
Start: 11.07.2003 05:24
Averaging interval: 1 min
Test volume : 100 ml

Time NMS 1638
h:m 02...05...15...25 >25 ml

0:00 13 14 12 15 112

Last Measurement:
size counts per 100ml
µm diff cum NMS ISO

2	5963775	1001936	13	24
5	3751935	4050061	14	23
15	153599	304126	12	19
25	150527	150527	15	15

Online log: 323
FCU 2110-4 U3.12

TESTE USP.
Start: 11.07.2003 05:31
Averaging interval: 1 min
Test volume : 100 ml

Time NMS 1638
h:m 02...05...15...25 >25 ml

0:00 13 14 12 15 116

Last Measurement:
size counts per 100ml
µm diff cum NMS ISO

2	6062079	9042428	13	24
5	2670591	2900349	14	22
15	109055	309758	12	19
25	200703	200703	15	15

Online log: 324
FCU 2110-4 U3.12

TESTE USP.
Start: 11.07.2003 05:37
Averaging interval: 1 min
Test volume : 100 ml

Time NMS 1638
h:m 02...05...15...25 >25 ml

0:00 Flow rate error
0:01 13 14 12 13 116

Last Measurement:
size counts per 100ml
µm diff cum NMS ISO

2	6520831	9615356	13	24
5	2949119	3094525	14	22
15	97291	145406	12	18
25	47615	47615	13	13

Online log: 325
FCU 2110-4 U3.12

TESTE USP.
Start: 11.07.2003 05:41
Averaging interval: 1 min
Test volume : 100 ml

Time NMS 1638
h:m 02...05...15...25 >25 ml

0:00 13 14 12 13 115

Last Measurement:
size counts per 100ml
µm diff cum NMS ISO

2	6422527	9951740	13	24
5	3391487	3529213	14	22
15	96767	137726	12	18
25	40959	40959	13	13

Online log: 326
FCU 2110-4 U3.12

TESTE USP.
Start: 11.07.2003 05:55
Averaging interval: 1 min
Test volume : 100 ml

Time NMS 1638
h:m 02...05...15...25 >25 ml

0:00 13 14 12 14 113

Last Measurement:
size counts per 100ml
µm diff cum NMS ISO

2	6029311	1002444	13	24
5	3768319	3995133	14	22
15	137215	226814	12	18
25	89599	89599	14	14

Online log: 327
FCU 2110-4 U3.12

TESTE USP.
Start: 11.07.2003 05:58
Averaging interval: 1 min
Test volume : 100 ml

Time NMS 1638
h:m 02...05...15...25 >25 ml

0:00 13 15 13 14 113

Last Measurement:
size counts per 100ml
µm diff cum NMS ISO

2	5242879	1108604	13	24
5	5570559	5843965	15	23
15	190463	273406	13	19
25	82943	82943	14	14

Online log: 328
FCU 2110-4 U3.12

TESTE USP.
Start: 11.07.2003 06:05
Averaging interval: 1 min
Test volume : 100 ml

Time NMS 1638
h:m 02...05...15...25 >25 ml

0:00 12 15 13 14 115

Last Measurement:
size counts per 100ml
µm diff cum NMS ISO

2	2949119	12941820	12	24
5	9633791	9997701	15	23
15	261119	350910	13	19
25	97791	97791	14	14

Online Log: 329
FCU 2110-4 U3.12

TESTE USP.
Start: 11.07.2003 06:09
Averaging interval: 1 min
Test volume : 100 ml
Time NMS 1638
h:m 02...05...15...25 >25 m1
0:00 12 >15 13 14 114

Last Measurement:
size counts per 100ml
µm diff cum NMS ISO
2 2654207 13191164 12 24
5 10158079 10536957 >15 >23
15 270335 378870 13 19
25 108543 108543 14

Online Log: 330
FCU 2110-4 U3.12

TESTE USP.
Start: 11.07.2003 06:17
Averaging interval: 1 min
Test volume : 100 ml
Time NMS 1638
h:m 02...05...15...25 >25 m1
0:00 11 >15 13 14 115

Last Measurement:
size counts per 100ml
µm diff cum NMS ISO
2 1400831 14157308 11 24
5 12320767 12756477 >15 >23
15 319487 435710 13 19
25 116223 116223 14

Online Log: 332
FCU 2110-4 U3.12

TESTE USP.
Start: 11.07.2003 06:33
Averaging interval: 1 min
Test volume : 100 ml
Time NMS 1638
h:m 02...05...15...25 >25 m1
0:00 <02 >15 14 15 113

Last Measurement:
size counts per 100ml
µm diff cum NMS ISO
2 0 17100797 <02 >24
5 16515071 17100797 >15 >23
15 450559 585726 14 20
25 135167 135167 15

Surfcordeur SE1700 α
 DATE : Aug 29, 2003
 TIME : 18:00:46
 M speed : 0.050mm/s
 Standards : ISO97/JIS2001
 Cut off : λc=0.080mm
 Length : 0.400mm

[ISO97/JIS2001]
 Ra : 0.0507 μm
 Rz : 0.1300 μm
 Rp : 0.0900 μm
 Rv : 0.0400 μm
 Rt : 0.2500 μm
 RSm : 0.0157mm

P Profile(GAUSS)
 V 2000 ← 5.000 μm/10mm
 H 200 ↑ 0.050mm/10mm

Surfcordeur SE1700 α
 DATE : Aug 29, 2003
 TIME : 18:06:13
 M speed : 0.050mm/s
 Standards : ISO97/JIS2001
 Cut off : λc=0.080mm
 Length : 0.400mm

[ISO97/JIS2001]
 Ra : 0.0461 μm
 Rz : 0.1300 μm
 Rp : 0.0900 μm
 Rv : 0.0400 μm
 Rt : 0.2500 μm
 RSm : 0.0028mm

P Profile(GAUSS)
 V 2000 ← 5.000 μm/10mm
 H 200 ↑ 0.050mm/10mm

Surfcordeur SE1700 α
 DATE : Aug 29, 2003
 TIME : 18:04:40
 M speed : 0.050mm/s
 Standards : ISO97/JIS2001
 Cut off : λc=0.080mm
 Length : 0.400mm

[ISO97/JIS2001]
 Ra : 0.0573 μm
 Rz : 0.1300 μm
 Rp : 0.0900 μm
 Rv : 0.0400 μm
 Rt : 0.2500 μm
 RSm : 0.0000mm

P Profile(GAUSS)
 V 2000 ← 5.000 μm/10mm
 H 200 ↑ 0.050 μm/10mm

Surfcordeur SE1700 α
 DATE : Aug 29, 2003
 TIME : 18:08:32
 M speed : 0.050mm/s
 Standards : ISO97/JIS2001
 Cut off : λc=0.080mm
 Length : 0.400mm

[ISO97/JIS2001]
 Ra : 0.0279 μm
 Rz : 0.0930 μm
 Rp : 0.0560 μm
 Rv : 0.0370 μm
 Rt : 0.1600 μm
 RSm : 0.0062mm

P Profile(GAUSS)
 V 2000 ← 5.000 μm/10mm
 H 200 ↑ 0.050mm/10mm

Surfcordeur SE1700
 DATE : Aug 29, 2003
 TIME : 18:26:04
 M speed : 0.050mm/s
 Standards : ISO97/JIS2001
 Cut off : $\lambda_c=0.080mm$
 Length : 0.240mm
 [ISO97/JIS2001]
 Ra : 0.043 μm
 Rz : 0.2367 μm
 Rp : 0.1000 μm
 Rv : 0.1317 μm
 Rt : 0.3150 μm
 RSm : 0.0242mm

P Profile(GAUSS)
 V 5000 \leftarrow 2.000 $\mu m/10mm$
 H 200 \uparrow 0.050mm / 10mm

Surfcordeur SE1700
 DATE : Aug 29, 2003
 TIME : 18:19:11
 M speed : 0.050mm/s
 Standards : ISO97/JIS2001
 Cut off : $\lambda_c=0.080mm$
 Length : 0.400mm
 [ISO97/JIS2001]
 Ra : 0.0404 μm
 Rz : 0.2030 μm
 Rp : 0.0740 μm
 Rv : 0.1590 μm
 Rt : 0.3050 μm
 RSm : 0.0158mm

P Profile(GAUSS)
 V 2000 \leftarrow 5.000 $\mu m/10mm$
 H 200 \uparrow 0.050mm / 10mm

Surfcordeur SE1700
 DATE : Aug 29, 2003
 TIME : 18:26:45
 M speed : 0.050mm/s
 Standards : ISO97/JIS2001
 Cut off : $\lambda_c=0.080mm$
 Length : 0.320mm
 [ISO97/JIS2001]
 Ra : 0.0411 μm
 Rz : 0.2425 μm
 Rp : 0.0813 μm
 Rv : 0.1613 μm
 Rt : 0.3250 μm
 RSm : 0.0199mm

P Profile(GAUSS)
 V 2000 \leftarrow 5.000 $\mu m/10mm$
 H 200 \uparrow 0.050mm / 10mm

Surfcorde SE1700 α
 DATE : Aug 29, 2003
 TIME : 18:13:11
 M speed : 0.050mm/s
 Standards : ISO97/JIS2001
 Cut off : λc=0.080mm
 Length : 0.400mm
 [ISO97/JIS2001]
 Ra : 0.0760 μm
 Rz : 0.7150 μm
 Rp : 0.4070 μm
 Rv : 0.3070 μm
 Rt : 2.130 μm
 Rsm : 0.0170mm

Surfcorde SE1700 α
 DATE : Aug 29, 2003
 TIME : 18:15:55
 M speed : 0.050mm/s
 Standards : ISO97/JIS2001
 Cut off : λc=0.080mm
 Length : 0.320mm
 [ISO97/JIS2001]
 Ra : 0.0743 μm
 Rz : 0.4913 μm
 Rp : 0.1450 μm
 Rv : 0.3463 μm
 Rt : 1.095 μm
 Rsm : 0.0380mm



Surfcorder SE1700 α
 DATE : Aug 29, 2003
 TIME : 17:58:09
 M speed : 0.050mm/s
 Standards : ISO97/JIS2001
 Cut off : λc=0.080mm
 Length : 0.400mm
 [ISO97/JIS2001]
 Ra : 0.1277 μm
 Rz : 0.6700 μm
 Rp : 0.2900 μm
 Rq : 0.3800 μm
 Rv : 0.3500 μm
 Rsm : 0.0258mm

Surfcorder SE1700 α
 DATE : Aug 29, 2003
 TIME : 17:55:50
 M speed : 0.050mm/s
 Standards : ISO97/JIS2001
 Cut off : λc=0.080mm
 Length : 0.400mm
 [ISO97/JIS2001]
 Ra : 0.1273 μm
 Rz : 0.9700 μm
 Rp : 0.2900 μm
 Rq : 0.5800 μm
 Rv : 2.050 μm
 Rsm : 0.0395mm

Surfcorder SE1700 α
 DATE : Aug 29, 2003
 TIME : 17:53:23
 M speed : 0.050mm/s
 Standards : ISO97/JIS2001
 Cut off : λc=0.080mm
 Length : 0.400mm
 [ISO97/JIS2001]
 Ra : 0.1343 μm
 Rz : 0.7510 μm
 Rp : 0.2550 μm
 Rq : 0.4960 μm
 Rv : 1.075 μm
 Rsm : 0.0551mm

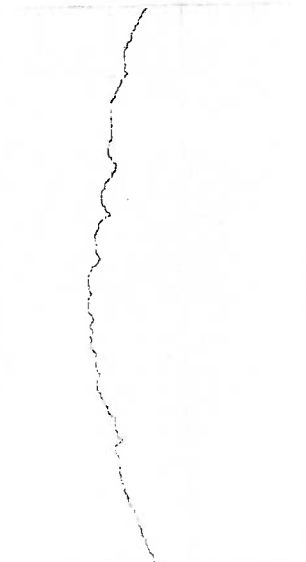
Surfcorder SE1700 α
 DATE : Aug 29, 2003
 TIME : 17:43:34
 M speed : 0.050mm/s
 Standards : ISO97/JIS2001
 Cut off : λc=0.080mm
 Length : 0.400mm
 [ISO97/JIS2001]
 Ra : 0.2022 μm
 Rz : 1.260 μm
 Rp : 0.4200 μm
 Rq : 0.8400 μm
 Rv : 1.700 μm
 Rsm : 0.0259mm

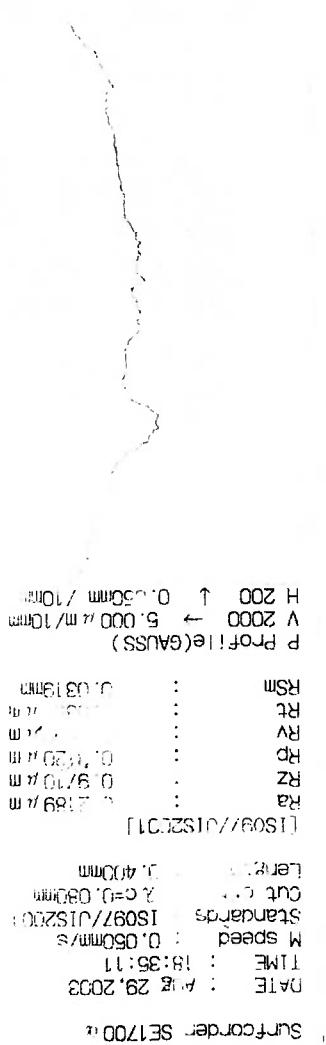
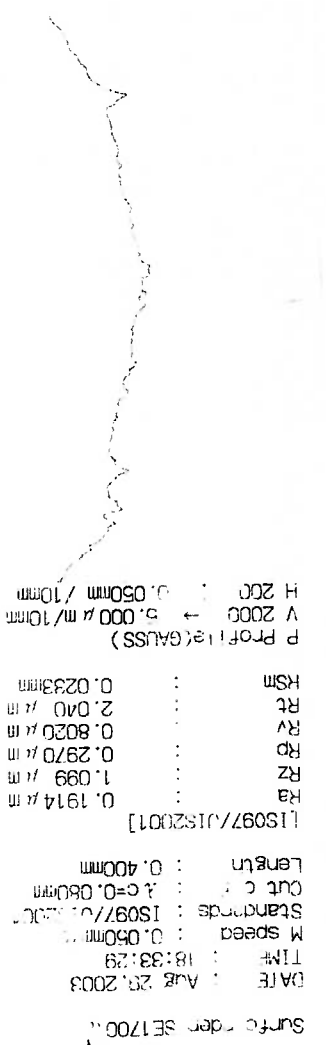
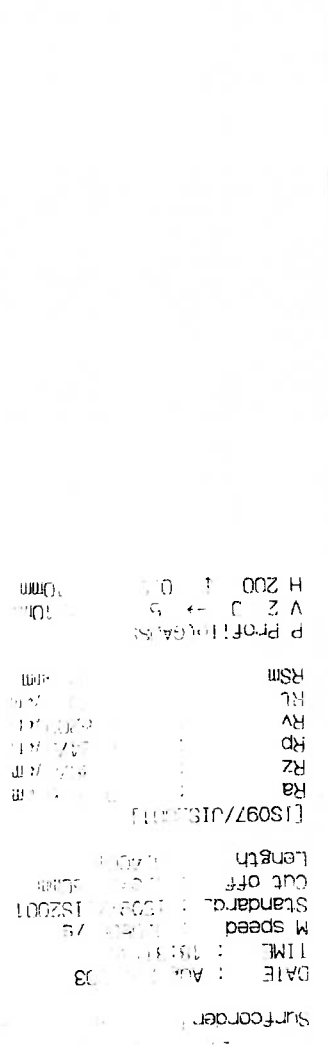
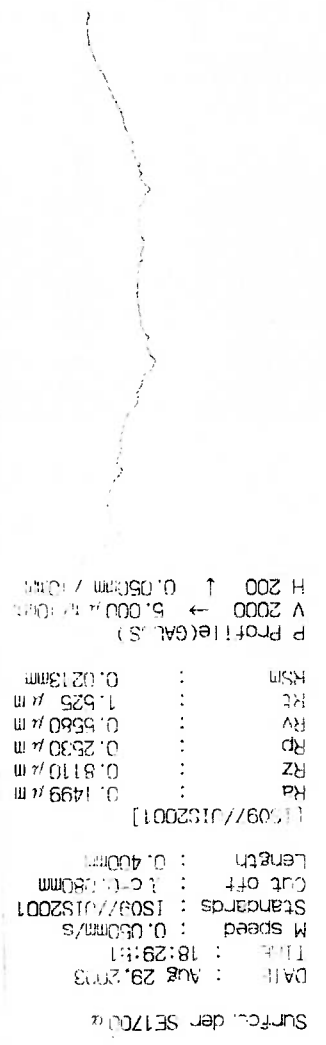
Adão C. Monteiro

Adão C. Monteiro

Adão C. Monteiro

Adão C. Monteiro



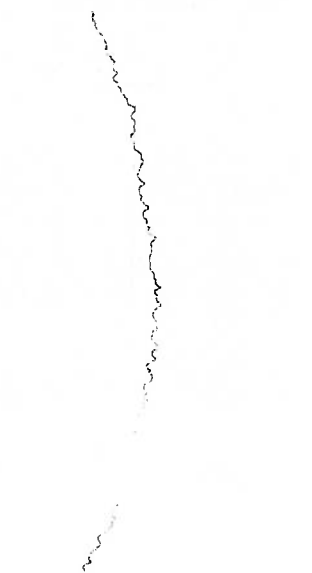


Surfscorder SE1700 α
 DATE : Aug 29, 2003
 TIME : 18:39:23
 M speed : 0.050mm/s
 Standards : ISO97/JIS2001
 Cut off : λc=0.080mm
 Length : 0.400mm
 [15097/JIS2001]
 Ra : 0.1308 μm
 Rz : 0.7100 μm
 Rp : 0.7000 μm
 Rv : 0.4970 μm
 Rq : 0.5000 μm
 RSm : 0.1868mm

Surfscorder SE1700 α
 DATE : Aug 29, 2003
 TIME : 18:40:41
 M speed : 0.050mm/s
 Standards : ISO97/JIS2001
 Cut off : λc=0.080mm
 Length : 0.400mm
 [15097/JIS2001]
 Ra : 0.2500 μm
 Rz : 1.0000 μm
 Rp : 0.9000 μm
 Rv : 0.7000 μm
 Rq : 0.7000 μm
 RSm : 0.2000mm

Surfscorder SE1700 α
 DATE : Aug 29, 2003
 TIME : 18:38:18
 M speed : 0.050mm/s
 Standards : ISO97/JIS2001
 Cut off : λc=0.080mm
 Length : 0.400mm
 [15097/JIS2001]
 Ra : 0.1069 μm
 Rz : 0.5340 μm
 Rp : 0.1700 μm
 Rv : 0.3000 μm
 Rq : 0.7400 μm
 RSm : 0.0258mm

Surfscorder SE1700 α
 DATE : Aug 29, 2003
 TIME : 18:37:01
 M speed : 0.050mm/s
 Standards : ISO97/JIS2001
 Cut off : λc=0.080mm
 Length : 0.320mm
 [15097/JIS2001]
 Ra : 0.2294 μm
 Rz : 1.3100 μm
 Rp : 0.4350 μm
 Rv : 0.8750 μm
 Rq : 1.7500 μm
 RSm : 0.0125mm





RELATÓRIO DE EXAMES FÍSICO-QUÍMICOS 309 - 132
 Código Tribolab... 002282.000004.000001
 Máquina..... MESTRADO M. ATILIO - BANCO DE TESTE
 Ponto de coleta.. MANCAL DE ROLAMENTO - CUBA
 Data do exame: 25/09/2003
 Lubrificante..... NEUTRO LEVE ISO-32
 Recomend-se..... VIDE COMENTÁRIOS ABAIXO
 NEUTRO LEVE - NOVO

00/00 0 TAN & TBN (mgKOH/g)	00/00 0 Viscosidade (cSt @ 40 C)
------------------------------------	--

RESULTADOS DE ENSAIOS

Viscosidade a 40 °C (cSt).....
 Viscosidade a 100 °C (cSt).....
 Índice de Viscosidade (IV).....
 Índice de acidez - TAN (mgKOH/g).....
 Índice de basicidade - TBN (mgKOH/g).....
 Teor de água
 Insolúveis em pentano (%).....
 Contagem de partículas.....
 Densidade (g / cm³).....
 Espec.19 elem.
 Vide abaixo

Outros ensaios..... (vide abaixo)

As conclusões/recomendações referem-se exclusivamente à amostra e às informações prestadas pelo cliente.
 * O cliente informa: NEUTRO LEVE - NOVO

Resultados espectrométricos: Fe= 0ppm, Cr= 0ppm, Pb= 1ppm, Cu= 0ppm, Sn= 0ppm, Al= 0ppm, Ni= 0ppm, Ag= 0ppm, Si= 0ppm, B= 0ppm, Na= 0ppm, Mg= 0ppm, Ca= 0ppm, Ba= 0ppm, P= 0ppm, Zn= 0ppm, Mo= 0ppm, Ti= 0ppm, V= 0ppm.

Nota: os resultados espectrométricos são arredondados para o próximo inteiro (Ex.: 0,2 -> 0), conforme norma.

Eng. Tarcísio D'Aquino Baroni
 Lab. da National Triboloy Services - USA p/a TRIBOLAB



RELATÓRIO DE EXAMES FÍSICO-QUÍMICOS 309 - 134

Código Tribolab... 002282.000004.000001

Máquina..... MESTRADO M. ATILIO - BANCO DE TESTE

Ponto de coleta.. MANCAL DE ROLAMENTO - CUBA

ÓLEO DE RUNNING INN

Lubrificante..... NEUTRO LEVE ISO-32

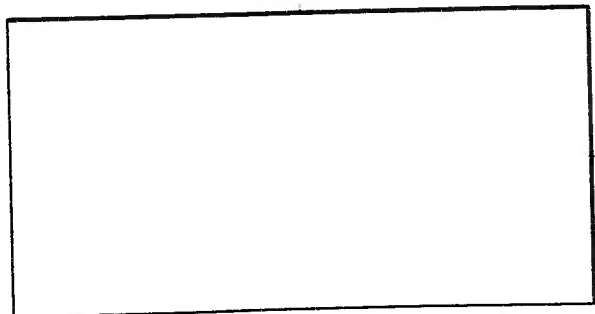
Recomenda-se..... VIDE COMENTÁRIOS ABAIXO

Data da coleta: 11/08/2003

2° coleta do dia neste ponto

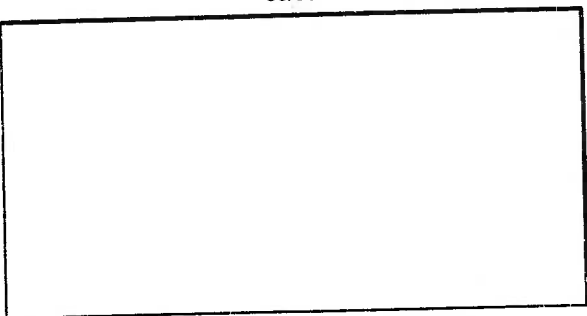
Data do exame: 25/09/2003

Viscosidade (cSt @ 40 C)



00/00

TAN & TBN (mgKOH/g)



00/00

RESULTADOS DE ENSAIOS

Viscosidade a 40 °C (cSt).....

Viscosidade a 100 °C (cSt).....

Índice de Viscosidade (IV).....

Índice de acidez - TAN (mgKOH/g).....

Índice de basicidade - TBN (mgKOH/g).....

Teor de água

Insolúveis em pentano (%).....

Contagem de partículas.....

Densidade (g / cm³).....

Espec.19 elem.

Vide abaixo

Outros ensaios..... (vide abaixo)

As conclusões/recomendações referem-se exclusivamente à amostra e às informações prestadas pelo cliente.
* O cliente informa: ÓLEO DE RUNNING INN

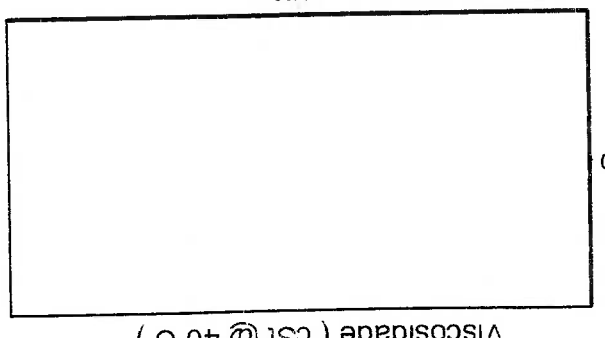
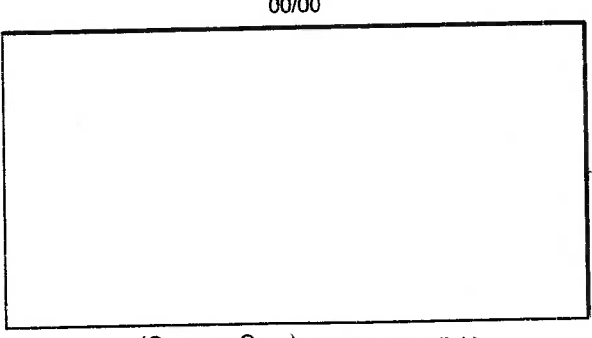
Resultados espectrométricos: Fe= 0ppm, Cr= 0ppm, Pb= 0ppm, Cu= 0ppm, Sn= 0ppm, Al= 0ppm, Ni= 0ppm, Ag= 0ppm, Si= 0ppm, B= 0ppm, Na= 0ppm, Mg= 0ppm, Ca= 0ppm, Ba= 0ppm, P= 0ppm, Zn= 0ppm, Mo= 0ppm, Ti= 0ppm, V= 0ppm. Nota: os resultados espectrométricos são arredondados para o próximo inteiro (Ex.: 0,2 -> 0), conforme norma.

Eng. Tarcísio D'Aquino Baroni

Lab. da National Triboloy Services - USA p/a a TRIBOLAB



RELATÓRIO DE EXAMES FÍSICO-QUÍMICOS 309 - 133
 Código Tribolab... 002282.000004.000001
 Máquina..... MESTRADO M. ATILIO - BANCO DE TESTE
 Ponto de coleta.. MANCAL DE ROLAMENTO - CUBA
 Data da coleta: 11/08/2003
 Data do exame: 25/09/2003
 Amostra sq
 Lubrificante..... NEUTRO LEVE ISO-32
 Recomenda-se.... VIDE COMENTÁRIOS ABAIXO



RESULTADOS DE ENSAIOS

- Viscosidade a 40 °C (cSt).....
- Viscosidade a 100 °C (cSt).....
- Índice de Viscosidade (IV).....
- Índice de acidez - TAN (mgKOH/g).....
- Índice de basicidade - TBN (mgKOH/g).....
- Teor de água
- Insolúveis em pentano (%).....
- Contagem de partículas.....
- Densidade (g / cm³).....
- Espec. 19 elem.

Vide abaixo

Outros ensaios..... (vide abaixo)

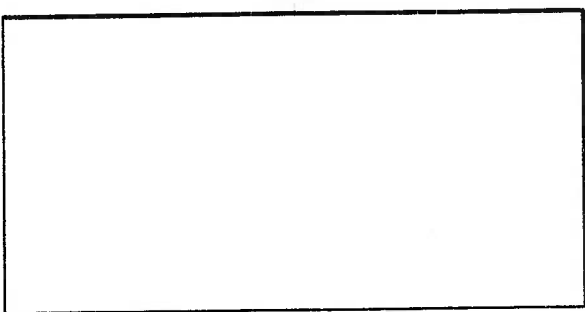
* O cliente informa: Amostra sq. Contaminantes: Nenhum.

Resultados espectrométricos: Fe= 0ppm, Cr= 0ppm, Pb= 0ppm, Cu= 0ppm, Sn= 0ppm, Al= 0ppm, Ni= 0ppm, Ag= 0ppm, Si= 0ppm, B= 0ppm, Na= 0ppm, Mg= 0ppm, Ca= 0ppm, Ba= 0ppm, P= 0ppm, Zn= 1ppm, Mo= 0ppm, Ti= 0ppm, V= 0ppm.

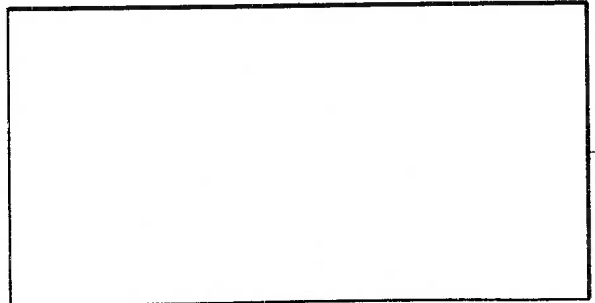
Nota: os resultados espectrométricos são arredondados para o próximo inteiro (Ex.: 0,2 -> 0), conforme norma.



RELATÓRIO DE EXAMES FÍSICO-QUÍMICOS 309 - 135
 Código Tribolab... 002282.000004.000001
 Máquina..... MESTRADO M. ATILIO - BANCO DE TESTE
 Ponto de coleta.. MANCAL DE ROLAMENTO - CUBA
 Data da coleta: 11/08/2003
 3º coleta do dia neste ponto
 Data do exame: 25/09/2003
 Amostra 2c
 Lubrificante..... NEUTRO LEVE ISO-32
 Recomenda-se..... VIDE COMENTÁRIOS ABAIXO



TAN & TBN (mgKOH/g)



Viscosidade (cSt @ 40 C)

RESULTADOS DE ENSAIOS

Viscosidade a 40 °C (cSt).....

Viscosidade a 100 °C (cSt).....

Índice de Viscosidade (IV).....

Índice de acidez - TAN (mgKOH/g).....

Índice de basicidade - TBN (mgKOH/g).....

Teor de água

Insolúveis em pentano (%).....

Contagem de partículas.....

Densidade (g / cm³).....

Espec.19 elem.

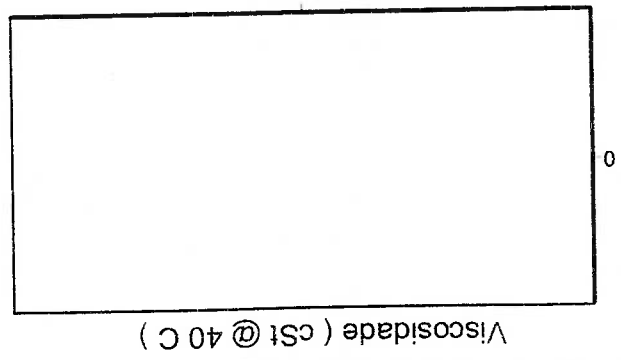
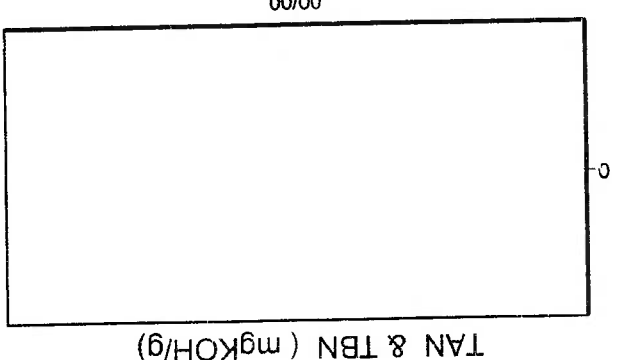
Vide abaixo

Outros ensaios..... (vide abaixo)

* O cliente informa: Amostra 2c. Contaminantes: Quartzo 20 - Q1. Concentração Adicionada: 0,10 g / l.
 Resultados espectrométricos: Fe= 1ppm, Cr= 0ppm, Pb= 0ppm, Cu= 0ppm, Sn= 1ppm, Al= 0ppm,
 Ni= 0ppm, Ag= 0ppm, Si= 2ppm, B= 0ppm, Na= 0ppm, Mg= 0ppm, Ca= 0ppm, Ba= 0ppm, P= 0ppm,
 Zn= 1ppm, Mo= 0ppm, Ti= 0ppm, V= 1ppm.
 Nota: os resultados espectrométricos são arredondados para o próximo inteiro (Ex.: 0,2 -> 0), conforme norma.



RELATÓRIO DE EXAMES FÍSICO-QUÍMICOS 309 - 136
 Código Tribolab... 002282.000004.000001
 Máquina..... MESTRADO M. ATILIO - BANCO DE TESTE
 Ponto de coleta.. MANCAL DE ROLAMENTO - CUBA
 Data da coleta: 11/08/2003
 4ª coleta do dia neste ponto
 Data do exame: 25/09/2003
 Amostra 2d
 Lubrificante..... NEUTRO LEVE ISO-32
 Recomenda-se.... VIDE COMENTÁRIOS ABAIXO



RESULTADOS DE ENSAIOS

- Viscosidade a 40 °C (cSt).....
- Viscosidade a 100 °C (cSt).....
- Índice de Viscosidade (IV).....
- Índice de acidez - TAN (mgKOH/g).....
- Índice de basicidade - TBN (mgKOH/g).....
- Teor de água
- Insolúveis em pentano (%).....
- Contagem de partículas.....
- Densidade (g / cm³).....
- Espec. 19 elem.
- Vide abaixo
- Outros ensaios..... (vide abaixo)

* O cliente informa: Amostra 2d. Contaminantes: Quartzo 20 - 0µ. Concentração Adicionada: 1 g / l.
 Resultados espectrométricos: Fe= 2ppm, Cr= 0ppm, Pb= 1ppm, Cu= 0ppm, Sn= 1ppm, Al= 0ppm, Ni= 0ppm, Ag= 0ppm, Si= 5ppm, B= 0ppm, Na= 0ppm, Mg= 0ppm, Ca= 0ppm, Ba= 0ppm, P= 0ppm, Zn= 1ppm, Mo= 0ppm, Ti= 0ppm, V= 0ppm.
 Nota: os resultados espectrométricos são arredondados para o próximo inteiro (Ex.: 0,2 -> 0), conforme norma.



RELATÓRIO DE EXAMES FÍSICO-QUÍMICOS 309 - 137

Código Tribolab... 002282.000004.000001

Máquina..... MESTRADO M. ATILIO - BANCO DE TESTE

Ponto de coleta.. MANCAL DE ROLAMENTO - CUBA

Lubrificante..... NEUTRO LEVE ISO-32

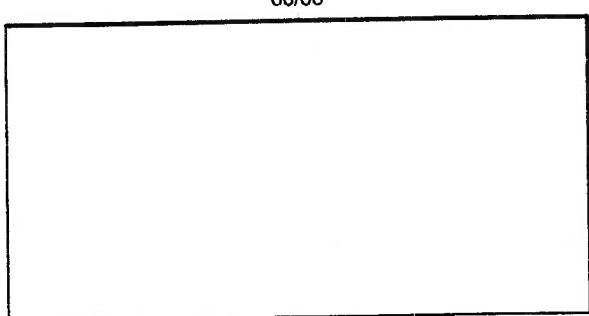
Recomenda-se.... VIDE COMENTÁRIOS ABAIXO

Amostra 2f

Data da coleta: 11/08/2003

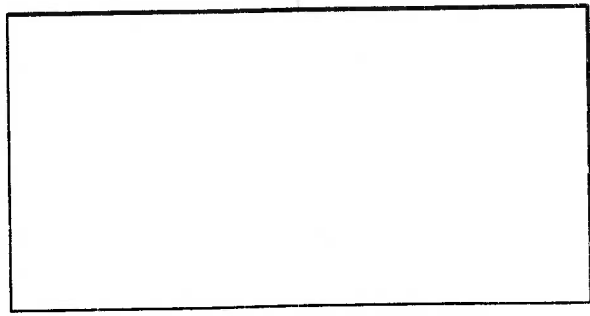
5° coleta do dia neste ponto

Data do exame: 25/09/2003



TAN & TBN (mgKOH/g)

00/00



Viscosidade (cSt @ 40 C)

00/00

RESULTADOS DE ENSAIOS

- Viscosidade a 40 °C (cSt).....
- Viscosidade a 100 °C (cSt).....
- Índice de Viscosidade (IV).....
- Índice de acidez - TAN (mgKOH/g).....
- Índice de basicidade - TBN (mgKOH/g).....
- Teor de água
- Insolúveis em pentano (%).....
- Contagem de partículas.....
- Densidade (g / cm³).....
- Espec.19 elem.

Vide abaixo

Outros ensaios..... (vide abaixo)

As conclusões/recomendações referem-se exclusivamente à amostra e às informações prestadas pelo cliente.

* O cliente informa: Amostra 2f. Contaminantes: Quartzo 20 - 0µ. Concentração Adicionada: 5 g / l.

Resultados espectrométricos: Fe= 12ppm, Cr= 0ppm, Pb= 1ppm, Cu= 0ppm, Sn= 0ppm, Al= 2ppm, Ni= 0ppm, Ag= 0ppm, Si= 64ppm, B= 0ppm, Na= 0ppm, Mg= 0ppm, Ca= 0ppm, Ba= 0ppm, P= 0ppm, Zn= 1ppm, Mo= 0ppm, Ti= 0ppm, V= 0ppm.

Nota: os resultados espectrométricos são arredondados para o próximo inteiro (Ex.: 0,2 -> 0), conforme norma.

Eng. Tarcísio D'Aquino Baroni

Lab. da National Triboloy Services - USA p/a a TRIBOLAB



INDEFINIDA

RELATÓRIO DE EXAME FERROGRÁFICO 309 - 138

Data da coleta: 11/08/2003

Código Tribolab... 002282.000004.000001

Máquina..... MESTRADO M. ATILIO - BANCO DE TESTE

6ª coleta do dia neste ponto

Ponto de coleta.. MANCAL DE ROLAMENTO - CUBA

Data do exame: 25/09/2003

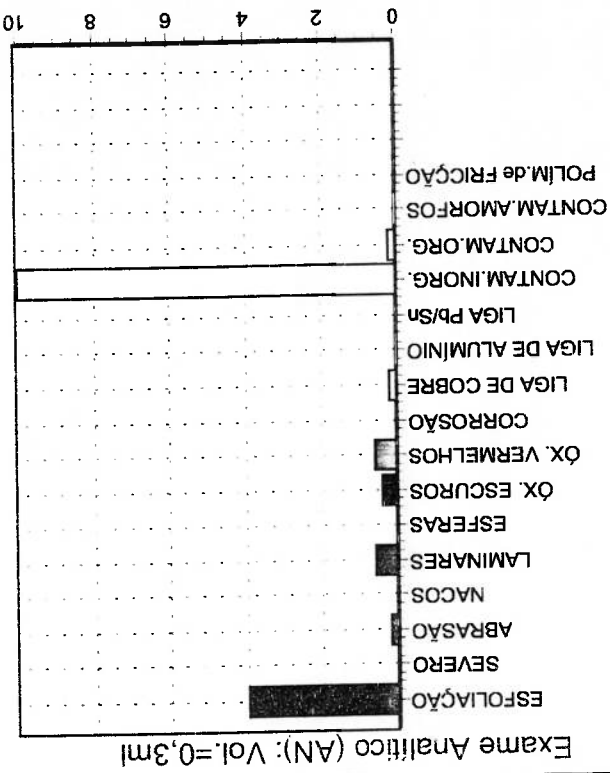
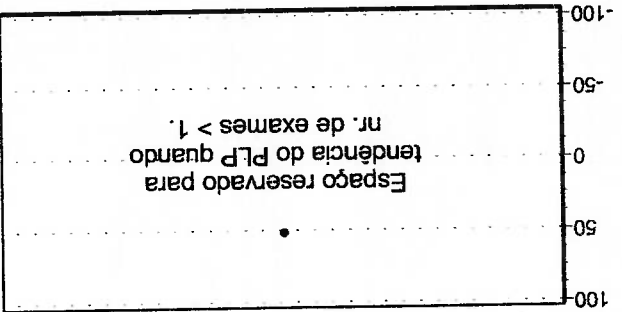
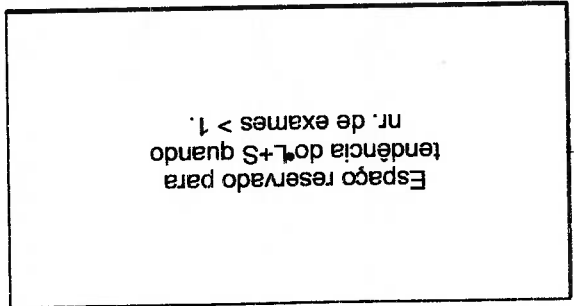
CONCLUSÕES: Ref.: Amostra 2g Lub: NEUTRO LEVE ISO-32 [Normal] [Aceitável] [Alerta] [Crítica]

Há sinais claros de desgaste do rolamento com pequeno rompimento de filme lubrificante.

Resultados ferrográficos em unidades próprias da técnica, não passíveis de conversão direta por técnicas tradicionais. L = partículas maiores que 5µm, S = partículas menores que 5µm.

L = 239,5 S = 79 L+S = 318,5 PLP = 50,4 Visc. não foi medida. Teste de água =

Exame Quantitativo (DR) : L+S



INFORMAÇÕES ENVIADAS PELO CLIENTE / OBSERVAÇÕES REALIZADAS NO EXAME:

As conclusões/recomendações referem-se exclusivamente à amostra e às informações prestadas pelo cliente. * O cliente informa: Amostra 2g. Contaminantes: Quartzo 20 - 0µm. Concentração Adicionada: 10 g / l.

Resultados espectrométricos: Fe= 23ppm, Cr= 0ppm, Pb= 0ppm, Cu= 1ppm, Sn= 0ppm, Al= 5ppm, Ni= 0ppm, Ag= 0ppm, Si= 128ppm, B= 1ppm, Na= 1ppm, Mg= 1ppm, Ca= 1ppm, Ba= 0ppm, P= 0ppm, Zn= 0ppm, Mo= 0ppm, Ti= 0ppm, V= 0ppm. Valores arredondados para o próximo inteiro (ASTM-D6595-00). O ensaio ferrográfico quantitativo foi utilizado para dimensionamento do corpo de prova da ferrografia analítica. Pela ferrografia analítica foi possível identificar significativa presença de partículas ferrosas geradas por esfoliação com dimensão média de 6µm, pequenos sinais de pitting incipiente (partículas laminares de até 30µm), sinais de rompimento de filme (óxidos de ferro) e abrasão causada pela grande quantidade de contaminantes. Os cristais de quartzo apresentaram-se com dimensão média de 20µm.

Laboratório ferrográfico da Tribolab - SP

Eng. Tarcísio D'Aquino Baroni



RELATÓRIO DE EXAMES FÍSICO-QUÍMICOS 309 - 139

Código Tribolab... 002282.000004.000001

Máquina..... MESTRADO M. ATILIO - BANCO DE TESTE

Data da coleta: 11/08/2003

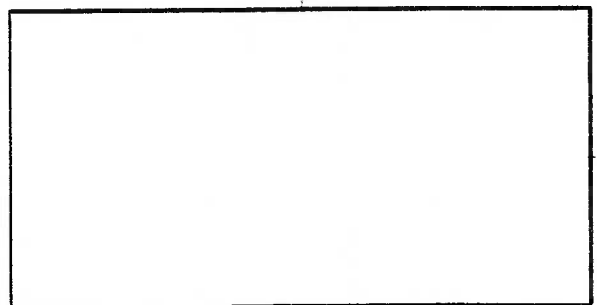
Ponto de coleta.. MANCAL DE ROLAMENTO - CUBA

Lubrificante..... NEUTRO LEVE ISO-32

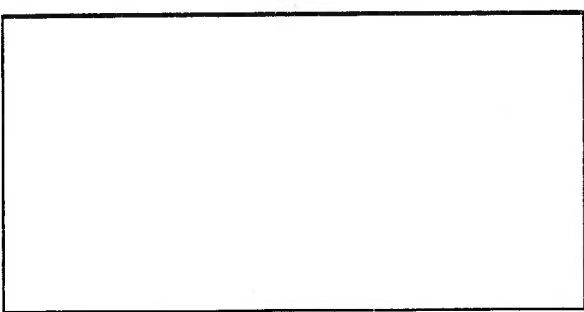
Amostra 7c

Recomenda-se.... VIDE COMENTÁRIOS ABAIXO

Viscosidade (cSt @ 40 C)



TAN & TBN (mgKOH/g)



RESULTADOS DE ENSAIOS

Viscosidade a 40 °C (cSt).....

Viscosidade a 100 °C (cSt).....

Índice de Viscosidade (IV).....

Índice de acidez - TAN (mgKOH/g).....

Índice de basicidade - TBN (mgKOH/g).....

Teor de água

Insolúveis em pentano (%).....

Contagem de partículas.....

Densidade (g / cm³).....

Espec.19 elem.

Vide abaixo

Outros ensaios..... (vide abaixo)

As conclusões/recomendações referem-se exclusivamente à amostra e às informações prestadas pelo cliente. * O cliente informa: Amostra 7c. Contaminantes: Quartzo 74 a 53µ. Concentração Adicionada: 0,10 g / l.

Resultados espectrométricos:F=5ppm, Cr=0ppm, Pb=1ppm, Cu=0ppm, Sn=1ppm, Al=0ppm, Ni=0ppm, Ag=0ppm, Si=10ppm, B=0ppm, Na=0ppm, Mg=0ppm, Ca=0ppm, Ba=0ppm, P=0ppm, Zn=0ppm, Mo=0ppm, Ti=0ppm, V=0ppm.

Nota: os resultados espectrométricos são arredondados para o próximo inteiro (Ex.: 0,2 -> 0), conforme norma.

Eng. Tarcísio D'Aquino Baroni

Lab. da National Tribology Services - USA p/a a TRIBOLAB



RELATÓRIO DE EXAMES FÍSICO-QUÍMICOS 309 - 140

Código Tribolab... 002282.000004.000001

Máquina..... MESTRADO M. ATILIO - BANCO DE TESTE

Ponto de coleta.. MANCAL DE ROLAMENTO - CUBA

Lubrificante..... NEUTRO LEVE ISO-32

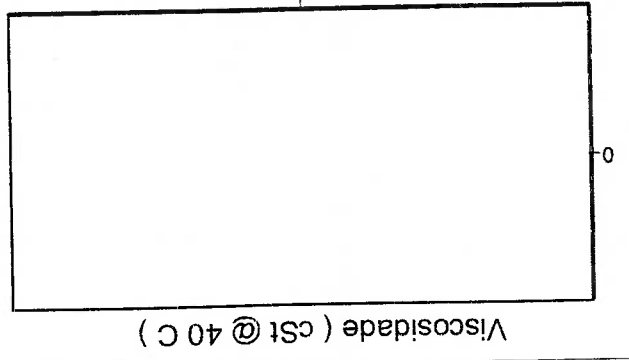
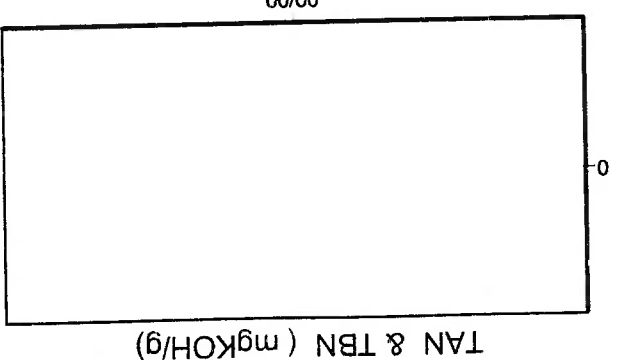
Recomenda-se.... VIDE COMENTÁRIOS ABAIXO

Amostra 7d

Data da coleta: 11/08/2003

8ª coleta do dia neste ponto

Data do exame: 25/09/2003



RESULTADOS DE ENSAIOS

- Viscosidade a 40 °C (cSt).....
- Viscosidade a 100 °C (cSt).....
- Índice de Viscosidade (IV).....
- Índice de acidez - TAN (mgKOH/g).....
- Índice de basicidade - TBN (mgKOH/g).....
- Teor de água
- Insolúveis em pentano (%).....
- Contagem de partículas.....
- Densidade (g / cm³).....
- Espec. 19 elem.
- Vide abaixo
- Outros ensaios..... (vide abaixo)

As conclusões/recomendações referem-se exclusivamente à amostra e às informações prestadas pelo cliente.

* O cliente informa: Amostra 7d. Contaminantes: Quartzo 74 a 53µ. Concentração Adicionada: 1 g / l.

Resultados espectrométricos: Fe= 9ppm, Cr= 0ppm, Pb= 1ppm, Cu= 0ppm, Sn= 0ppm, Al= 0ppm, Ni= 0ppm, Ag= 0ppm, Si= 11 ppm, B= 0ppm, Na= 0ppm, Mg= 0ppm, Ca= 0ppm, Ba= 0ppm, P= 0ppm, Zn= 0ppm, Mo= 0ppm, Ti= 0ppm, V= 0ppm.

Nota: os resultados espectrométricos são arredondados para o próximo inteiro (Ex.: 0,2 -> 0), conforme norma.

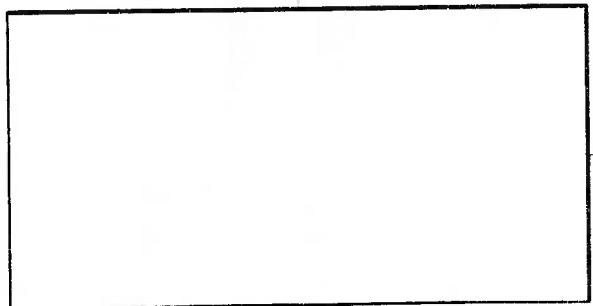


RELATÓRIO DE EXAMES FÍSICO-QUÍMICOS 309 - 141

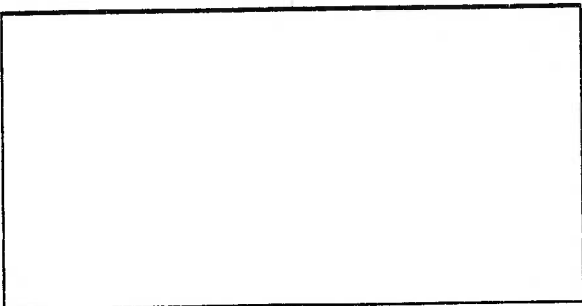
Código Tribolab... 002282.000004.000001
 Máquina..... MESTRADO M. ATILIO - BANCO DE TESTE
 Ponto de coleta... MANCAL DE ROLAMENTO - CUBA
 Data da coleta: 11/08/2003
 9ª coleta do dia neste ponto
 Data do exame: 25/09/2003
 Amostra 7f
 Lubrificante..... NEUTRO LEVE ISO-32
 Recomenda-se.... VIDE COMENTÁRIOS ABAIXO

Viscosidade (cSt @ 40 C)

TAN & TBN (mgKOH/g)



00/00



00/00

RESULTADOS DE ENSAIOS

Viscosidade a 40 °C (cSt).....

Viscosidade a 100 °C (cSt).....

Índice de Viscosidade (IV).....

Índice de acidez - TAN (mgKOH/g).....

Índice de basicidade - TBN (mgKOH/g).....

Teor de água

Insolúveis em pentano (%).....

Contagem de partículas.....

Densidade (g / cm³).....

Espec.19 elem.

Vide abaixo

Outros ensaios..... (Vide abaixo)

As conclusões/recomendações referem-se exclusivamente à amostra e às informações prestadas pelo cliente.
 * O cliente informa: Amostra 7f. Contaminantes: Quartzo 74 a 53µ. Concentração Adicionada: 5 g / l.
 Resultados espectrométricos: Fe= 30ppm, Cr= 0ppm, Pb= 0ppm, Cu= 0ppm, Sn= 0ppm, Al= 0ppm,
 Ni= 0ppm, Ag= 0ppm, Si= 29ppm, B= 0ppm, Na= 0ppm, Mg= 0ppm, Ca= 0ppm, Ba= 0ppm, F= 0ppm,
 Zn= 1ppm, Mo= 0ppm, Ti= 0ppm, V= 0ppm.
 Nota: os resultados espectrométricos são arredondados para o próximo inteiro (Ex.: 0,2 -> 0), conforme norma.



RELATÓRIO DE EXAME FERROGRÁFICO 309 - 142

Código Tribolab... 002282.000004.000001

Máquina..... MESTRADO M. ATILIO - BANCO DE TESTE

Ponto de coleta.. MANCAL DE ROLAMENTO - CUBA

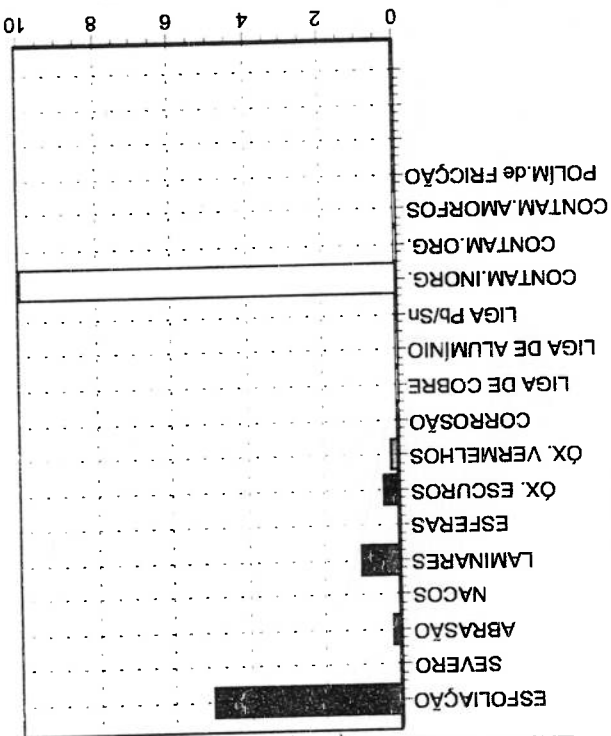
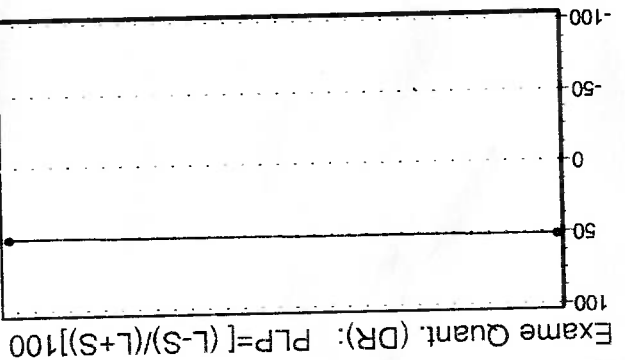
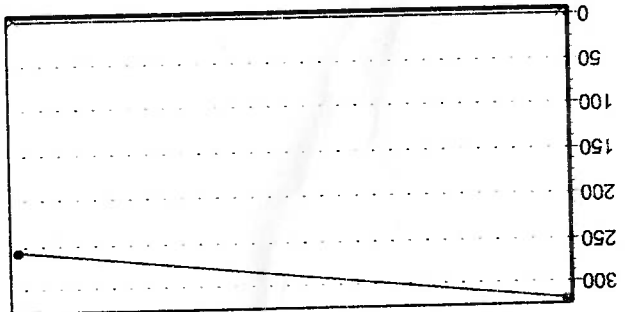
CONCLUSÕES: Ref.:Amostra 7g Lub:NEUTRO LEVE ISO-32

Os resultados são semelhantes aos obtidos na amostra 2g, porém com maior incidência de partículas. É razoável supor que inspeção dos componentes do rolamento indiquem presença muito pequena de pitting, ainda não comprometedora. Não tendo sido encontrados sinais de falha iminente, numa máquina industrial comum, a recomendação seria limpar o compartimento para proteção dos componentes e prosseguir com o monitoramento. Resultados ferrográficos em unidades próprias da técnica, não passíveis de conversão direta por técnicas tradicionais. L = partículas maiores que 5µm, S = partículas menores que 5µm.

L = 192 S = 65 L+S = 257 PLP = 49,4 Visc. não foi medida. Teste de água =

Exame Analítico (AN): Vol.=0,3ml

Exame Quantitativo (DR) : L+S



INFORMAÇÕES ENVIADAS PELO CLIENTE / OBSERVAÇÕES REALIZADAS NO EXAME:

As conclusões/recomendações referem-se exclusivamente à amostra e às informações prestadas pelo cliente. * O cliente informa: Amostra 7g. Contaminantes: Quartzo 74 a 53µm. Concentração Adicionada: 10 g / l.

Resultados espectrométricos: Fe= 53ppm, C= 1ppm, Pb= 0ppm, Cu= 0ppm, Sn= 0ppm, Al= 1ppm, Ni= 0ppm, Ag= 0ppm, Si= 55ppm, B= 0ppm, Na= 0ppm, Mg= 0ppm, Ca= 0ppm, Ba= 0ppm, P= 0ppm, Zn= 0ppm, Mo= 0ppm, Ti= 0ppm, V= 0ppm. Valores arredondados para o próximo inteiro (ASTM-D6595-00). O ensaio ferrográfico quantitativo foi utilizado para dimensionamento do corpo de prova da ferrografia analítica. A ferrografia analítica revelou praticamente o mesmo tipo de partículas encontrado na amostra 2G. Observaram-se maior presença de estolição (tamanho médio de 6µm) e ligeiramente maior presença de partículas laminares de pitting incidente (> 20µm). Os mesmos pequenos sinais de rompimento de filme foi acusado pela presença de óxidos de ferro. Os cristais de quartzo mostraram-se com dimensão média de 25µm, sugerindo continuidade.

Laboratório ferrográfico da Tribolab - SP

Eng. Tarcísio D'Aquino Baroni