

Def
Zakul Malashe

PEDRO CAETANO UTIDA NEVES

Nota final
7,9 (sete e nove)
HAM

AUTOMATIZAÇÃO DE UMA MÁQUINA DE ENSAIO DE FADIGA DE CONTATO

Trabalho de Conclusão do Curso de
Engenharia Mecatrônica apresentado à
Escola Politécnica da Universidade de
São Paulo.

São Paulo
2007

*Des
izabel machado*

PEDRO CAETANO UTIDA NEVES

AUTOMATIZAÇÃO DE UMA MÁQUINA DE ENSAIO DE FADIGA DE CONTATO

Trabalho de Conclusão do Curso de
Engenharia Mecatrônica apresentado à
Escola Politécnica da Universidade de
São Paulo.

Área de Concentração:
Engenharia Mecatrônica e Mecânica.

Orientadora:
Profa. Dra. Izabel Fernanda Machado.

São Paulo
2007

DEDICATÓRIA

*À “mãe”, Aparecida Kazuko Utida Neves,
por seu completo amor, doação e por me alfabetizar;
Ao “pai”, Roberto Caetano Neves, que queria tanto ter visto isto,
e por me mostrar que os ideais são tudo o que importa.*

AGRADECIMENTOS

O autor agradece:

- À minha mãe, por ser tudo para mim;
- Ao meu pai, pelo sangue, suor e as lágrimas;
- Aos meus tios Wany, Sérgio, Luiza, que tomaram conta das coisas em Andradina; deixando-me menos preocupado para trabalhar em São Paulo;
- Aos meus primos Wilber, Wellington, Willian, Grazieli, Priscila e Kauan, que sempre me motivaram ser melhor;
- Aos meus quatro avós, que, absolutamente sem nenhuma educação, conseguiram felizmente transmitir essa necessidade aos meus pais;
- À família que me adotou por mais de seis anos em São Paulo: Ivan, Erô, Thiego e Gabriel;
- Aos Profs. Roberto Martins de Souza e Amilton Sinatora; por terem me acolhido no Laboratório de Fenômenos de Superfície; o primeiro com sua sabedoria, o segundo com sua louca forma de pensar;
- À minha orientadora, Professora Izabel Fernanda Machado, sempre bem-humorada, disposta ao trabalho e por acreditar após várias falhas minhas;
- À Banca do Trabalho de Conclusão de Curso, Profs. Lucas Antonio Moscato e Edson Gomes, pela paciência e compreensão;
- À Escola Politécnica pela formação profissional gratuita;
- Ao Grupo de Pesquisadores do LFS, pessoas formidáveis, com caráter e dedicação, engajadas na pesquisa técnico-científica nacional, churrascos, aniversários e esportes;
- Ao na época doutorando Julio Cesar Klein das Neves; por me parecer sempre um exemplo a ser seguido: pelo seu doutorado, pela sua educação, inteligência fora do comum, amizade e pelas inúmeras conversas sobre absolutamente qualquer assunto;
- Aos amigos de Andradina: Rafael, Eder, Douglas e Paulinho; por serem, em qualquer situação, mais que irmãos;

- Aos amigos de São Paulo: Eleir, Raphael Heideier, João Vitor e Guilherme; por tornarem tudo mais fácil;
- Aos companheiros do LFS: Felipe, Jovânio, Leandro, Alexandre, Mário e Marco Aurélio; pelo ótimo ambiente de trabalho;
- Aos funcionários da Lynx Tecnologia Eletrônica: Lauro, André, Renato, Willian e Luis; pela ajuda com a configuração das portas de entrada do módulo de aquisição e a programação;
- Agradece também ao Laboratório de Dinâmica LADIN, especialmente à Pesquisadora Márcia Marie Maru; pelo empréstimo do equipamento utilizado em um pré-teste na captação de sinais e pelo acompanhamento pessoal durante o ensaio;
- Agradece aos doutorandos John Ferney Alvarez Rosário e Ediguer Enrique Franco; pela significativa contribuição ao desenvolver e montar a caixa de comando;
- A todos que de alguma forma colaboraram e não foram citados; peço envergonhado, desculpas; e gentilmente agradeço;
- A todos os brasileiros; que com seus impostos pagos, tornam possível o ensino gratuito nesta Escola;

RESUMO

Este Trabalho de Conclusão de Curso da Escola Politécnica teve como objetivo a automatização de uma máquina de ensaio de fadiga de contato. Para essa automatização, foi utilizado o nível de vibração em um rolamento axial, sendo avaliada a condição de desgaste na superfície do corpo-de-prova. O nível de vibração foi medido com um acelerômetro piezoelétrico Kistler 8702B50M1 com sensibilidade de $101,3 \text{ mV/ms}^{-2}$. Foi também automatizado o controle de temperatura do lubrificante, utilizando um sensor de temperatura Pt 100 para leitura do sinal. Os sinais dos sensores foram lidos com um módulo de aquisição ADS 2000 da Lynx Tecnologia, utilizando-se um programa desenvolvido em Microsoft Visual Basic 6.0, ao qual foi dado o nome de Programa de Monitoramento do Ensaio de Fadiga de Contato. Os corpos-de-prova, em formato de arruela, foram usinados em aço 52100 de dureza aproximada de 62 HRC, com diâmetro interno de 32,05 mm, diâmetro externo de 52,05 mm e altura de 5,20 mm. Foram utilizados corpos-de-prova em diferentes condições, para a verificação da aquisição de sinais: um isento de defeitos superficiais e outro contendo defeitos (lascamento). No corpo-de-prova sem defeito localizado, o nível RMS ficou em $0,15 \text{ m/s}^2$, enquanto no corpo-de-prova com lascamento, conhecido como *spalling*, o nível RMS foi de $0,48 \text{ m/s}^2$, concluindo-se que o método pode ser usado, então, para identificar falhas. Outro ponto importante no desenvolvimento feito foi a automatização do sistema de desligamento do equipamento. Isso foi testado e verificado que, quando da ocorrência do defeito, o desligamento ocorre. Com isso, a automatização proposta foi realizada e tanto a aquisição de sinais quanto o desligamento do equipamento foram alcançados.

ABSTRACT

This work aimed the automatization of a contact fatigue test machine. The automatization was carried out by analyzing the vibration level in an axial ball-bearing, which was caused by the wear of the surface of specimens. The vibration level was measured by using a piezoelectric accelerometer Kistler 8702B50M1 with sensibility of $101,3 \text{ mV/ms}^{-2}$. The control of the temperature of the lubricant was also automatized by using a Pt 100 temperature sensor. The sensor signals were acquired by using an ADS200 Acquisition Model by Lynx Technologies using a program developed in Microsoft Visual Basic 6.0. The latter was called "Contact Fatigue Test Monitoring Program". The specimens, presented in washers-shape, were manufactured with AISI 52100 steel with the hardness of approximately 62 HRC; an internal diameter of 32.05 mm; an external diameter of 52.05 mm and a height of 5.20 mm. The specimens were tested under different conditions to verify the signal acquisition. These conditions were: (i) without superficial defects and (ii) with spalling defects. In the specimen without localized defect, the RMS level was 0.15 m/s^{-2} . The specimen with spalling had an RMS level of 0.48 m/s^{-2} . It was thus concluded that the automatization proposed was effective: both the signal acquisition as well as the equipment shutdown, based on the vibration signal, were successful installed.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Contatos conformes (a) e não-conformes (b) (HUTCHINGS, 1992).	15
Figura 2 – Contato elástico entre dois corpos elípticos (STACHOWIAK; BATCHELOR, 2001).	16
Figura 3 - (a) Contato normal entre a esfera e a superfície plana. (b) Vista do plano da área de contato circular em coordenadas cilíndricas (ADAPTADA de Suresh, 1998).	18
Figura 4 – Lascamento (<i>spalling</i>) gerado pelo rolamento das esferas contra o plano. Método: MEV, elétrons secundários (NEVES, 2006).	22
Figura 5 – Seção Longitudinal da falha mostrada na figura anterior (NEVES, 2006).	23
Figura 6 – Nível geral de vibração RMS em rolamentos com defeitos. (ADAPTADO de TANDON, 1994).	26
Figura 7 – Corpo-de-Prova.	28
Figura 8 – Esquema em CAD do equipamento. (NEVES, 2006).	29
Figura 9 – Perspectiva do Equipamento. (NEVES, 2006)	29
Figura 10 - Equipamento para ensaio da fadiga de contato.	30
Figura 11 – Foto do Sistema de Aquisição de Dados ADS 2000.	32
Figura 12 – Esquema de um acelerômetro ICP.	33
Figura 13 – Acelerômetro sobre um absorvedor de vibração.	34
Figura 14 – Acelerômetro instalado na tampa da máquina.	34
Figura 15 – Sensor de Temperatura PT 100.	36
Figura 16 – Sistema representado em diagrama de blocos.	38
Figura 17 – Conjunto montado e pronto para ensaio.	39
Figura 18 – Tela do Programa de Monitoramento de Ensaio desenvolvida em VB.	40
Figura 19 – Janela de atualização dos valores limites de cada variável do ensaio.	41
Figura 20 – Caixa de comando para acionamento dos equipamentos.	42
Figura 21 – Sinal de Vibração para calibração do acelerômetro.	43
Figura 22 – Aferição do sensor de temperatura.	44
Figura 23 – Sinal de vibração do ensaio sem lascamento.	45
Figura 24 – Sinal de vibração do ensaio com lascamento.	45
Figura 25 – Lascamento ocorrido durante um ensaio e detectado automaticamente pelo Programa de Monitoramento do Ensaio de Fadiga de Contato.	46

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Algumas definições básicas em problemas de contato (ADAPTADO de SURESH, 1998).....	20
Tabela 2 - Alguns dos principais processos de dano na fadiga de contato. (ADAPTADO de SURESH, 1998).....	21
Tabela 3 – Algumas características do acelerômetro Kistler, modelo 8702B50M1. ...	35

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	12
2. OBJETIVOS.....	14
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	15
3.1 TENSÕES DE CONTATO.....	15
3.2 FADIGA DOS MATERIAIS	19
3.3. MECANISMOS DE DANO POR FADIGA DE CONTATO	21
3.4 ANÁLISE DE SINAIS DE FADIGA DE CONTATO.....	23
4. MATERIAIS, EQUIPAMENTOS E MÉTODOS.....	27
4.1. CORPO-DE-PROVA	27
4.2. MÁQUINA DE ENSAIOS.....	28
4.3. SISTEMA DE AQUISIÇÃO.....	31
4.4. SENSORES	33
4.5 PROGRAMA DE MONITORAMENTO DE ENSAIO.....	36
4.6 CAIXA DE COMANDO	37
4.7 CONJUNTO E PROCEDIMENTO DE ENSAIO	37
5. RESULTADOS.....	40
5.1 PROGRAMA DE MONITORAMENTO DE ENSAIO DE FADIGA DE CONTATO.....	40
5.2 PROJETO DA CAIXA DE COMANDO	42
5.3 CALIBRAÇÃO DOS SENSORES.....	43
5.3 ENSAIOS	44
6. CONCLUSÕES	47

ANEXOS48

ANEXO A – CÓDIGO DO PROGRAMA DE MONITORAMENTO DO
ENSAIO DE FADIGA DE CONTATO48

ANEXO B – ESQUEMA ELETRÔNICO DA CAIXA DE COMANDO58

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS60

1. INTRODUÇÃO

O Ensaio da Fadiga de Contato vem sendo utilizado com frequência em simulações com componentes de aço, para pesquisas sobre a resistência de materiais submetidos às condições do sistema esfera contra plano. Este mercado movimentou, em 2000, quantias estimadas em 20 bilhões de dólares (BESWICK, 2002 apud NEVES, 2006).

Na interação entre corpos em contato elástico não-conforme, um dos modos de falha mais recorrentes é o do lascamento de material devido aos altos esforços aplicados na superfície deste. Este lascamento é conhecido como *spalling* e ocorre devido à fadiga de contato de rolamento puro. (SURESH, 1998)

O lascamento, considerado um tipo de desgaste, é um defeito localizado que reduz a vida útil dos componentes mecânicos, acarretando prejuízos financeiros e até mesmo falhas catastróficas, com acidentes graves; donde decorre a importância de se preservar a integridade das estruturas.

Diversos métodos correlacionam o sinal de vibração da máquina com o estado de desgaste do rolamento, que está associado a ocorrência de lascamento. O monitoramento do lascamento é executado pelos métodos simples de análise de sinais, tanto pelos métodos que trabalham no domínio do tempo quanto no domínio de frequência. Existem outros métodos, como o de emissão acústica, mas este tem o custo elevado e carecem de estudos por serem técnicas recentes, além de exigirem uma instrumentação complexa e uma boa vedação acústica (TANDON, 1999).

A máquina de ensaios de fadiga de contato presente na Escola Politécnica da Universidade de São Paulo não era automatizada, e havia necessidade que os ensaios fossem acompanhados por um pesquisador, que reconhecesse o ruído peculiar de uma falha, desligando, então, a máquina. Além disso, o controle do aquecedor de fluido refrigerante, para manter a temperatura de ensaio constante e manter a viscosidade do lubrificante no patamar ideal, era também manual. Conseqüentemente, o tempo de operação diário da máquina estava limitado ao tempo de trabalho do pesquisador.

Toda a teoria relacionada com a fadiga de contato foi revisada, principalmente sobre a mecânica do fenômeno, enfatizando as tensões Hertzianas induzidas nos corpos e os conseqüentes modos de falha que surgem da fadiga de contato.

Estudaram-se também, as diversas técnicas de análise do sinal de vibração, sendo escolhido o Valor Médio Eficaz (RMS, *Root Mean Square*) como ferramenta de tomada de decisão.

2. OBJETIVOS

Neste contexto, apresenta-se este trabalho, que teve por objetivos:

- Especificar as características de um sistema de aquisição a ser adquirido para instrumentar a máquina;
- Desenvolver uma solução de aquisição de dados para o ensaio de fadiga de contato;
- Correlacionar a ocorrência de defeitos de falhas no rolamento com o sinal de vibração da máquina;
- Controlar a máquina de ensaios para desligamento automático em caso de vibração relacionada à falhas;
- Controlar a temperatura do lubrificante;

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 Tensões de Contato

Tensões de contato são as tensões geradas a partir do contato de dois corpos sólidos. Para o estudo destas tensões necessita-se, portanto, do entendimento dos conceitos de contato conforme e não-conforme. Um contato é dito conforme quando as superfícies de dois corpos se encaixam perfeitamente ou próximas disto, sem haver deformação. Corpos em diferentes contatos são ditos em contato não-conforme. Nesta situação, os corpos se tocam primeiramente em um ponto ou em uma linha. Com o aumento da carga, a área de contato vai crescendo devido às deformações elásticas induzidas nos corpos (JOHNSON, 1985). A Figura 1 apresenta estes dois tipos de contato (HUTCHINGS, 1992).

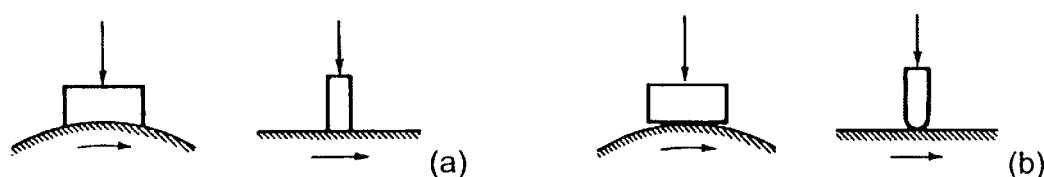


Figura 1 – Contatos conformes (a) e não-conformes (b) (HUTCHINGS, 1992).

A partir deste ponto, será enfatizado o contato não-conforme, em particular o sistema esfera-contra-plano, já que este sistema representa de forma simplificada os rolamentos axiais utilizados nos ensaios sobre fadiga de contato deste trabalho. Pelo mesmo motivo, no tópico seguinte de Fadiga dos Materiais, a fadiga de contato de rolamento será apresentada com maiores detalhes.

A primeira teoria de contato satisfatória para corpos em contato no regime elástico foi publicada por Heinrich Hertz em 1882, no clássico trabalho *"On the contact of elastic solids"*, quando ele tinha apenas vinte e quatro anos de idade. Sua motivação veio de experimentos de interferência óptica de lentes postas em contato. A questão surgiu quando a deformação elástica destas lentes, sob ação de força, influenciava significativamente o padrão das franjas de interferência geradas. Hertz,

que posteriormente foi homenageado com seu nome dado à unidade de medida de frequência, assumiu que as superfícies eram livres de atrito e perfeitamente elásticas (JOHNSON, 1985).

Em seu modelo, Hertz aproximou as superfícies em contato a semi-espaços elásticos, consideração que é quase universal nas teorias de tensões em contatos elásticos, pois isto simplifica as condições de contorno e torna acessível o grande volume da teoria de elasticidade desenvolvida para semi-espaços elásticos (JOHNSON, 1985). Para esta hipótese ser válida, as dimensões das áreas de contato devem ser bem menores que as dimensões dos corpos e, principalmente, que os raios de curvatura das superfícies. Sendo satisfeitas estas condições, o sistema apresenta as seguintes características:

- As tensões são altamente concentradas na região próxima do contato e decaem rapidamente com a distância do ponto de contato;
- As tensões não são significativamente influenciadas pela geometria do corpo, a certa distância da zona de contato.

De onde se conclui então que a região de interesse para o estudo é aquela próxima ao contato. A Figura 2 apresenta um modelo genérico de contato entre superfícies elípticas.

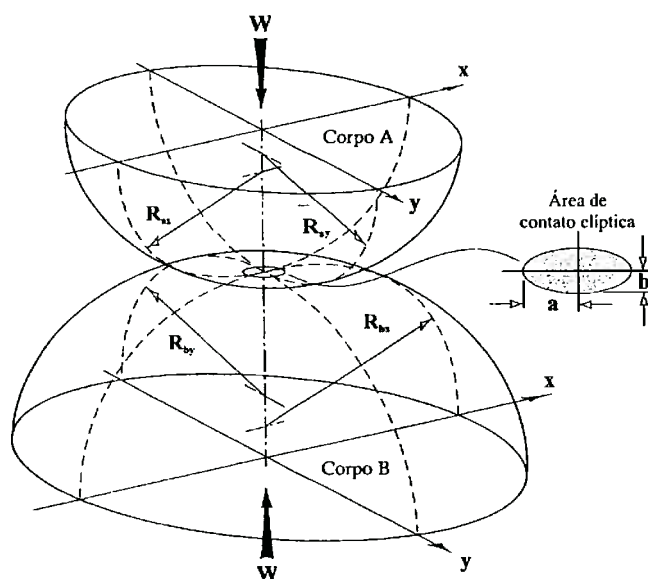


Figura 2 – Contato elástico entre dois corpos elípticos (STACHOWIAK; BATCHELOR, 2001).

Para esta análise de tensões, o primeiro passo é determinar o raio reduzido R' , que é a influência da geometria dos corpos no problema e é baseado nos raios de curvatura dos corpos postos em contato. O raio reduzido R' é dado pela eq.(1), onde R_x é o raio de curvatura reduzido na direção x ; R_y é o raio de curvatura reduzido na direção y ; R_{ax} é o raio de curvatura do corpo A na direção x ; R_{ay} é o raio de curvatura do corpo A na direção y ; R_{bx} é o raio de curvatura do corpo B na direção x ; R_{by} é o raio de curvatura do corpo B na direção y .

Já a influência dos tipos dos materiais que constituem os corpos em contato está representada no cálculo do módulo combinado E^* . A eq.(2) apresenta este módulo combinado, sendo ν_a e ν_b os coeficientes de Poisson dos materiais do corpo A e do corpo B, respectivamente; e E_a e E_b os módulos elásticos dos materiais de A e B, respectivamente (NEVES, 2006).

$$\frac{1}{R'} = \frac{1}{R_x} + \frac{1}{R_y} = \frac{1}{R_{ax}} + \frac{1}{R_{ay}} + \frac{1}{R_{bx}} + \frac{1}{R_{by}} \quad (\text{eq.1})$$

$$\frac{1}{E^*} = \frac{1 - \nu_a^2}{E_a} + \frac{1 - \nu_b^2}{E_b} \quad (\text{eq.2})$$

Apresentado o conceito de contato entre corpos elípticos, Fig. 2, introduz-se uma simplificação para o sistema esfera contra plano. A Figura 3 mostra uma esfera de raio R pressionada contra uma superfície plana por uma força normal P (SURESH, 1998). Sendo satisfeitas as condições anteriormente mencionadas, para a aplicação da teoria de Hertz, decorrem as equações 4, 5, 6 e 7, que possibilitam o cálculo das tensões induzidas no material. Estas equações assumem que os corpos A e B são constituídos de materiais que possuem o mesmo módulo de elasticidade e o mesmo coeficiente de Poisson, ou seja, $E_a = E_b = E$ e $\nu_a = \nu_b = \nu$, já que estas diferenças de propriedades entre aços são desprezíveis. Para o caso particular de esfera pressionada contra um plano, a é o raio da área circular de contato, $p(r)$ é a pressão dentro da área de contato ($0 \leq r \leq a$) e h é a mútua aproximação do centro dos corpos.

$$a = \left\{ \frac{3PR}{2E} (1 - \nu^2) \right\}^{1/3} \quad (\text{eq.4})$$

$$h = \frac{a^2}{R} = \left\{ \frac{9P^2(1 - \nu^2)^2}{4RE^2} \right\}^{1/3} \quad (\text{eq.5})$$

$$p_{\max} = \frac{3}{2} \left(\frac{P}{\pi a^2} \right) \quad (\text{eq.6})$$

$$p(r) = \frac{p_{\max}}{a} \sqrt{a^2 - r^2} = \frac{3p_{\max}}{2a} \sqrt{a^2 - r^2} = \frac{3P}{2\pi a^2} \left(1 - \frac{r^2}{a^2} \right)^{1/2} \quad (\text{eq.7})$$

onde **P** é a carga aplicada, **R** é o raio da esfera, **E** e **v** é o módulo de elasticidade e o coeficiente de Poisson dos materiais, respectivamente, **p_{max}** é a pressão máxima de Hertz e **p_{med}** é a pressão média de contato.

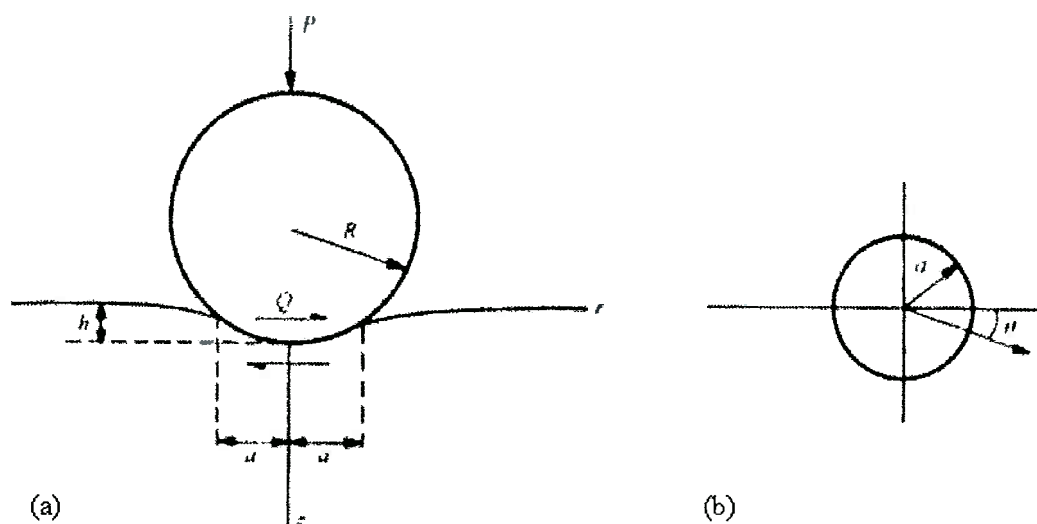


Figura 3 - (a) Contato normal entre a esfera e a superfície plana. (b) Vista do plano da área de contato circular em coordenadas cilíndricas (ADAPTADA de Suresh, 1998).

Decorre da análise destas tensões, que a máxima tensão de cisalhamento, τ_{\max} , é igual a 0,31 da pressão máxima de contato e ocorre na posição central de

contato ($r = 0$), a uma profundidade de $0,48a$, onde a é o raio da área de contato. Ressalta-se a importância deste fato, já que teoricamente esta é a região mais suscetível a uma nucleação de trinca sub-superficial, que será vista a seguir como sendo o modo de falha de fadiga de contato mais comum.

3.2 Fadiga dos Materiais

A palavra fadiga deriva do latim *fatigare* e significa cansar. Associada geralmente ao sentido que indica cansaço físico ou mental em pessoas, também é utilizada em engenharia como dano ou falha dos materiais submetidos a carregamentos cíclicos. Em 1964, a *International Organization for Standardization* descreveu fadiga como sendo as mudanças nas propriedades, que podem ocorrer em materiais metálicos, devido a repetidas aplicações de tensões ou deformações. Embora o termo fadiga seja geralmente utilizado para aquelas mudanças que levam à fraturas ou falhas (SURESH, 1998), sendo também normalmente aceito para materiais não-metálicos.

A fadiga pode ocorrer sob várias formas e sempre está ligada às solicitações térmicas, mecânicas e químicas sob as quais o material ou componente se encontra. De acordo com isso, a fadiga pode ser designada como fadiga mecânica, fadiga de fluência, fadiga termo-mecânica, fadiga em corrosão, fadiga de contato e outras.

A maioria das falhas em maquinários e estruturas é decorrente dos processos de fadiga acima mencionadas, que geralmente podem ocorrer mesmo quando os picos das cargas cíclicas são consideravelmente menores que os limites de segurança estimados em análises estáticas de fraturas (SURESH, 1998). Um exemplo clássico é a série de acidentes envolvendo o na época recém-lançado *Comet*, o primeiro jato comercial, fabricado pela *Havilland Aircraft Company*.¹ A partir deste caso, falhas de fadiga subcrítica passaram a ser mais bem avaliadas e houve um grande desenvolvimento na área.

Deve-se agora esclarecer um aspecto do uso da terminologia no campo de estudo da fadiga. A fadiga dita convencional, ou seja, o processo de fadiga estrutural, está relacionada a tensões distribuídas em grandes volumes de material.

¹. Suresh apresenta detalhes do estudo de caso do Comet na página 8 de seu livro.

Enquanto, o processo de fadiga de contato apresenta grandes esforços concentrados em pequenas áreas. Outra diferença é a localização da trinca inicial. Na fadiga estrutural, a nucleação da falha dá-se na superfície, enquanto na fadiga de contato de rolamento, o processo é iniciado abaixo da superfície (NEVES, 2006). A Tabela 1 mostra os modos mais importantes de fadiga de contato.

Tabela 1 – Algumas definições básicas em problemas de contato (ADAPTADO de SURESH, 1998).

Terminologia	Definição	Exemplo
Contato Conforme	Contato entre superfícies que, sem considerar deformações, têm encaixe perfeito	<i>Journal Bearings</i> e <i>flat slider bearings</i>
Contato não-conforme	Contato entre superfícies que não encaixam perfeitamente	Dentes de engrenagens, rolamentos de esferas e rolos
Contato de Deslizamento (<i>Sliding Contact</i>)	Contato que surge devido a deslocamentos lineares	Derrapagem de uma roda travada de um veículo numa pista, alguns aspectos do contato entre dentes de engrenagem
Esfregão (<i>Fretting</i>)	Degradação das propriedades devido a repetidos escorregamentos entre as superfícies com pequenas amplitudes	Juntas rebitadas, contatos entre os fios de um cabo trançado
Contato de Rolamento Puro	Contato que surge devido ao deslocamento angular relativo entre superfícies sobre um eixo localizado no plano tangente comum	Rodas de trem, Cilindros de Laminação
Contato de Rolamento Trativo	Rolamento acompanhado de trações tangenciais entre superfícies de contato	Contato acima e abaixo da linha de <i>pitch</i> de engrenagens
Giração (<i>Spin</i>)	Contato que surge devido a um deslocamento angular relativo entre superfícies sobre o eixo comum normal ao plano tangente	Movimento rotacional induzido numa roda durante uma curva

Dentre os componentes mecânicos sujeitos a fadiga de contato de rolamento, são os rolamentos os mais lembrados. No entanto, apesar da amplificação em Língua Portuguesa do uso da mesma palavra, rolamento, não são apenas estes componentes que estão sujeitos a este modo de falha. Além de todos os tipos de rolamentos, também nos cames, rodas de trem e cilindros de laminação, o modo de falha predominante é a fadiga de contato de rolamento. Neste tipo de falha, os carregamentos cíclicos sobre contatos não-conformes provocam sucessivas deformações plásticas que, após um número finito de ciclos, pode conduzir a

nucleação de uma trinca (NEVES, 2006). As características dos defeitos comuns ao processo de fadiga de contato são discutidas a seguir.

3.3. Mecanismos de Dano por Fadiga de Contato

São diversos os fatores que influenciam a mecânica de falha de corpos sujeitos ao contato. Entre eles podemos incluir a geometria e as propriedades dos corpos em contato, as características da lubrificação e dos lubrificantes, a mecânica do carregamento imposto e também as condições do meio. Os fenômenos e mecanismos envolvidos são complexos. Alguns deles são mais proeminentes e estão listados na Tabela 2. Nela são mostradas a terminologia e as definições dos mais comuns mecanismos de dano presentes na fadiga de contato, de escorregamento e de rolamento. Apesar destas informações, não é simples generalizar os modos de falha para todas as situações de fadiga de contato.

Tabela 2 - Alguns dos principais processos de dano na fadiga de contato. (ADAPTADO de SURESH, 1998).

Terminologia	Descrição
Esfolamento (<i>Galling</i>)	Transferência de material em rotas macroscópicas de um corpo para o outro, e possivelmente de volta para o primeiro. Este processo ocorre sob ação de altas trações acima de dimensões de multi-asperezas. As conseqüências incluem aumento de vibração, erros de posicionamento e contaminação do lubrificante.
Distensão da superfície (<i>Surface distress</i>)	Fadiga por lascamento (<i>spalling</i>) em micro-escala em superfícies em contato de rolamento devido principalmente ao nível de asperezas dos carregamentos do contato normal. Este processo de dano é ajudado por áreas de superfície oxidadas, micro-fraturas no nível das asperezas e por crateras de micro-lascamentos. Pode causar fadiga por lascamento (<i>spalling</i>).
Lascamento (<i>spalling</i>)	Fadiga por Contato Hertziano em grande escala levando à formação de crateras macroscópicas na região de contato. Pode causar fraturas.
<i>Pitting</i>	Formação de fendas e cavidades microscópicas na superfície devido à ação combinada da fadiga de contato e interações do meio ambiente. Pode levar a fraturas maiores.

O modo de falha mais comum na fadiga de contato de rolamento é o lascamento (*spalling*), que é um desprendimento de material devido às tensões Hertizianas. Este lascamento tem como causa a tensão de cisalhamento paralela à

superfície, cujo valor máximo ocorre à profundidade de 0,48 do raio de contato (JOHNSON, 1985), o qual é determinado pela Teoria de Contato de Hertz. O cisalhamento pode ser determinado pela união da solução da distribuição de tensões abaixo da superfície do contato elástico esfera-contra-plano a um critério de escoamento, por exemplo, o de Tresca ou o de Von Mises (NEVES, 2003, 2004). Se o valor da tensão de cisalhamento ultrapassar o limite de escoamento do material, inicia-se uma trinca sub-superficial, que aflora para a superfície, gerando o lascamento. As Figuras 4 e 5 mostram uma micrografia obtida utilizando um microscópio eletrônico de varredura (MEV). Esse lascamento é típico em fadiga de contato de rolamento. Esta fratura ocorreu em um ensaio de rolamento axial a uma pressão de contato de Hertz elevada (NEVES, 2006). Pelas dimensões do dano, nota-se a severidade das condições deste ensaio, sendo que no trabalho original, o autor calculou que a profundidade da trinca foi de 0,47a, o que concorda muito bem com a teoria de Hertz. O autor (NEVES, 2006) chama a atenção também para um detalhe no fundo da cavidade, que pode ser melhor observado na vista lateral. Esta mancha com contornos claros é um carboneto cisalhado, indicando que a tensão de cisalhamento neste ponto foi alta, já que carbonetos têm alta dureza e são difíceis de cisalhar.

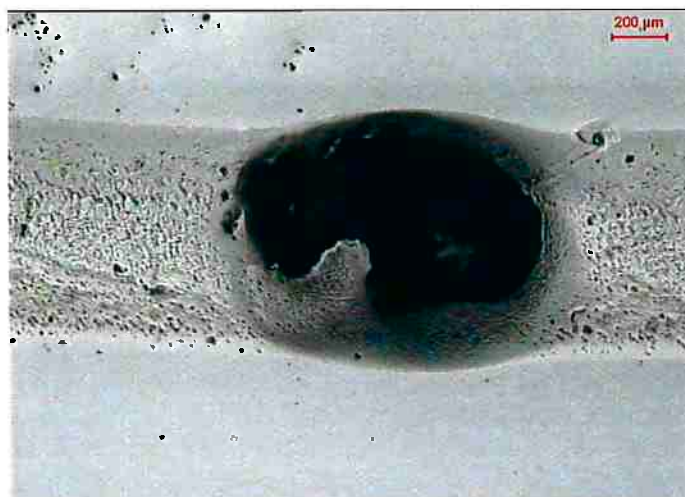


Figura 4 – Lascamento (*spalling*) gerado pelo rolamento das esferas contra o plano. Método: MEV, elétrons secundários (NEVES, 2006).

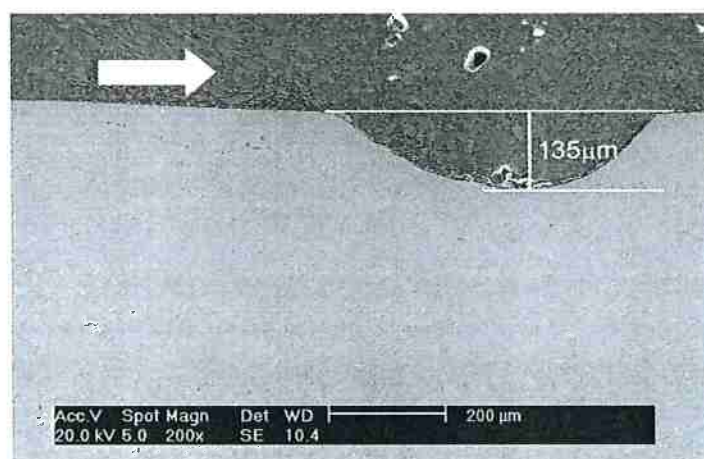


Figura 5 – Seção Longitudinal da falha mostrada na figura anterior (NEVES, 2006).

Os lascamentos formam danos, que acumulados, irão comprometer a vida do componente, aumentando a vibração do conjunto, à medida que sucessivos choques entre as esferas e as fraturas vão ocorrendo. Além do mais, os fragmentos decorrentes do desprendimento de material contaminam o lubrificante, podendo causar mais danos em outras partes do rolamento.

3.4 Análise de Sinais de Fadiga de Contato

O monitoramento das condições de elementos sujeitos à fadiga de contato tem considerável importância, já que pode detectar falhas em estágio inicial que acabariam por evoluir para falhas catastróficas, podendo causar desde prejuízos materiais e até acidentes.

Dentre os meios de monitoramento em máquinas, destacam-se a análise do sinal de vibração e o acompanhamento da emissão acústica. Sobre este segundo, pode-se dizer que é uma técnica relativamente nova em comparação ao primeiro, e que apesar de resultados promissores, tem complicadores como a necessidade de equipamentos caros, como microfones ultra-sensíveis e uma excelente vedação acústica, isto para proporcionar condições adequadas de captação do sinal sonoro. Devido a estes fatores e a maior quantidade de trabalhos sobre vibração na literatura, optou-se por fazer o trabalho utilizando o monitoramento da condição da máquina de ensaios de fadiga de contato por vibração. A análise de sinais por vibração é apresentada no decorrer deste texto.

Todo rolamento em uma máquina ou equipamento gera um sinal de vibração mesmo sendo geometricamente perfeito. Isto ocorre devido ao número finito de elementos rolantes para suportar a carga, gerando variações periódicas na rigidez do conjunto do rolamento. Adicionalmente, a presença de defeitos causa um aumento significativo no nível da vibração, sendo que estes defeitos podem ser classificados como locais ou distribuídos. Os defeitos distribuídos incluem rugosidade, ondulação e mal-alinhamento das pistas. Sendo que a diferenciação de rugosidade para ondulação é feita comparando-se o tamanho da estrutura com a ordem de grandeza da dimensão da área de contato de Hertz. Se o defeito for igual ou menor a ordem de grandeza, é uma rugosidade. Se for maior, é uma ondulação. Os defeitos distribuídos são causados por erros de manufatura, instalação imprópria ou desgaste abrasivo (TANDON, 1994).

Já os defeitos localizados podem ser trincas, pites e lascamentos nas superfícies de contato do rolamento, sendo que o modo de falha mais comum é o lascamento, já visto em detalhes no capítulo anterior.

Todos estes defeitos aumentam o nível de vibração do rolamento à medida que ocorre a variação da direção das forças de contato aplicadas na interação entre os corpos. No caso de um defeito localizado, o aumento é mais significativo, já que gera um choque de grande impacto, por exemplo, quando a esfera se choca com a borda de um lascamento na pista. Este choque causa uma mudança abrupta nas tensões de contato na interface, gerando um pulso de curta duração. Este pulso provoca vibração e ruído, que pode ser monitorado para detectar a presença de falhas no componente (TANDON, CHOUDHURY, 1999).

Visto que geralmente os defeitos distribuídos não comprometem a operação do componente, tornou-se prioritária a investigação da resposta vibracional do rolamento a um defeito localizado. Dois são os métodos para investigação desta resposta. O primeiro consiste em ensaiar o rolamento até a falha e comparar a vibração em ambas as situações. A outra técnica é introduzir intencionalmente uma falha localizada no rolamento por meio de indentações, eletroerosão ou outros processos de usinagem precisa. O problema no primeiro método é que pode levar muito tempo para terminar um ensaio, já que o teste acaba por ser de vida do componente, mas isto pode ser contornado utilizando técnicas de ensaio acelerado. Por outro lado, introduzir um defeito localizado no rolamento requer uma preparação especial com cuidados especiais.

Vários são os métodos para se avaliar a condição do rolamento mediante a análise do sinal de vibração. Eles se dividem nos métodos que avaliam o sinal no domínio do tempo ou no domínio da frequência. As vantagens do domínio do tempo são: a facilidade de processamento das informações e a simplicidade dos métodos, mas os métodos mais utilizados pertencem ao domínio da frequência, isto desde o advento da moderna FFT (*Fast Fourier Transform*, Transformada Rápida de Fourier), que é um método de se obter rapidamente e com qualidade a Transformada de Fourier para um sinal. Durante a análise, cada choque com um defeito localizado gera um pulso que gera um aumento da energia vibracional em determinadas frequências, e é esta possibilidade de se isolar faixas de frequência para o estudo que torna o método no domínio da frequência preferido pelos pesquisadores, mas por outro lado, os métodos costumam ser mais complexos e com custo computacional mais alto que os métodos do domínio do tempo.

Os principais métodos no domínio do tempo são a Valor Médio Eficaz (RMS, *Root Mean Square*); o fator de Pico, que compara os picos com o RMS; e os meios estatísticos, como o terceiro ou o quarto momentos estatísticos, que são o momento de assimetria (*Skewness*) e a Curtose (*Kurtosis*), respectivamente. O primeiro e o segundo momentos estatísticos são bem conhecidos (a média e a variância, respectivamente).

Já no domínio da frequência, os métodos mais aplicados são o Cancelamento Adaptativo de Ruído (ANC, *Adaptive Noise Cancelling*), que foi proposto para melhorar a razão sinal-ruído; a Técnica de Ressonância de Alta Frequência (HFRT, *High-Frequency Resonance Technique*), que ajuda na identificação de defeitos extraíndo frequências de defeitos características, que podem não estar presentes no espectro direto; e mais recentemente a Transformada de Wavelet, que detecta o lascamento antes mesmo da trinca sub-superficial aflorar para a superfície (MORI, 1996).

Na Figura 6, os resultados publicados por Tandon (1994) mostram que para a simples análise se há ou não defeito em um rolamento radial, o método do Valor Médio Eficaz é capaz de levar a identificação de defeitos com relativa facilidade.

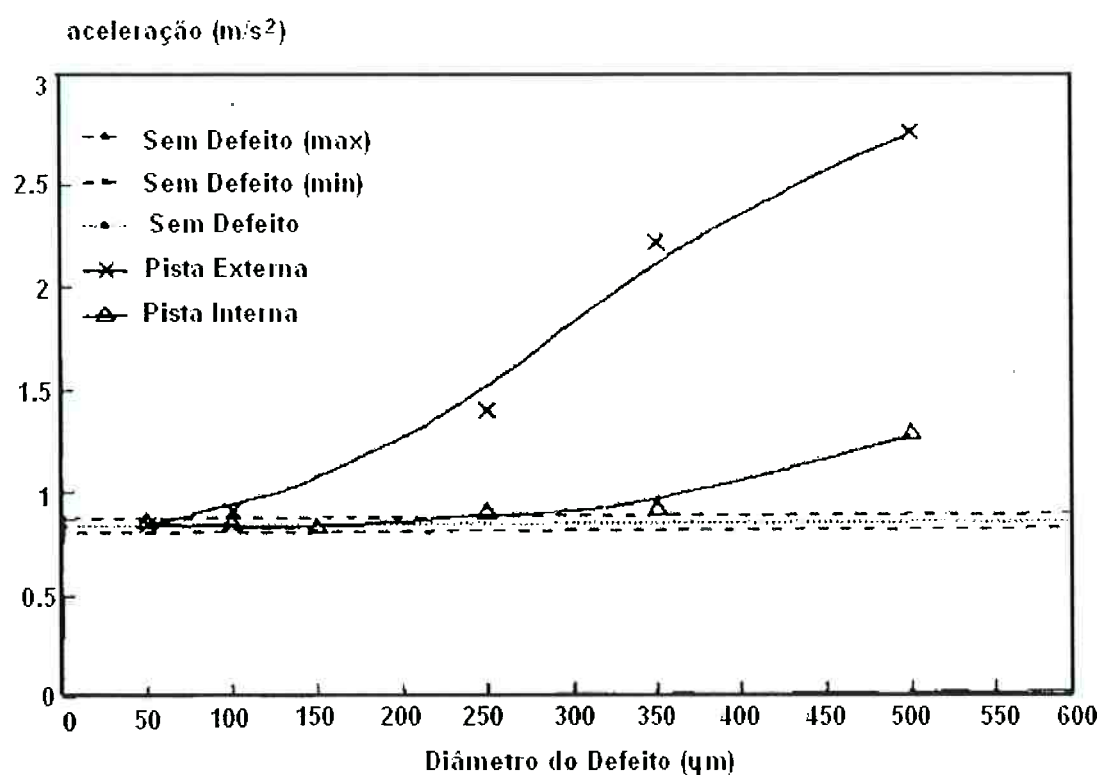


Figura 6 – Nível geral de vibração RMS em rolamentos com defeitos. (ADAPTADO de TANDON, 1994).

4. MATERIAIS, EQUIPAMENTOS E MÉTODOS

Neste trabalho, o sistema estudado é formado por um motor controlado por um inversor que faz com que as esferas de um rolamento axial rolem sobre uma pista parada. Essa pista possui uma dureza menor que as esferas, sendo utilizada como corpo-de-prova para análise de desgastes por fadiga de contato.

4.1. Corpo-de-Prova

O corpo-de-prova é assemelha-se com uma arruela e é constituído pelo aço AISI 52100 ou DIN 100 Cr 6. Suas dimensões são $d_i = 32,05$ mm, $d_e = 52,05$ mm e $h = 5,20$ mm, podendo ser visto na Fig. 7.

O desenho foi enviado a um técnico em usinagem para fabricação, juntamente com o tarugo que serviu de matéria-prima. O passo inicial foi o corte do tarugo em bolachas, que posteriormente foi transformado em forma de arruelas. Por fim, as superfícies foram retificadas para garantir uma tolerância mínima de paralelismo.

Antes do ensaio, as amostras foram preparadas com lixamento em lixas d'água de granas 220, 320, 400 e 600; e polimento com pasta de diamante com abrasivos de 6, 3 e $\frac{1}{4}$ microns. Isto para posterior análise utilizando microscopia óptica e eletrônica de varredura.

A dureza do corpo-de-prova era de 62,5 HRC, ou Dureza Rockwell C, sendo mais mole que as esferas, e por isso estando mais sujeito aos danos por fadiga de contato.



Figura 7 – Corpo-de-Prova.

4.2. Máquina de Ensaio

Uma máquina de ensaios, destinada ao estudo da fadiga de contato de rolamento, foi desenvolvida no Laboratório de Fenômenos de Superfície (LFS) da Escola Politécnica da USP para estudar o efeito da carga, do lubrificante, dos materiais e de tratamentos superficiais sobre o mecanismo de dano causado por esferas rolando sobre uma superfície plana.

A arquitetura do equipamento permite que os corpos-de-prova, no formato de arruelas de aproximadamente 50 mm de diâmetro externo, sejam montados como pistas externas de um rolamento axial com duas fileiras de esferas. Um motor acionado por um inversor de frequência move um eixo que por sua vez está solidário com a pista intermediária. Esta pista mantém contato permanente com as esferas superiores e inferiores, fazendo-as rolar, sendo que as inferiores movimentem-se sobre o corpo-de-prova. Ressalta-se que apenas a pista inferior é utilizada como corpo-de-prova.

O projeto da máquina é apresentado na Fig. 8. O corpo-de-prova é mostrado em escuro no desenho. A perspectiva do conjunto pode ser vista na Fig. 9.

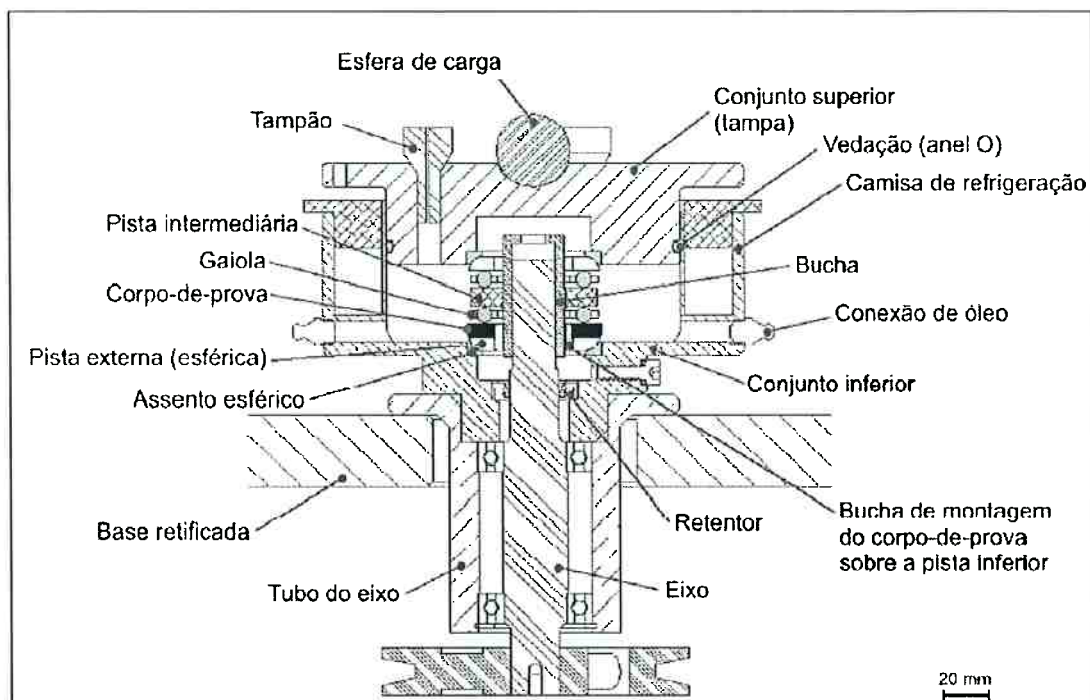


Figura 8 – Esquema em CAD do equipamento. (NEVES, 2006)

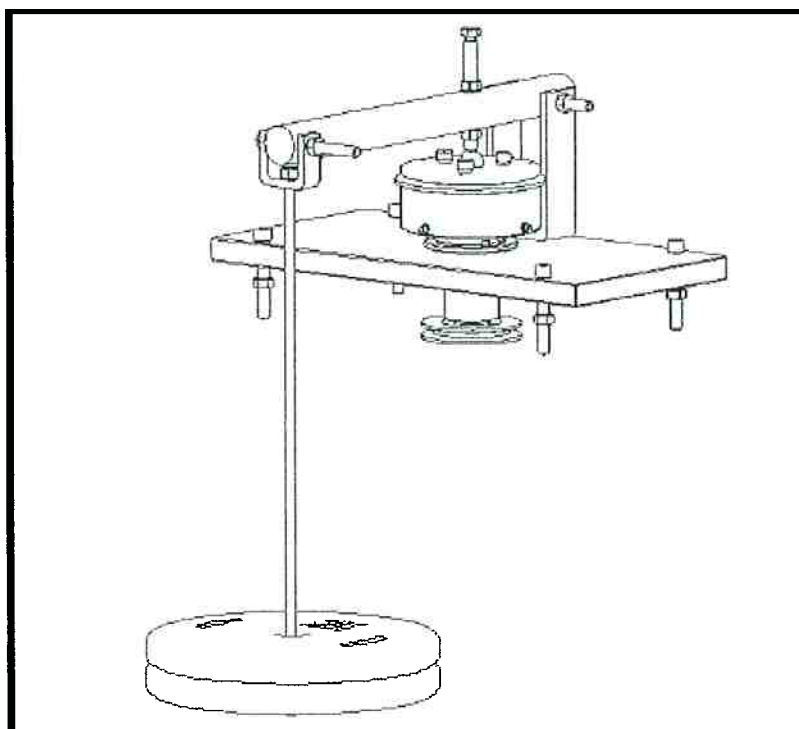


Figura 9 – Perspectiva do Equipamento. (NEVES, 2006)

A Figura 10 mostra o equipamento, apresentado esquematicamente nas Figuras 8 e 9, preparado para o ensaio de fadiga de contato.



Figura 10 - Equipamento para ensaio da fadiga de contato.

A primeira versão da máquina, apresentada na Fig. 10, foi desenvolvida no Trabalho de Conclusão de Curso de Fabiana Barruffini (BARRUFFINI, 2001), enquanto a construção da segunda versão, que é a utilizada neste trabalho, é de mérito do doutorado de Julio César Klein das Neves (NEVES, 2006). Esta versão incorpora uma série de melhorias, decorrentes da experiência anterior, como um melhor sistema de refrigeração, com melhor estanqueidade e a principal alteração que é a inclusão dos assentos esféricos, para compensar pequenos desalinhamentos entre o eixo da máquina e os assentos dos corpos-de-prova. A utilização desses assentos esféricos foi importante, pois eliminou deslizamentos das esferas, tornando o movimento delas em rolamento puro. Contudo, há sempre uma parcela de *spinning*, já que além de rolar, as esferas giram em torno do eixo da máquina. Mesmo assim, o modo de falha causado por este movimento é menos importante que o lascamento causado pela fadiga de contato de rolamento. Daí a

importância do assento esférico, reproduzindo mais fielmente os rolamentos em aplicações reais e o modo de falha de lascamento.

O equipamento possui também um braço que transmite um esforço gerado por um peso morto, que simula condições severas de operação, como altas tensões de contato de 8 GPa, tornando assim os ensaios de fadiga de contato em ensaios acelerados. Os ensaios acelerados são importantes, pois simulam a vida em serviço em tempo reduzido. Há também um controlador de temperatura do sistema de refrigeração, já que variações de temperatura alteram a viscosidade do lubrificante. Deixa também aberta a possibilidade de se estudar a variação controlada da temperatura do lubrificante na duração do material ensaiado.

Finalizando, algumas características da máquina foram projetadas para o monitoramento das condições de ensaio, como por exemplo, a escolha do aço inoxidável ferrítico como material da tampa, que por ser um material ferromagnético permite a fixação de sensores de base magnética. Há também furos na tampa para o uso de termopares, para medir a temperatura do lubrificante.

4.3. Sistema de Aquisição

A Figura 11 mostra o sistema de aquisição de dados da fabricante Lynx Tecnologia, produzido com tecnologia nacional. Este módulo é o ADS2000, sistema mais popular e carro-chefe de vendas da Lynx. Este equipamento conta com o condicionador de sinais AI2161 revisão 4 e o conversor de sinais digital-analógico AC2122.



Figura 11 – Foto do Sistema de Aquisição de Dados ADS 2000.

O condicionador de sinais possui oito canais com ganhos selecionáveis entre 1 e 5000 vezes, permitindo a leitura de dispositivos de tensão diferencial, tensão não-diferencial, sensores piezelétricos, termopares, pontes de Wheatstone, PT 100, sensores biológicos e outros.

Já o conversor AC2122 possui 8 canais com barramento 16 bits, sendo que 14 são de precisão, podendo amostrar até uma taxa real de 64.000 amostras por segundo, trabalhando na faixa de operação de -10 V a 10 V.

A conexão entre o módulo e o micro computador foi feita usando-se um cabo RJ-45 com pinagem cruzada, não necessitando, portanto de uma rede externa, sendo o aparelho ligado diretamente na placa de rede do computador.

4.4. Sensores

Para medição da vibração, foi utilizado um acelerômetro Kistler, modelo 8702B50M1. Este dispositivo é de tecnologia ICP, *Integrated Circuit Piezoelectric*, ou Circuito Piezelétrico Integrado. Dentro de uma carcaça protetora, há um cristal piezelétrico, capaz de transformar excitações mecânicas em sinais elétricos. Logo, quando o conjunto é sujeito à uma aceleração, uma massa sísmica posicionada junto do cristal traciona ou comprime o mesmo, gerando o sinal de saída. Nos acelerômetros ICP, deve haver uma alimentação em corrente, geralmente baixíssima, da ordem de miliamperes, para o funcionamento do aparelho. Um esquema de acelerômetro ICP pode ser visto na Fig. 12.

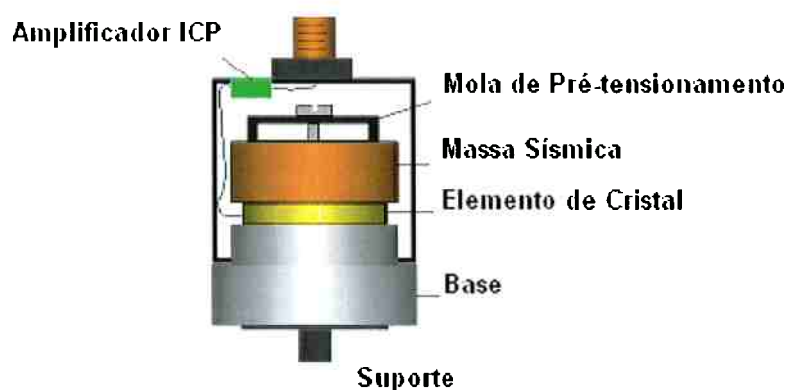


Figura 12 – Esquema de um acelerômetro ICP.

A fixação do acelerômetro na tampa do compartimento de ensaio foi feita com uma barra roscada 10-32, padrão do fabricante Kistler. Entre o dispositivo e a tampa da máquina, usou-se uma arruela retificada de material mais mole que a base do acelerômetro, para proteger o mesmo de eventuais desgastes.

Para se determinar o desvio inicial (*offset*) deste sensor, mediu-se a saída lida quando este se encontrava em repouso sobre um absorvedor de vibração, que no caso é o próprio estojo do acelerômetro. O processo de calibração pode ser visto na Fig. 13. A Fig. 14 apresenta o sensor de vibração instalado na tampa da máquina, já com o cabo de transmissão do sinal.



Figura 13 – Acelerômetro sobre um absorvedor de vibração.



Figura 14 – Acelerômetro instalado na tampa da máquina.

Para transformar em aceleração o valor lido em volts vindo do acelerômetro, foi feita a conversão utilizando a sensibilidade do dispositivo. Esta sensibilidade e outras características estão listadas na Tabela 3. Além disso, aplicou-se um ganho de 10 vezes no sinal para melhor resolução na faixa de operação do conversor AD e

usou-se um filtro passa-baixa de 2000 Hz, já que o módulo de aquisição forçava o uso de um filtro. Para estudos mais profundos de análise da condição do rolamento pode haver a necessidade de avaliar componentes da frequência mais elevados.

Tabela 3 – Algumas características do acelerômetro Kistler, modelo 8702B50M1.

Especificações		Tipo 8702B50M1
Modelo		Único eixo linear
Faixa	g	+/- 50
Sensibilidade	mV/g	+/- 101,3
Faixa de Frequência	Hz	0,5...10000
Resolução	mgrms	4
Choque	g	200
Sensibilidade Transversal	%	1,5
Faixa de Operação de Temperatura	°C	-55...100
Não linearidade	% FSO	+/- 1
Aterramento		Sim
Sensibilidade do Coef. Temp.	%/°C	-0,05508
Massa	g	9,7
Altura	mm	2
Tensão	V	20...30
Carcaça/Base		Titânio
Vedação		Hermética (IP68)
Conector		10-32 neg.
Diâmetro	mm	1,27
Parafuso de montagem		10-32 UNF x 3,3

Para o monitoramento da temperatura do lubrificante, o sensor utilizado foi o Pt 100, que é uma termoresistência, ou RTD (do inglês, *Resistance Temperature Detector*). Este dispositivo se baseia no princípio de que a resistência do elemento muda com a variação da temperatura, mas normalmente o termo só inclui dispositivos feitos de metal, não incluindo termistores e dispositivos de silício. (Trietley). Como o nome diz, a Pt 100 é uma termoresistência de Platina. A escolha deste material é devido a linearidade na faixa de trabalho entre 0 e 100 °C. O sensor pode ser visto na Fig. 15.



Figura 15 – Sensor de Temperatura PT 100.

Assim como o sinal do acelerômetro passou por uma amplificação e um filtro, o sinal da Pt 100 passou por um ganho de 1000 vezes e por um filtro passa-baixa de 5 Hz. Isto se justifica porque a variação da resistência não é tão grande do ponto de vista do circuito interno do módulo de aquisição, logo, a diferença de tensão lida na entrada analógica seria pequena sem este alto ganho. Já o uso de um filtro baixo é explicado pelo fato de que as variações de temperatura são de baixa frequência.

4.5 Programa de Monitoramento de Ensaio

Para o monitoramento de sinais, surgiu a necessidade do desenvolvimento de um programa de computador que atendesse requisitos básicos como o acompanhamento de informações como o nível de vibração, a temperatura de ensaio, o nível máximo de vibração permitido e a faixa de temperatura na qual o ensaio deveria ser mantido (*setpoints*), entre outros.

Para tanto, deveria ser escolhida uma linguagem de programação com as seguintes características:

- Ser compatível com a biblioteca WAC2122A.DLL, controladora do módulo de aquisição ADS 2000 e fornecida pelo próprio fabricante Lynx Tecnologia;
- Ter uma interface final amigável com o usuário do programa;
- Ser orientada a eventos, para agir de acordo com indicações externas, que no caso são as ordens do usuário do programa.

Vistos estes requisitos, a escolha foi pela linguagem do Microsoft Visual Basic 6.0, pela disponibilidade deste programa no laboratório, pela simplicidade com que a programação é realizada e pela sinergia que existe com o ambiente Microsoft Windows, sistema operacional no qual será executado o programa, chamado de Programa de Monitoramento do Ensaio de Fadiga de Contato.

4.6 Caixa de Comando

Para o controle da máquina de ensaios, os sinais de saída provenientes do computador necessitavam passar antes por um dispositivo que proporcionasse o efetivo acionamento e desligamento da máquina e do sistema de aquecimento do fluido refrigerante. As necessidades decorrentes eram:

- Converter os sinais de controle, de baixa potência, em mecanismos de liga-desliga de alta potência, compatíveis com a máquina e o sistema de aquecimento;
- Suportar uma série de repetições de acionamento e desligamento;
- Possuir um dispositivo de proteção.

4.7 Conjunto e Procedimento de Ensaio

A Figura 16 mostra o esquema em diagrama de blocos de todo aparato de ensaio. O sistema de refrigeração trabalha dedicado à máquina que por sua vez tem seu estado lido pelos sensores. Esses sinais captados pelos sensores são adquiridos nas entradas analógicas pelo condicionador de sinais no módulo de

aquisição, então são convertidos em um sinal digital pelo conversor D/A, também no módulo, sendo esse sinal é transferido para o computador com a ajuda do Programa de Monitoramento de Ensaio de Fadiga de Contato. Este programa trabalha os dados de acordo com a lógica programada, enviando um sinal de controle de volta para as saídas digitais do módulo de aquisição. Entra então em ação a caixa de comando, que de acordo com as ordens do computador, pode ligar ou desligar tanto a máquina quanto o aquecimento do fluido refrigerante.

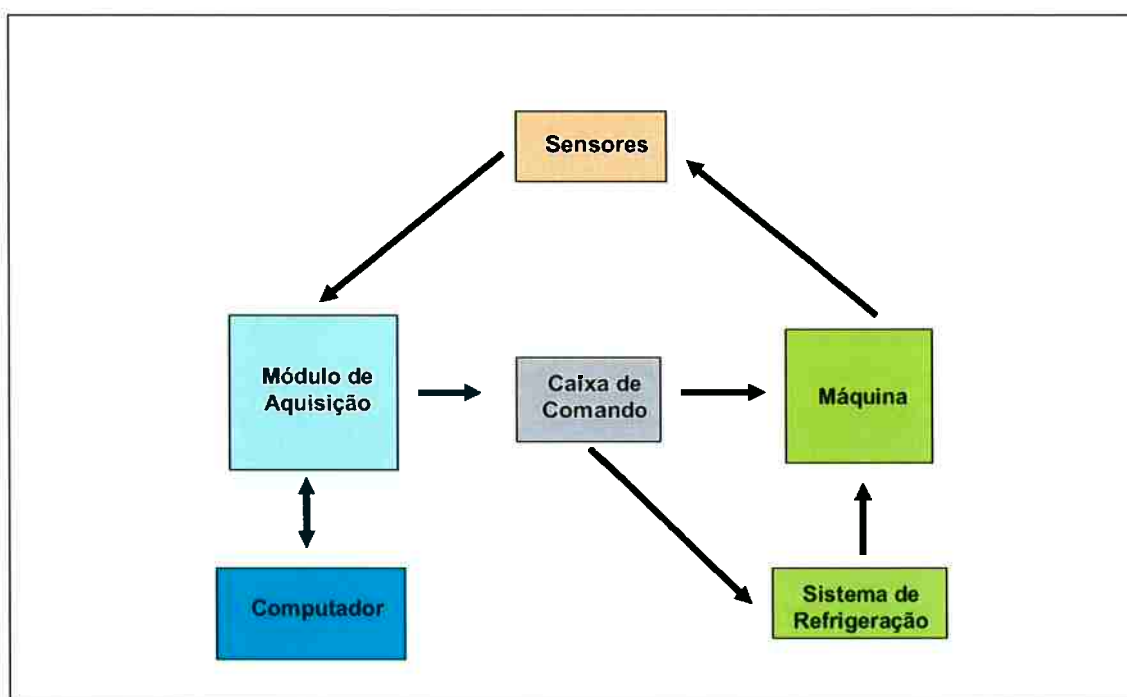


Figura 16 – Sistema representado em diagrama de blocos.

Para realização de um ensaio são realizados os seguintes procedimentos:

- Primeiramente, o computador é ligado e o programa de controle de ensaios é executado;
- A ligação entre o sistema de refrigeração e a máquina é verificada. É certificado que a mangueira usada para drenar o lubrificante da câmara de ensaio está acima do nível da tampa;
- O conjunto do rolamento é montado na máquina devidamente limpa. A cavidade de ensaio é preenchida com óleo para lubrificar o contato esferas-pistas;

- Então, a tampa do compartimento de ensaios é posicionada e os sensores de temperatura e vibração são instalados. Aplica-se a carga do peso morto através do braço que transfere o esforço para o rolamento;
- Conecta-se o módulo de aquisição nos sensores, no computador e na caixa de comando;
- Todos os equipamentos são alimentados. A alimentação da caixa de comando é feita com uma fonte que gera uma alimentação de cinco volts. Liga-se o inversor de frequência e o sistema de refrigeração na tomada;
- Todos os aparelhos são ligados: O disjuntor do inversor de frequência, o módulo de aquisição e a fonte da caixa de comando.

A Figura 17 mostra o conjunto montado pronto para ensaiar uma amostra.



Figura 17 – Conjunto montado e pronto para ensaio.

5. RESULTADOS

5.1 Programa de Monitoramento de Ensaio de Fadiga de Contato

Na Figura 18, é apresentada a janela do programa de monitoramento do ensaio de fadiga de contato e na Fig 19, a janela de configuração dos *setpoints*, que são os limites para cada variável. Essa janela é acessada pelo menu Configuração, sub-menu *SetPoints*.

Monitoramento do Ensaio de Fadiga de Contato

Arquivo Configuração

Endereço IP da AC2122: 192.168.1.1 Conectar Desconectar

Horário: 28/6/2007 13:41:34

Dados

Vibração (rms) 0.00178232 Setpoint 0.5	Temperatura (°C) 46.7375172 Setpoints 45 55	Portas Digitais Ler Saída Ler Entrada
Frequência Amostrada 10002.44 Setpoint 10000	Ciclos Setpoint 1000000	

Iniciar teste Interromper teste

Motor
Ligado Desligar

Refrigeração
Ligada Desligar

Arquivo Log
ArqLog.txt Alterar

Prefixo dos Arquivos de Dados
ArqDados.txt Alterar

WAC2122A 1.00 Teste Iniciado

Figura 18 – Tela do Programa de Monitoramento de Ensaio desenvolvida em VB.

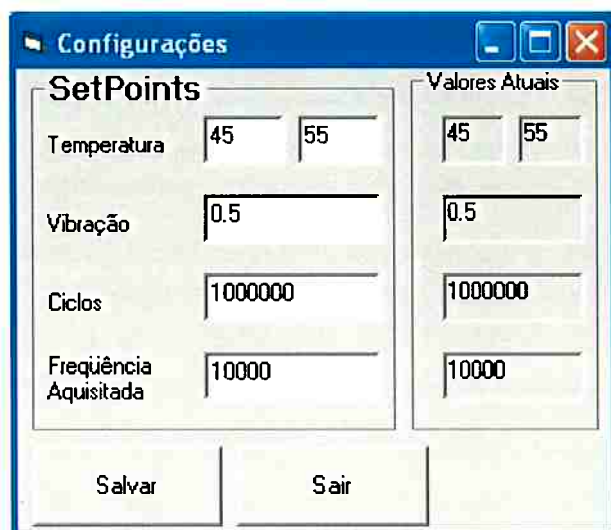


Figura 19 – Janela de atualização dos valores limites de cada variável do ensaio.

O Programa de Monitoramento do Ensaio de Fadiga de Contato possui as seguintes ferramentas e características:

- Apresentação do status do motor e do aquecimento do sistema de refrigeração;
- Data e horário, que serve de base também para geração do arquivo de informações de ensaio;
- Apresentação das informações de nível de vibração, temperatura do lubrificante, frequência real amostrada;
- Deixa em aberto a possibilidade de encerramento por quantidade de ciclos efetuados;
- Apresentação dos limites para cada variável acima (*setpoints*) e possibilidade de alteração no próprio ensaio, em tempo real;
- Geração de Arquivo de Dados que grava os valores lidos dos sensores;
- Geração de Arquivo de Informações sobre o ensaio (Arquivo Log), que registra os principais fatos ocorridos durante um teste;
- Possibilidade de alteração do prefixo dos arquivos de dados salvos, sendo útil para análise posterior, separando diferentes momentos do ensaio;
- Leitura das portas de entrada e saída do módulo de aquisição;

- Possibilidade de alteração do endereço IP (*Internet Protocol*) do módulo de aquisição;
- Possibilidade de ligar o motor e o sistema de refrigeração antes de gravar dados; útil para evitar que o limite de vibração seja atingido ao se passar por um dos pontos de ressonância da máquina, quando ela se encontra à baixa frequência.

O código de programação do Programa de Monitoramento do Ensaio de Fadiga de Contato é apresentado em detalhes no Anexo A.

5.2 Projeto da Caixa de Comando

Vistos os requisitos para um dispositivo de acionamento do motor e do sistema de aquecimento, seção 4.6, desenvolveu-se uma caixa de comando, apresentada na Fig. 20. Este projeto foi desenvolvido pelo M.Eng. Ediguer Enrique Franco. O esquema eletrônico é mostrado em detalhes no Anexo B.



Figura 20 – Caixa de comando para acionamento dos equipamentos.

5.3 Calibração dos Sensores

A calibração do acelerômetro Kistler, modelo 8702B50M1, é realizada em fábrica, e o componente é acompanhado por um laudo, confirmando a aferição. Além desta calibração do próprio acelerômetro, já resolvida pelo fabricante, era necessário também fazer a calibração do sensor, quando este se encontrava montado ao módulo de aquisição. O acelerômetro foi colocado dentro do estojo de proteção, revestido internamente de um absorvedor de vibração. Este procedimento pôde identificar um desvio inicial de 6 milivolts negativos, mostrado na Fig. 21. Este valor foi compensado na lógica de programação do Programa de Monitoramento do Ensaio de Fadiga de Contato.

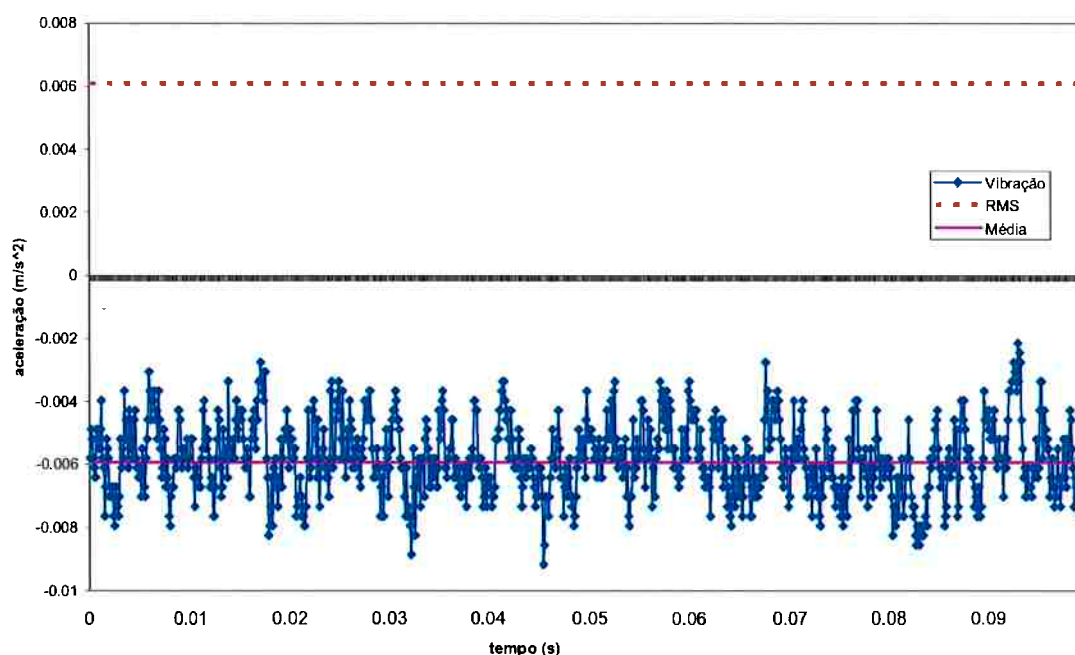


Figura 21 – Sinal de Vibração para calibração do acelerômetro.

A calibração do sensor de temperatura foi feita com base nas medições de um Termopar Minipa, modelo MV 370, levantando-se a curva apresentada na Fig. 22. Nota-se que a linearidade do sensor nesta temperatura realmente é alta, já que o valor de R-quadrado aproximou-se de um. Ressalta-se que o valor da tensão lido pelo módulo de aquisição é relacionado com o circuito elétrico interno do aparelho, variando de equipamento para equipamento.

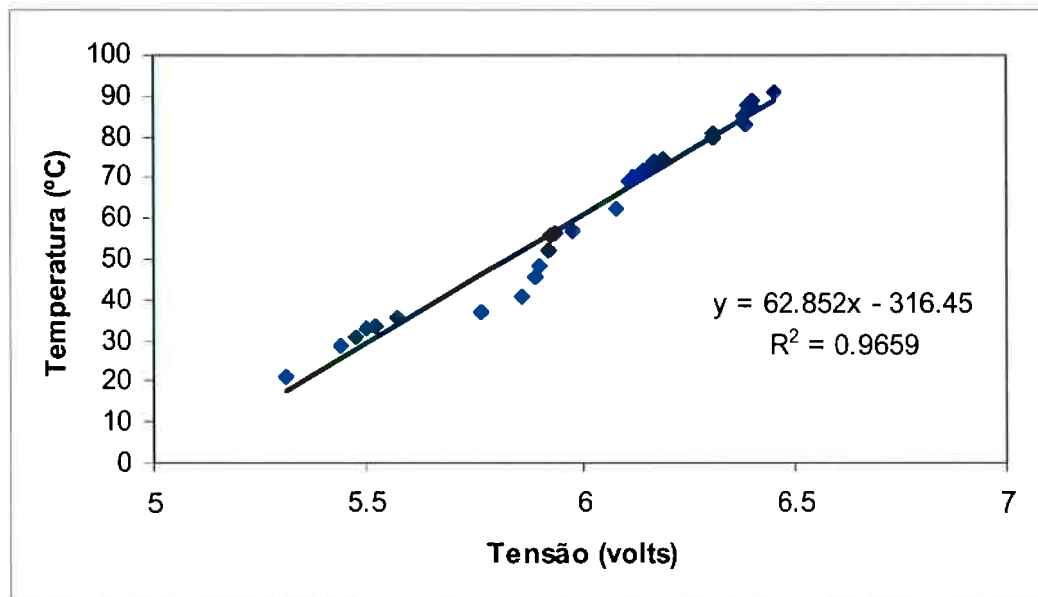


Figura 22 – Aferição do sensor de temperatura.

5.3 Ensaaios

Devido à semelhança de operação e de modos de falha entre um rolamento axial e um radial este método foi escolhido para ser o tomador de decisão para julgar se um corpo-de-prova apresenta falha ou não. Dois ensaios foram realizados para determinação do nível de vibração para desligamento automático da máquina. O primeiro ensaio foi rodado com um corpo-de-prova sem lascamento e o outro corpo-de-prova que havia sido previamente ensaiado até a falha. A aquisição dos dados foi feita à uma taxa de 10.002,44 Hz. As Figs. 23 e 24 apresentam um período de 0,1 s de ensaio.

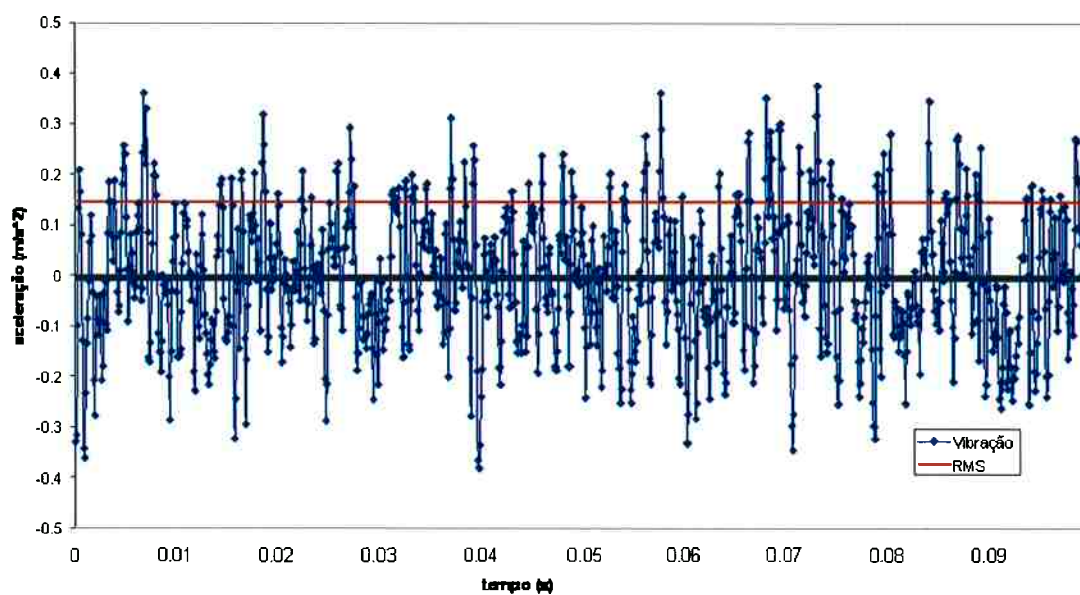


Figura 23 – Sinal de vibração do ensaio sem lascamento.

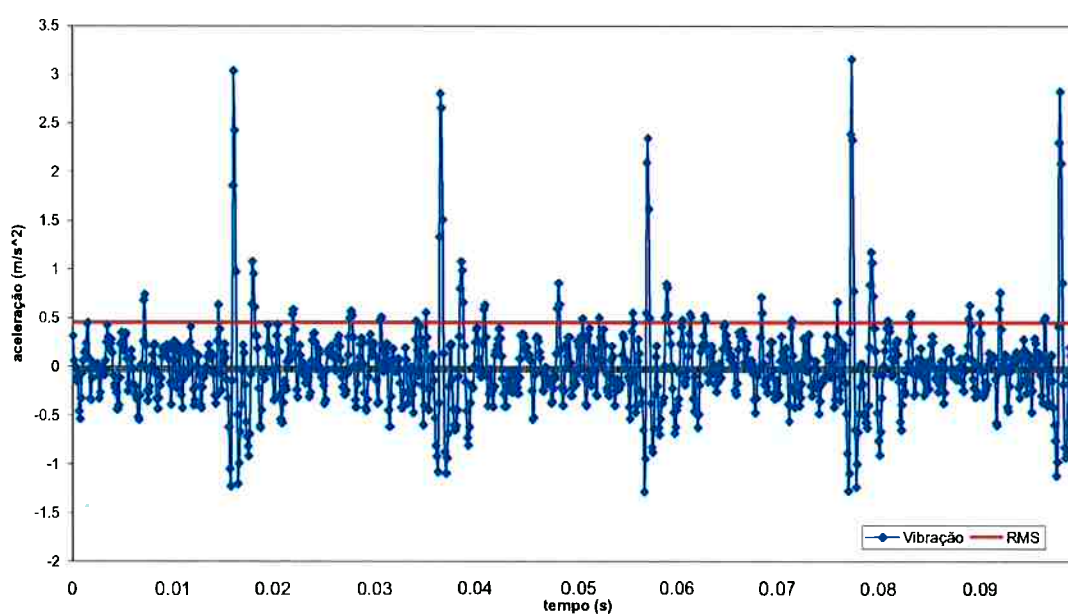


Figura 24 – Sinal de vibração do ensaio com lascamento.

Analisando os gráficos, claramente observou-se que o método RMS pode facilmente detectar a falha no componente já que após a falha, o nível RMS subiu

mais de três vezes o nível de vibração inicial. Antes do lascamento, o nível RMS ficou em torno de $0,14 \text{ m/s}^2$ e, após a falha, em $0,48 \text{ m/s}^2$.

Sendo assim, um terceiro ensaio foi realizado e o nível RMS limite foi programado em $0,45 \text{ m/s}^2$, para parar o ensaio assim que o lascamento ocorresse, já que fundamentalmente foi para isso que o sistema foi projetado. Neste ensaio, a máquina desligou assim que o nível de vibração atingiu o valor pré-determinado. O corpo-de-prova com o lascamento pode ser visto na Figura 25.



Figura 25 – Lascamento ocorrido durante um ensaio e detectado automaticamente pelo Programa de Monitoramento do Ensaio de Fadiga de Contato.

6. CONCLUSÕES

As principais conclusões deste trabalho estão relacionadas com as medidas de vibração da máquina:

- A diferença entre o valor RMS do corpo-de-prova sem lascamento e com lascamento para o aço AISI 52100 é significativamente grande, $0,15 \text{ m/s}^2$ e $0,48 \text{ m/s}^2$, respectivamente;
- O teste de validação do sistema de desligamento automático funcionou bem, provando que o método RMS é um método adequado para identificar o momento em que ocorre lascamentos;
- A automatização da máquina de ensaios de fadiga de contato foi feita, e o equipamento pode ser utilizado para a realização de ensaios sem necessidade do acompanhamento do pesquisador.

Além do que, seguem outras conclusões gerais:

- O acelerômetro escolhido atendeu perfeitamente as necessidades de aquisição.
- O sensor Pt 100 não respondeu bem à variações bruscas de temperatura, sendo talvez aconselhável o uso de termopares.
- Os equipamentos da Lynx, apesar de não serem robustos e não terem manuais satisfatórios, podem ser utilizados na indústria e em pesquisa, para testes de complexidade mediana.

ANEXOS

Anexo A – Código do Programa de Monitoramento do Ensaio de Fadiga de Contato

Formulário frmMain

```

Public fMainForm As frmMain
Private UserBuf As TpUserBuf
Private AiRange As TpAiRange

Public SetPointVib As Double, SetPointTempInf As Double, SetPointTempSup _
    As Double
Public SetPointFreq As Double, SetPointCiclos As Double
Public OffSetVib As Double
Public ValorSaida As Integer
Public ValorEntrada As Integer
Public ArqLog As String, ArqDados As String

Dim Cont As Integer, ContFiles As Integer

Private fResetSaida As Boolean
Private fOpenArqLog As Boolean
Private fOpen As Boolean
Private fConnected As Boolean
Private fAcqOn As Boolean
Private fAtingidoVib As Boolean
Private fRefrig As Boolean
Private fMotor As Boolean

Sub Main()
    Set fMainForm = New frmMain
    fMainForm.Show
End Sub

Private Sub btLerEntrada_Click()
    LerEntrada
End Sub

Private Sub btLerSaida_Click()
    lbSaida.Caption = Val(ValorSaida)
End Sub

Private Sub btAlterarArqDados_Click()
    ArqDadosAntigo = ArqDados
    ArqDados = InputBox("Digite o prefixo dos Arquivos de Dados _
        :", "Arquivos de Dados", "ArqDados")
    If ArqDados <> ArqDadosAntigo Then
        lbArqDados.Caption = ArqDados
        ContFiles = 0
        Cont = 0
    End If
End Sub

Private Sub btAlterarArqLog_Click()
    ArqLogAntigo = ArqLog
    ArqLog = InputBox("Digite o nome do Arquivo Log:", "Arquivo _

```

```

Log", "ArquivoLog")
    If ArqLog <> ArqLogAntigo Then
        If fOpenArqLog Then
            Close #2
            Open App.Path & "\" & ArqLog & ".txt" For Output As #2
            EscreverLog (Now & " ***** Nome de Arquivo Log _
Modificado*****")
            fOpenArqLog = True

        End If
        lbArqLog.Caption = ArqLog
    End If
End Sub

Private Sub btMotor_Click()
    If fMotor Then
        If fRefrig Then
            ValorSaida = 2
            EscreverSaida (ValorSaida)
            fMotor = False
            fRefrig = True
        Else
            ValorSaida = 0
            EscreverSaida (ValorSaida)
            fRefrig = False
            fMotor = False
        End If
    Else
        If fRefrig Then
            ValorSaida = 3
            EscreverSaida (ValorSaida)
            fMotor = True
            fRefrig = True
        Else
            ValorSaida = 1
            EscreverSaida (ValorSaida)
            fRefrig = False
            fMotor = True
        End If
    End If
    Call UpdateCommands
End Sub

Private Sub btRefrig_Click()
    If fRefrig Then
        If fMotor Then
            ValorSaida = 1
            EscreverSaida (ValorSaida)
            fMotor = True
            fRefrig = False
        Else
            ValorSaida = 0
            EscreverSaida (ValorSaida)
            fRefrig = False
            fMotor = False
        End If
    Else
        If fMotor Then
            ValorSaida = 3
            EscreverSaida (ValorSaida)
            fMotor = True

```

```

        fRefrig = True
    Else
        ValorSaida = 2
        EscreverSaida (ValorSaida)
        fRefrig = True
        fMotor = False
    End If
End If
Call UpdateCommands

End Sub

Private Sub Form_Load()
    fOpen = False
    fConnected = False
    fAcqOn = False
    fParada = False

    ArqLog = "ArqLog"
    ArqDados = "ArqDados"
    lbArqLog.Caption = ArqLog & ".txt"
    lbArqDados.Caption = ArqDados & ".txt"

    SetPointVib = 5
    SetPointTempInf = -10
    SetPointTempSup = 60
    SetPointCiclos = 1000000
    SetPointFreq = 10000

    OffSetVib = -0.0063

    lbSetPointVib = SetPointVib
    lbSetPointTempInf = SetPointTempInf
    lbSetPointTempSup = SetPointTempSup
    lbSetPointCiclos = SetPointCiclos
    lbSetPointFreq = SetPointFreq
    Call UpdateCommands
End Sub

Private Sub UpdateCommands()
    Dim Sn As Integer
    mnuFileOpen.Enabled = Not fOpen
    mnuFileClose.Enabled = fOpen
    btConnect.Enabled = fOpen And (Not fConnected)
    btDisconnect.Enabled = fOpen And fConnected And (Not fAcqOn)
    btIniciarTeste.Enabled = fOpen And fConnected And (Not fAcqOn)
    btInterromperTeste.Enabled = fOpen And fAcqOn
    btLerEntrada.Enabled = fOpen And fConnected
    btLerSaida.Enabled = fOpen And fConnected
    btAlterarArqLog.Enabled = (Not fAcqOn)
    btMotor.Enabled = (Not fAcqOn) And fOpen And fConnected
    btRefrig.Enabled = (Not fAcqOn) And fOpen And fConnected
    btLerSaida.Enabled = fOpen And fConnected
    btLerEntrada.Enabled = fOpen And fConnected And (Not fAcqOn)

    If fMotor Then
        btMotor.Caption = "Desligar"
        lbStatusMotor.ForeColor = &HC000&
        lbStatusMotor = "Ligado"
    Else
        btMotor.Caption = "Ligar"
        lbStatusMotor.ForeColor = &HFF&
    End If
End Sub

```

```

        lbStatusMotor = "Desligado"
    End If
    If fRefrig Then
        btRefrig.Caption = "Desligar"
        lbStatusRefrig.ForeColor = &HC000&
        lbStatusRefrig = "Ligada"
    Else
        btRefrig.Caption = "Ligar"
        lbStatusRefrig.ForeColor = &HFF&
        lbStatusRefrig = "Desligada"
    End If

End Sub

Private Sub btConnect_Click()
    If ConnectAC2122(edAddrIP.Text) = 1 Then
        fConnected = True
        StatusBar.Panels(2) = ""

        If fOpenArqLog = False Then
            Open App.Path & "\" & ArqLog & ".txt" For Output As #2
            EscreverLog (Now & " *****CONECTADO*****")
            fOpenArqLog = True
        End If

    Else
        fConnected = False
        StatusBar.Panels(2) = "AC2122 não respondeu"
    End If

    Call UpdateCommands
End Sub

Private Sub btDisconnect_Click()
    Call DisconnectAC2122
    fConnected = False
    Call UpdateCommands
End Sub

Private Sub btIniciarTeste_Click()

    Write #2,
    EscreverLog (Now & " Inicio de Ensaio:")
    EscreverLog ("      SetPoints: V " & SetPointVib & ", T " & _
SetPointTempInf & " ~ " & SetPointTempSup & ", F " & SetPointFreq _
& ", C " & SetPointCiclos)
    StatusBar.Panels(2) = "Teste Iniciado"

    '----Liga o Motor e o Aquecimento----'
    ValorSaida = 3
    EscreverSaida (ValorSaida)
    fRefrig = True
    fMotor = True
    '-----'

    Call UpdateCommands
    Call IniciarTeste
End Sub
Private Sub IniciarTeste()

'   Variaveis Setup

```

```

Dim Canal As Byte
Dim iRange As Integer
Dim Frequencia As Single
Dim Dummy As Byte
Dim ErrorCode As Long
'-----

If fAcqOn = True Then Exit Sub

fAcqOn = True
Call UpdateCommands

'===== Programa memória de canais =====
Call Clear_CM ' Limpa a memória e canais
' Vibração
iRange = 0 ' Faixa de entrada
Canal = 8 ' Canal A/D
Dummy = Insert_AI_CM(16, Canal, iRange)
'===== Programa memória de canais =====
' Temperatura
iRange = 0 ' Faixa de entrada
Canal = 2 ' Canal A/D
Dummy = Insert_AI_CM(16, Canal, iRange)

fAcqOn = False

If AcquisitionSetup(0, SetPointFreq, SampleFreq, _
ErrorCode) = 1 Then
    If ErrorCode = 0 Then
        If StartAcquisition = 1 Then
            fAcqOn = True
            Label8.Caption = SampleFreq
        End If
    End If
End If

Call UpdateCommands

End Sub
Private Sub btInterromperTeste_Click()

    If fAcqOn = False Then Exit Sub

    Call StopAcquisition
    fAcqOn = False
    Write #2,
    EscreverLog (Now & " Teste Interrompido pelo usuário")
    EscreverLog (" ")
    ValorSaida = 0
    EscreverSaida (ValorSaida)
    fMotor = False
    fRefrig = False

    Call UpdateCommands

End Sub
Private Sub Timer1_Timer()
' Variaveis Aquisicao

Dim Sn As Integer
Dim FileName As String
Dim rmsVib As Double, tmpVib As Double, rmsTemp As Double, _

```

```

tmpTemp As Double
Dim ContSamples As Integer
Dim nSampRead As Long
Dim Vibracao(20000) As Double
Dim Temperatura(20000) As Double

lbHorario.Caption = Now

If (Not fOpen) Or (Not fAcqOn) Then Exit Sub

ContSamples = 1

If GetSamples(ErrorCode, iSample, nSampRead, UserBuf) <> 0 Then

    For Sn = 0 To (nSampRead - 1)
        Temperatura(Sn) = 62.582 * (UserBuf.Buffer(2 * Sn) * 10# _
/ 32768#) - 316.45
        Vibracao(Sn) = ((UserBuf.Buffer(2 * Sn + 1) * 10# / 32768#) _
- OffSetVib) * 100 / 101.3
        ContSamples = ContSamples + 1
    Next

    If Cont = 1 Then

        Open App.Path & "\Dados\" & ArqDados & ContFiles & _
".txt" For Output As #1
            fOpenArqDados = True
            For Sn = 0 To (nSampRead - 1)
                Write #1, Vibracao(Sn)
            Next

            For Sn = 0 To (nSampRead - 1)
                Write #1, Temperatura(Sn)
            Next
            Close #1
            Cont = 0
        End If

        tmpVib = 0#
        tmpTemp = 0#

        For Sn = 0 To (nSampRead - 1)
            tmpVib = tmpVib + Vibracao(Sn) * Vibracao(Sn)
            tmpTemp = tmpTemp + Temperatura(Sn) * Temperatura(Sn)
        Next

        rmsVib = Math.Sqrt(tmpVib / (nSampRead - 1))
        rmsTemp = Math.Sqrt(tmpTemp / (nSampRead - 1))
        ContFiles = ContFiles + 1
        Cont = Cont + 1
        If Cont Mod 10 = 0 Then
            lbVib.Caption = Format(rmsVib, "##0.00000000")
            lbTemp.Caption = Format(rmsTemp, "##0.00000000")
        End If
    End If

    '-----Set Points Atingidos-----'
    If rmsVib > SetPointVib Then
        Call StopAcquisition
    End If

```

```

        fAcqOn = False
        ValorSaida = 0
        EscreverSaida (ValorSaida)
        fMotor = False
        fRefrig = False
        StatusBar.Panels(2).Text = "Ensaio Parado - Setpoint _
de Vibração atingido"
        fAtingidoVib = True
        Call UpdateCommands
        Write #2,
        EscreverLog (Now & " Ensaio Parado - SetPoint de _
Vibração Atingido =" & Format(SetPointVib, "##0.0000000000"))
        End If

        If rmsTemp > SetPointTempSup And fRefrig = True Then
            Call StopAcquisition
            fAcqOn = False
            ValorSaida = 1
            EscreverSaida (ValorSaida)
            fMotor = True
            fRefrig = False
            fRefrig = False
            Call UpdateCommands
            Write #2,
            EscreverLog (Now & "Refrigeração Desligada. _
SetPointTempSup atingido =" & Format(SetPointTempSup, "##0.0000000000"))
            Call IniciarTeste
        End If

        If rmsTemp < SetPointTempInf And fRefrig = False Then
            Call StopAcquisition
            fAcqOn = False
            ValorSaida = 3
            EscreverSaida (ValorSaida)
            fMotor = True
            fRefrig = True
            fRefrig = True
            Call UpdateCommands
            Write #2,
            EscreverLog (Now & "Refrigeração Ligada. SetPointTempInf _
atingido =" & Format(SetPointTempInf, "##0.0000000000"))
            Call IniciarTeste
        End If
    '-----'
End Sub
Private Sub EscreverSaida(ValorSaida)

WriteAC2122DigitalPort (ValorSaida)
End Sub
Private Sub LerEntrada()

    If (ReadAC2122DigitalPort(ValorEntrada) = 1) Then
        lbEntrada.Caption = Val(ValorEntrada)
    Else
        lbEntrada.Caption = "Erro na Leitura"
    End If

End Sub

Private Sub mnuFileOpen_Click()
    Dim Dummy As Byte

```

```

Dim VersionHigh As Byte
Dim VersionLow As Byte
Dim Value As Single
Dim Sn As Integer
Dim i As Integer

fOpen = (OpenDriver = 1)
If fOpen Then
    Call GetVersion(VersionHigh, VersionLow)
    Value = VersionHigh + VersionLow / 256
    StatusBar.Panels(1).Text = "WAC2122A " + Format(Value, "##0.00")
    StatusBar.Panels(2).Text = "Driver iniciado"
    Call GetAiCaps(nAiChannels, nAiRange, AiRange)

Else
    StatusBar.Panels(1).Text = ""
    StatusBar.Panels(2).Text = "Erro na abertura do driver"
End If
Call UpdateCommands
End Sub

Private Sub mnuFileClose_Click()
    Call FinalizaDriver
    StatusBar.Panels(2).Text = "Driver finalizado"
    Call UpdateCommands
End Sub

Private Sub mnuFileExit_Click()
    If fOpenArqLog Then
        Close #2
    End If
    If fOpenArqDados Then
        Close #1
    End If

    Unload Me
End Sub

Private Sub FinalizaDriver()
    If fOpen Then
        Call CloseDriver
        fOpen = False
        fConnected = False
        fAcqOn = False
    End If
    Call UpdateCommands
End Sub

Private Sub Form_Unload(Cancel As Integer)
    Dim i As Integer

    If fOpen Then
        Call FinalizaDriver
    End If

    For i = Forms.Count - 1 To 1 Step -1
        Unload Forms(i)
    Next
    If Me.WindowState <> vbMinimized Then
        SaveSetting App.Title, "Settings", "MainLeft", Me.Left
        SaveSetting App.Title, "Settings", "MainTop", Me.Top
    End If
End Sub

```

```

        SaveSetting App.Title, "Settings", "MainWidth", Me.Width
        SaveSetting App.Title, "Settings", "MainHeight", Me.Height
    End If
End Sub

Private Sub EscreverLog(Recado As String)
    Write #2, Recado
End Sub

Private Sub AbrirArqLog(NomeDoArquivo As String)
    Open App.Path & "\" & NomeDoArquivo & ".txt" For Output As #2
End Sub

Private Sub mnuSettingsSetPoints_Click()
    frmSettings.Show vbModal
End Sub

```

Formulário frmSettings

```

Private Sub Form_Load()
    Label5.Caption = frmMain.SetPointTempInf
    Label6.Caption = frmMain.SetPointVib
    Label7.Caption = frmMain.SetPointCiclos
    Label8.Caption = frmMain.SetPointFreq
    Label9.Caption = frmMain.SetPointTempSup

    Text1.Text = frmMain.SetPointTempInf
    Text2.Text = frmMain.SetPointVib
    Text3.Text = frmMain.SetPointCiclos
    Text4.Text = frmMain.SetPointFreq
    Text5.Text = frmMain.SetPointTempSup
End Sub

Private Sub btSair_Click()
    Unload Me
End Sub

Private Sub btSalvar_Click()

    If (Text1.Text = "") Or (Text2.Text = "") Or (Text3.Text = "")_
Or (Text4.Text = "") Or (Text5.Text = "") Then
        MsgBox "Preencher todos os SetPoints", vbExclamation _
+ vbSystemModal, "Aviso"
    Exit Sub
    End If

    Label5.Caption = CDb1(Text1.Text)
    Label6.Caption = CDb1(Text2.Text)
    Label7.Caption = CDb1(Text3.Text)
    Label8.Caption = CDb1(Text4.Text)
    Label9.Caption = CDb1(Text5.Text)

    SetPointTempInf = Label5.Caption
    SetPointVib = Label6.Caption
    SetPointCiclos = Label7.Caption
    SetPointFreq = Label8.Caption
    SetPointTempSup = Label9.Caption

    frmMain.SetPointVib = SetPointVib
    frmMain.SetPointTempInf = SetPointTempInf
    frmMain.SetPointCiclos = SetPointCiclos
    frmMain.SetPointFreq = SetPointFreq

```

```

frmMain.SetPointTempSup = SetPointTempSup
frmMain.lbSetPointVib = SetPointVib
frmMain.lbSetPointTempInf = SetPointTempInf
frmMain.lbSetPointTempSup = SetPointTempSup
frmMain.lbSetPointCiclos = SetPointCiclos
frmMain.lbSetPointFreq = SetPointFreq

Write #2,
Write #2, Now & " Mudança de SetPoints:"
Write #2, "      SetPoints: V " & SetPointVib & ", T " & SetPointTempInf _
& " ~ " & SetPointTempSup & ", F " & SetPointFreq & ", C " & SetPointCiclos

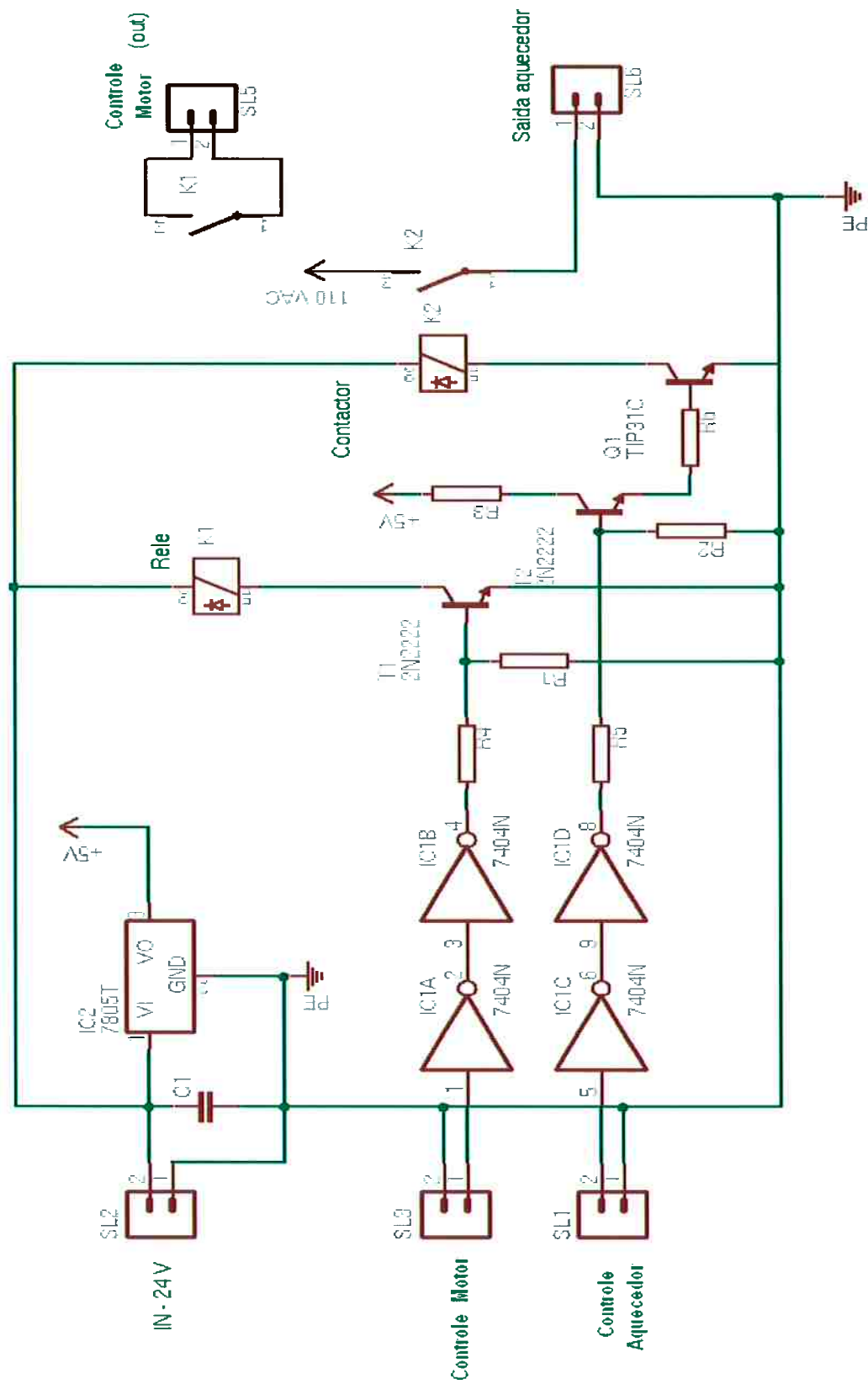
End Sub

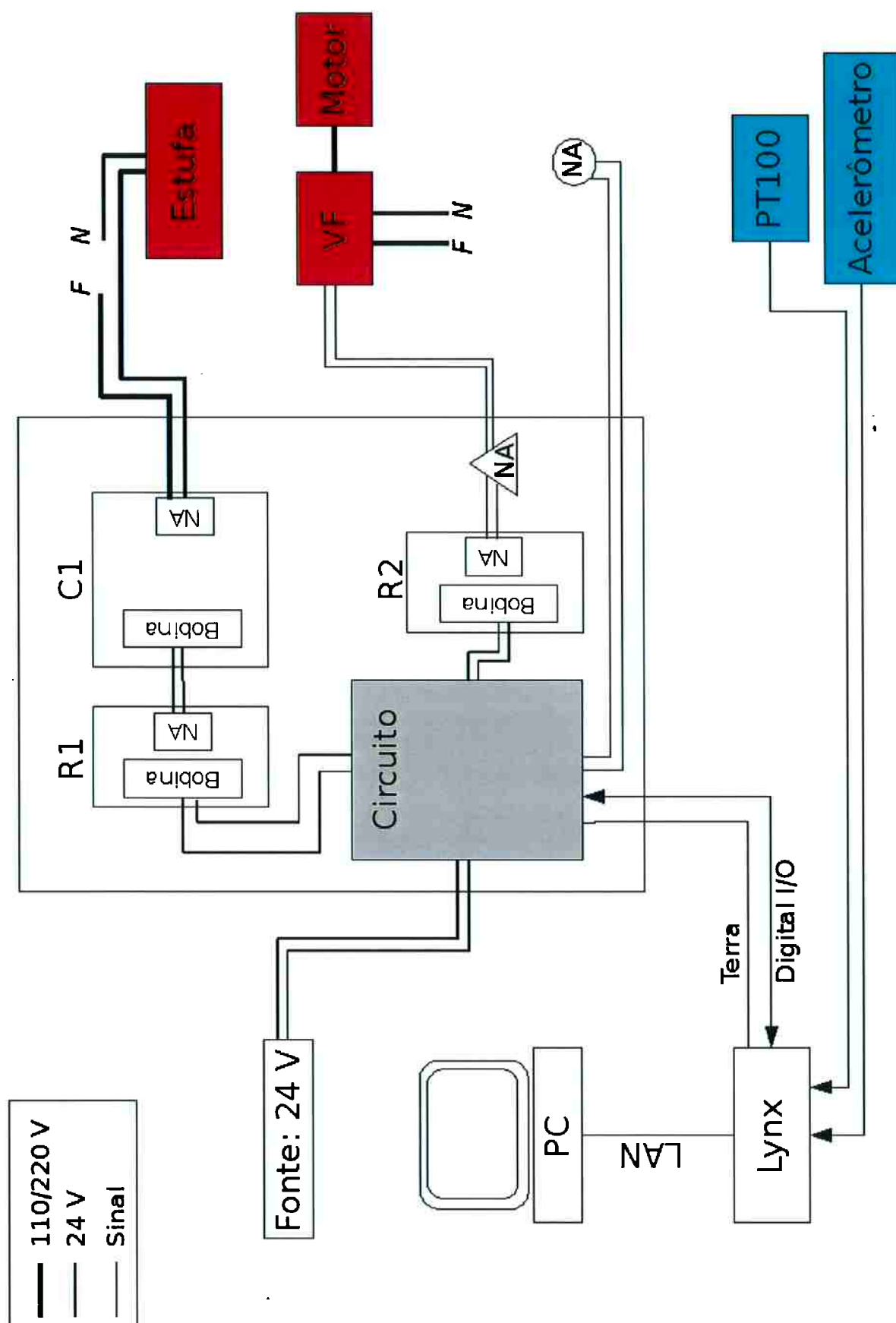
Private Sub Form_Unload(Cancel As Integer)
    Dim i As Integer

    'close all sub forms
    For i = Forms.Count - 1 To 1 Step -1
        Unload Forms(i)
    Next
    If Me.WindowState <> vbMinimized Then
        SaveSetting App.Title, "Settings", "MainLeft", Me.Left
        SaveSetting App.Title, "Settings", "MainTop", Me.Top
        SaveSetting App.Title, "Settings", "MainWidth", Me.Width
        SaveSetting App.Title, "Settings", "MainHeight", Me.Height
    End If
End Sub

```

Anexo B – Esquema Eletrônico da Caixa de Comando





REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

HUTCHINGS, I. M., **Tribology: Friction and Wear of Engineering Materials**, Edward Arnold, London, 1992.

JONHSON, K. L., **Contact Mechanics**, Cambridge University Press, Cambridge, 1997.

MORI, K., KASASHIMA, N., YOSHIOKA, T., UENO, Y., **Prediction of spalling on a ball bearing by applying the discrete wavelet transform to vibration signals**. Wear 1996;195:162-8.

NEVES, J. C. K., **Desenvolvimento de um equipamento para ensaio de fadiga de contato esfera sobre plano e sua aplicação na caracterização de ferros fundidos com matrizes de elevada dureza**, São Paulo: USP, 2006. 162 p.

NEVES, J. C. K., BARRUFFINI, F. F., SINATORA, A., **Desenvolvimento de uma máquina destinada ao estudo da fadiga de contato no sistema esfera contra plano**. Congresso Anual da Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais (58.º: 2003: Rio de Janeiro, RJ). Anais do 58º Congresso Anual da Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais. [CDROM]. / Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais - São Paulo : Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais, 2003. p. 606-612.

NEVES, J. C. K., SINATORA, A., **Caracterização do dano superficial causado em um aço ABNT 1045 pelo movimento de rolamento esfera contra plano nas condições com e sem lubrificação**. Congresso Anual da Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais (59.º: 2004: São Paulo, RJ). Anais do 59º Congresso Anual da Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais - Internacional. [CDROM]. / Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais - São Paulo: Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais, 2004. p. 4385-4394.

SURESH, S., **Fatigue of Materials**. 2nd ed. Cambridge: Cambridge Press University, 1998. 679 p.

TANDON, N., **A comparison of some vibration parameters for the condition monitoring of rolling element bearings**. Measurement 12 (1994) 285-289.

TANDON, N., CHOUDHURY, A., **A review of vibration and acoustic measurement methods for the detection of defects in rolling element bearings.** Tribology International 32 (1999) 469-480.

TRIETLEY, HARRY L., **Transducers in Mechanical and Electronic Design**, Marcel Dekker, Inc., 1986, New York, USA.