

GUÊNIA MARA VIEIRA LADEIRA

INSTRUMENTAÇÃO DE UM TRIBÔMETRO PARA
ENSAIOS DE DESLIZAMENTO EM DUTOS FLEXÍVEIS



UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA
FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA

2011

GUÊNIA MARA VIEIRA LADEIRA

**INSTRUMENTAÇÃO DE UM TRIBÔMETRO PARA
ENSAIOS DE DESLIZAMENTO EM DUTOS FLEXÍVEIS**

Dissertação apresentada ao
Programa de Pós-graduação em
Engenharia Mecânica da Universidade
Federal de Uberlândia, como parte dos
requisitos para a obtenção do título de
MESTRE EM ENGENHARIA MECÂNICA.

Área de Concentração: Tribologia e
Materiais

Orientador: Prof. Dr. Sinésio Domingues
Franco

Co-orientadora: Profa. Dra. Vera Lúcia D. S.
Franco

UBERLÂNDIA – MG

2011

AGRADECIMENTOS

Agradeço à equipe do Laboratório de Tecnologia em Atrito e Desgaste da Faculdade de Engenharia Mecânica, em especial aos que estiveram diretamente envolvidos com este trabalho.

Aos alunos de iniciação científica Wesley Pereira Marcos, Gabriela Vieira Lima, Douglas Teruyuki Cabral e Yasmin Vilela kaufmann pela colaboração no desenvolvimento do trabalho.

Aos Técnicos do Laboratório Flávio Alves dos Santos e Jhonathas Ferreira Santos que montaram a parte mecânica do Tribômetro.

Ao Engenheiro Thiago Caetano Ferreira diretamente envolvido na automação do Tribômetro, por participar no planejamento e desenvolvimento deste trabalho.

Ao Eng. M.Sc. Raphael Rezende Pires pelo projeto e construção da parte mecânica do Tribômetro, e por me informar sobre este funcionamento para que fosse realizada a instrumentação Tribômetro.

Ao Prof. Dr. Francisco Paulo Lepore Neto pelo aprendizado de Instrumentação de Sistemas Mecânicos e Vibrações, e por esclarecer as minhas dúvidas durante este trabalho.

A Profa. Dra. Ing. Vera Lúcia D. S. Franco por acreditar neste trabalho, pelo apoio para fosse realizado, e por me ensinar a escrever uma dissertação de mestrado.

Ao Professor Dr. Ing. Sinésio Domingues Franco pela orientação para realização do trabalho de mestrado.

A Petrobras – Petróleo Brasileiro S.A. pelo apoio financeiro, pelo fornecimento de amostras para teste e pelas informações detalhadas sobre o trabalho que deve ser realizado pelo Tribômetro.

A Faculdade de Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Uberlândia por acreditar e apoiar meu trabalho.

LADEIRA, G. M. V. **Instrumentação de um tribômetro para ensaios de deslizamento em dutos flexíveis**. 2011. 102f. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia.

RESUMO

Os dutos flexíveis são utilizados em larga escala como meio de condução de petróleo, gás e água entre as cabeças dos poços e as plataformas. Os dutos flexíveis são constituídos por camadas de materiais poliméricos, intercaladas com cintas de aço, formando assim um compósito que alia alta resistência à corrosão e flexibilidade de movimentação. Eles absorvem as movimentações impostas por correntes marinhas, mas podem sofrer desgaste na camada polimérica externa. Com o intuito de simular esse tribossistema, o Laboratório de Tecnologia em Atrito e Desgaste projetou e construiu um tribômetro capaz de reproduzir em escala real condições semelhantes ao desgaste que ocorre em campo. O equipamento desenvolvido é constituído de um sistema capaz de realizar movimentos verticais alternados, em ambiente submerso, além de aplicar sobre as amostras ensaiadas cargas normais à sua superfície, cujos valores podem chegar a 1.000 kN. A automatização com controle e monitoramento de variáveis de processo é fundamental para o correto funcionamento desse equipamento. Nesta dissertação é descrita a instrumentação desenvolvida para esse Tribômetro, apresentando os testes preliminares dos sensores e a análise do desempenho mecânico e dos dados captados dos sensores de cada subsistema. Finalmente, após a montagem completa e teste do Tribômetro, pôde-se verificar que a atuação mecânica e a instrumentação do sistema de oscilação atendem à função para a qual o sistema foi projetado. Além disso, foi observado que a válvula proporcional de controle da pressão hidráulica do sistema de compressão das amostras está inadequada à faixa de forças aplicadas, e deve ser substituída. Após a troca da válvula o sistema novamente testado. Os sensores de força do sistema de compressão estão adequados. Os sensores que, a princípio, mediriam o desgaste das amostras apresentaram deslocamentos na alternância do sentido de movimentação do duto flexível, e baixa resolução. Definindo-se que estes sensores, serão utilizados somente para limitar o máximo desgaste das amostras. As características de desgaste das amostras necessitam ser analisadas fora do Tribômetro, com instrumentos mais precisos. Os níveis de vibração para as cargas testadas foram muito baixos, não representando, problema para o equipamento.

Palavras-chave: instrumentação, tribômetro, desgaste, dutos flexíveis.

LADEIRA, G. M. V. **Instrumentation of a tribometer for testing the slip in flexible pipe.** 2011. 102f. Master Dissertation, Universidade Federal de Uberlândia.

ABSTRACT

The flexible pipes are used extensively as a means of conducting crude oil, gas and water between the wellheads and oil platform. These pipes are made of layers of polymeric materials, interspersed with steel straps, forming a composite that combines high corrosion resistance and flexibility of movements. They absorb the changes imposed by water currents, but can wear the outer polymeric layer. In order to simulate this tribossistema, the Laboratório de Tecnologia em Atrito e Desgaste designed and built a tribometer able to reproduce middle-scale conditions similar to the wear that occurs on the field. The developed device consists of a system capable of alternating vertical movements in underwater environment, and applied on the samples tested loads normal to its surface, whose values can reach 1000 kN. The automation control and monitoring of process variables is essential for the correct operation of the equipment. In this dissertation is describes the instrumentation developed for this tribometer, with preliminary testing of the sensors and the analysis of mechanical performance and data obtained from the sensors to each subsystem. Finally, after complete assembly and testing of the tribometer, we could verify that the performance of mechanical and instrumentation system oscillation attend the function for which the system was designed. Furthermore, it was observed that the proportional valve control hydraulic pressure of the compression system is inadequate to sample the range of applied forces, and must be replaced. After the tube change the system retested. The force sensors of the compression system are adequate. The sensors, in principle, would measure the wear of the samples showed shifts in the alternation of the direction of movement of the flexible duct, and low resolution. Setting up these sensors will be used only to limit the maximum wear of the samples. The wear characteristics of the samples need to be analyzed out of the tribometer, with more precise tools. Vibration levels for loads tested were too low, not acting for the equipment problem.

Keywords: instrumentation, tribometer, wear, flexible ducting.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1 – Visão geral do projeto da plataforma P50 (RAMOS NETO, 2010).....	2
Figura 1.2 – Estrutura de um duto flexível (CHEN, 1995).....	3
Figura 1.3 – Conexão do duto flexível com enrijecedor e movimentos do sistema tribológico (HWANG et al., 2008)	4
Figura 1.4 – Desgaste da capa externa do duto flexível (HWANG et al, 2008).....	5
Figura 2.1 – Representação do par tribológico duto flexível / enrijecedor (HWANG et al., 2008).....	7
Figura 2.2 – Concepção do sistema de aplicação de esforços e movimentação do Tribômetro (HWANG et al., 2008)	8
Figura 2.3 – Detalhes das amostras de polímeros do enrijecedor no Tribômetro.....	9
Figura 2.4 – Detalhes do sistema de compressão	10
Figura 2.5 – Detalhes do acoplamento dos cilindros ao sistema (HWANG et al., 2008)	11
Figura 2.6 – Estrutura do Tribômetro de Grandes Dimensões	12
Figura 2.7 – Motores elétricos do sistema hidráulico: a) Motor do sistema de oscilação e motor do sistema de compressão b) Motor do sistema de recirculação de óleo.....	13
Figura 2.8 – Parte externa do painel elétrico do Tribômetro.....	14
Figura 2.9 – CLP utilizado no controle do sistema.....	14
Figura 2.10 – Tela da IHM para operação manual do Tribômetro	15
Figura 3.1 – Ilustração de um <i>strain gauge</i> (< http://www.circuitstoday.com/strain-gauge >).	18

Figura 3.2 – Exemplos de construção de células de carga.	19
Figura 3.3 – Célula de carga da parte superior do sistema de oscilação do Tribômetro. ...	19
Figura 3.4 – Célula de carga utilizada no Tribômetro: a) Construção interna da U10 M; b) Foto da célula de carga (HBM - Data Sheet Force Transducers U10 M).....	21
Figura 3.5 – Detalhes do sistema de oscilação.....	22
Figura 3.6 – Princípio de funcionamento de um LVDT (Adaptado de: DYER, 2001).....	23
Figura 3.7 – LVDTs utilizados no Tribômetro (HBM – Data Sheet Inductive Standard Displacement Transducers)	23
Figura 3.8 – Suportes de fixação dos LVDTs.....	24
Figura 3.9 – LVDT do lado esquerdo que limita o desgaste das amostras.	25
Figura 3.10 – Monitoramento do deslocamento no movimento de oscilação: a) parte central do Tribômetro; b) detalhe da instalação do LVDT que acompanha o movimento de oscilação	26
Figura 3.11 – Esquema de construção de um PT100 (FIALHO, 2004).....	27
Figura 3.12 – Ponte de Wheatstone usada na medição de temperatura com um PT (FIALHO, 2004).....	28
Figura 3.13 – Termoresistor PT100 (Radar Industrial).....	28
Figura 3.14 – Condicionador de sinais Spider8 (Spider8 – PC –Measurement Electronics)..	29
Figura 3.15 – Posicionamento do acelerômetro em relação à máxima sensibilidade (ROBERT; ERIC, 2010)	30
Figura 3.16 – Base de instalação do Tribômetro	31

Figura 3.17 – Curva da relação de desvio da sensibilidade em função da temperatura do acelerômetro utilizado na instrumentação do Tribômetro (Adaptado de: Model 352C67 ICP® Accelerometer Installation and Operating Manual)	32
Figura 3.18 – Fixação do acelerômetro e derivação da sensibilidade (Adaptado de: Model 352C67 ICP®)	33
Figura 3.19 – Acelerômetro utilizado na instrumentação do Tribômetro (< http://www.pcb.com/Accelerometers/Default.asp >).....	34
Figura 3.20 – Placa de aquisição de dados utilizada na instrumentação do Tribômetro (USB Dynamic Signal Acquisition)	35
Figura 3.21 – Interface do programa de monitoramento dos sinais adquiridos dos sensores.	36
Figura 4.1 – Interface do programa de monitoramento de vibrações	39
Figura 4.2 – Fluxograma do programa de monitoramento de vibrações (PAULO et al., 2008)	40
Figura 4.3 – Tribômetro (Drill Pipe) utilizado na validação do sistema de monitoramento de vibrações	41
Figura 4.4 – Ensaio realizado com acelerômetros em posições críticas do <i>Drill Pipe</i>	42
Figura 4.5 – Espectros de magnitude dos dados dos acelerômetros nas posições críticas..	43
Figura 4.6 – Alinhamento do LVDT que limita o desgaste	45
Figura 4.7 – Verificação do alinhamento do LVDT utilizando nível de bolha	46
Figura 4.9 – Posicionamento do relógio comparador para verificação do LVDT.....	47
Figura 4.10 – Diferença entre os valores medidos pelo LVDT da esquerda e o relógio comparador no avanço e recuo	48

Figura 4.11 – Relação entre os valores medidos pelo LVDT da esquerda e o relógio comparador, no avanço e recuo, após correção do erro característico do LVDT.	49
Figura 4.12 – Detalhes do posicionamento do relógio comparador para verificação do LVDT do lado direito.	50
Figura 4.13 – Diferença dos valores medidos pelo LVDT da direita e o relógio comparador, no avanço e recuo	50
Figura 4.14 – Diferença de valores medidos pelo LVDT da direita e o relógio comparador, no avanço e recuo, após correção do erro característico do LVDT	51
Figura 4.15 – Ajuste do alinhamento do LVDT utilizando um esquadro.	52
Figura 4.16 – Diferença de medição entre o LVDT da vertical e o relógio comparador, no movimento oscilatório	54
Figura 4.17 – Diferença de medição entre o LVDT da vertical e o relógio comparador, após correção do erro característico do LVDT.	55
Figura 4.18 – Sistema de compressão das amostras: a) Parte do Tribômetro onde atua a compressão; b) Célula de carga que mede a força de compressão	56
Figura 4.19 – Curva de pressão em função da corrente de ativação da válvula proporcional de redução de pressão (<i>Bosch Rexroth</i>).	58
Figura 4.20 – Bloco de válvula da unidade hidráulica mostrando manômetro digital do sistema de compressão e válvulas do Tribômetro.	58
Figura 4.21 – Pressão verificada no manômetro digital em função da corrente de ativação aplicada à válvula de redução proporcional de pressão.	59

Figura 4.22 – Curva do percentual da pressão máxima da válvula pela corrente de ativação da válvula proporcional de redução de pressão, com pressão máxima de 31 MPa.....	60
Figura 4.23 – Curva de operação do sistema hidráulico de compressão.....	61
Figura 4.24 – Relação entre os valores de pressão e forças das duas células de carga em função da corrente de ativação.....	62
Figura 4.25 – Sistema de movimentação vertical do duto flexível: a) Eixo central. b) LVDT do sistema de oscilação.....	63
Figura 4.26 – Deslocamento do eixo central medido através do LVDT, sistema com pressão máxima de 3 MPa e vazão em 15%.....	64
Figura 4.27 – Velocidade do sistema de oscilação em função do percentual de ativação da válvula de controle de vazão, com pressão limitada em 15 MPa.....	66
Figura 4.28 – Comportamento da velocidade de oscilação em função do percentual de ativação da válvula de controle de vazão, com três configurações de pressão máxima, sem atuação do sistema de compressão.....	67
Figura 4.29 – Detalhamento do comportamento da velocidade de oscilação, com pressão limitada a 6 MPa, sem utilização do sistema de compressão.....	68
Figura 5.1 – Recipiente de água instalado no Tribômetro para a realização de ensaios submersos.....	70
Figura 5.2 – Apresentação da área de contato na amostra de enrijecedor.....	71
Figura 5.3 – Equipamento montado para os ensaios com o sistema completo.....	73
Figura 5.4 – Ponto de instalação do acelerômetro 00.....	74
Figura 5.5 – Ponto de instalação do acelerômetro 01.....	75

Figura 5.6 – Ponto de instalação do acelerômetro 02	75
Figura 5.7 – Ponto de instalação do acelerômetro 03	76
Figura 5.8 – Teste de percepção de um impacto pelos acelerômetros	77
Figura 5.9 – Vibração gerada pelos movimentos dos cilindros hidráulicos de compressão .	78
Figura 5.10 – Análise na frequência da vibração devido aos movimentos dos cilindros hidráulicos de compressão	78
Figura 5.11 – Amplitude de vibração percebida pelo acelerômetro 00 no Ensaio 15, num ciclo completo de movimentação do eixo central, compressão: 20 % e oscilação: 20%	80
Figura 5.12 – Exemplo de variação do nível de amplitude de vibração, com o sistema de oscilação: parado; descendo e subindo. Sinais captados pelo acelerômetro 02, no Ensaio 15.....	81
Figura 5.13 – Comparação de amplitude de aceleração medida pelo acelerômetro 03, no Ensaio 1, eixo central: parado, descendo e subindo.....	82
Figura 5.14 – Comparação do deslocamento medido pelo acelerômetro 03, no Ensaio 1, sistema de oscilação: parado, descendo e subindo	83
Figura 5.15 – Comparação do deslocamento medido pelo acelerômetro 03, no Ensaio 8, sistema de oscilação: parado, descendo e subindo	83
Figura 5.16 – Comparação do deslocamento medido pelo acelerômetro 03, no Ensaio 15, sistema de oscilação: parado, descendo e subindo	84
Figura 5.17 – Deslocamento registrado pelo LVDT que limita o desgaste em ensaios, do lado direito em diversas velocidades de oscilação; com compressão em 10% e eixo central subindo.....	86

- Figura 5.18 – Diferenças de deslocamento medidas pelos LVDTs que limitam o desgaste das amostras a direita e a esquerda; compressão em 15%; oscilação em 18%; nos movimentos de subida e descida do eixo central. 87
- Figura 5.19 – Efeito da velocidade de oscilação no deslocamento medido pelos LVDTs que limitam desgaste a esquerda e a direita, utilizando uma compressão em 20%, oscilação em 12% e 20% para o eixo central descendo 88
- Figura 5.20 – Evolução da força de compressão na célula de carga da direita, em um ciclo completo, em função de diferentes velocidades de oscilação (12%, 16% e 20%), e compressão em 10%. 89
- Figura 5.21 – Evolução da força medida pela célula de carga do sistema de compressão, lado direito, em um ciclo completo, para uma compressão em 20% e oscilação em 12%; 16% e 20%. 90
- Figura 5.22 – Força de compressão medida pela célula de carga da esquerda, num ciclo completo de oscilação, com compressão em 15% e oscilação em: 12%; 16% e 20%. 91
- Figura 5.23 – Força de compressão medidas pelas células de carga da esquerda e da direita em um ciclo completo, com compressão em 15%, e oscilação 16%. 92
- Figura 5.24 – Comparação das forças atuantes no sistema de oscilação, célula de carga superior, compressão em 20%, percentuais de oscilação mostrados no gráfico, movimento completo do eixo: parado, descendo e subindo. 93
- Figura 5.25 – Evolução da velocidade de movimentação do eixo central em um ciclo completo, compressão em 15%, e oscilação em 14% 95

LISTA DE TABELAS

Tabela 4.1 – Valores do Certificado de Calibração do LVDT posicionado a esquerda das amostras (HBM)	46
Tabela 4.2 – Valores do Certificado de Calibração do LVDT posicionado a direita das amostras (HBM)	46
Tabela 4.3 – Valores do Certificado de Calibração do LVDT da oscilação (HBM)	54
Tabela 4.4 – Dados do ensaio de deslocamento do eixo central.	64
Tabela 4.5 – Relação entre as diferentes configurações do sistema hidráulico e o tempo de deslocamento do eixo vertical.	65
Tabela 4.6 – Relação entre as diferentes configurações do sistema hidráulico e a velocidade de deslocamento do eixo vertical.	65
Tabela 5.1 – Percentuais de ativação da válvula de controle de compressão, força adquirida com sistema estático e pressão de contato das amostras calculada com o uso destes valores de força e com a área de contato de $0,02067 \text{ m}^2$	72
Tabela 5.2 – Percentuais utilizados para oscilação nos ensaios com o sistema completo e velocidades de subida e descida medidas sem uso de compressão	72
Tabela 5.3 – Parâmetros dos ensaios com o sistema completo	72
Tabela 5.4 – Parâmetros de operação do Tribômetro selecionados para análise de vibrações	79
Tabela 5.5 – Amplitude máxima de aceleração, referente à vibração	79
Tabela 5.6 – Amplitude de deslocamento da superfície onde está fixado o acelerômetro 01, no movimento de descida do eixo central, nas frequências de amplitudes críticas	84

Tabela 5.7 – Amplitude de deslocamento da superfície onde está fixado o acelerômetro 01, no movimento de subida do eixo central, nas frequências de amplitudes críticas	85
Tabela 5.8 – Força média medida pelas células de carga do sistema de oscilação do eixo central, com diferentes níveis de compressão.....	93
Tabela 5.9 – Velocidade de movimentação do eixo central, em mm/s.	95

LISTA DE ABREVIações E SÍMBOLOS

A: área da secção transversal do condutor elétrico [m^2]

CLP: Controlador Lógico Programável

E: módulo de elasticidade do material

F: força [N]

IHM: interface homem-máquina

l: comprimento do condutor elétrico [m]

LVDT: *linear variable differential transformer*

P: pressão [Pa]

R: resistência elétrica [Ω]

rms: valor quadrático médio ou rms (root mean square) ou valor eficaz é uma medida estatística da magnitude de uma quantidade variável.

ρ : resistividade elétrica [Ω/m^2]

σ : tensão normal

ε : deformação específica

SUMÁRIO

CAPÍTULO 1 – INTRODUÇÃO.....	1
1.1 Motivação e justificativa	1
1.2 Objetivo do trabalho.....	6
1.3 Organização do trabalho.....	6
 CAPÍTULO 2 – DESCRIÇÃO DO TRIBÔMETRO CONSTRUÍDO PARA REALIZAR ENSAIOS DE DESGASTE POR DESLIZAMENTO.....	 7
2.1 Sistema mecânico.....	7
2.2 Estrutura de sustentação do sistema dinâmico.....	11
2.3 Sistema hidráulico do Tribômetro	12
2.4 Controle do sistema hidráulico.....	13
 CAPÍTULO 3 - INSTRUMENTAÇÃO DO TRIBÔMETRO.....	 17
3.1 Introdução.....	17
3.2 Monitoramento das forças de compressão e oscilação.....	17
3.3 Monitoramento de deslocamento dos cilindros horizontais e verticais	22
3.4 Monitoramento da temperatura do tanque de ensaio.....	26
3.5 Condicionador dos sinais gerados pelos sensores de força, deslocamento e temperatura.....	29
3.6 Monitoramento da vibração do Tribômetro durante o ensaio.....	29
3.7 Programa de aquisição de dados e monitoramento dos sinais dos sensores.....	35
3.8 Limitação de deslocamento das hastes dos cilindros.....	36
 CAPÍTULO 4 – PROCEDIMENTOS PRÁTICOS PARA A INSTRUMENTAÇÃO	 38
4.1 Ensaios para validação do monitoramento de vibrações.....	38
4.2 Ensaios de verificação do funcionamento das chaves fim-de-curso	44
4.3 Integração ao sistema e verificação do funcionamento dos LVDTs do sistema de compressão.....	45
4.4 Integração ao sistema e verificação do funcionamento do LVDT do sistema de oscilação.....	52
4.5 Verificação do funcionamento do sistema de compressão.....	56
4.6 Verificação do funcionamento do sistema de oscilação.....	63

CAPÍTULO 5 – VERIFICAÇÃO DA INSTRUMENTAÇÃO DO TRIBÔMETRO COM O SISTEMA COMPLETO E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS.....	69
5.1 Preparação do Tribômetro para realização dos ensaios com toda a instrumentação instalada.....	69
5.2 Monitoramento de vibrações nos ensaios com o sistema completo	73
5.3 Verificação da instrumentação do sistema de limitação de desgaste das amostras	85
5.4 Sistema de monitoramento da força de compressão das amostras.....	88
5.5 Sistema de monitoramento da força de oscilação do eixo central	92
5.6 Sistema de monitoramento da velocidade de oscilação do eixo central.....	94
 CONCLUSÕES.....	 96
 TRABALHOS FUTUROS.....	 98
 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	 99

CAPÍTULO I

INTRODUÇÃO

1.1 Motivação e Justificativa

Com a diminuição dos recursos naturais e a aspiração das pessoas a um melhor padrão de vida, faz-se necessário utilizar os materiais advindos da natureza de maneira eficaz e prudente. Neste sentido, a tribologia, ciência e tecnologia de superfícies que se interagem através de movimento relativo, oferece importantes contribuições, que têm levado a uma maior durabilidade de peças e componentes, menor uso de recursos naturais e, reduções de custos de produção.

O transporte de petróleo e gás das cabeças dos poços de petróleo no fundo do mar até a plataforma de petróleo é realizado através do uso de dutos flexíveis. Os dutos flexíveis são as linhas flexíveis de condução de petróleo e outros produtos retirados dos poços. Estes dutos são compostos de camadas com funções bem definidas no comportamento dinâmico-estrutural do duto-flexível, e conferem a este componente o adequado desempenho à aplicação em alto-mar. Dentre as vantagens da utilização dos dutos flexíveis esta a rapidez de seu lançamento e recolhimento. Além disso, a sua característica de flexibilidade estrutural permite a acomodação mais eficiente dos carregamentos dinâmicos impostos pelos sistemas de produção, operando em alto-mar (RAMOS NETO, 2011).

Neste contexto, este trabalho está inserido em uma pesquisa de tribologia envolvendo o estudo de atrito, desgaste, que procura selecionar e qualificar materiais usados no par tribológico capa polimérica externa de dutos flexíveis e enrijecedores, de tal forma a se ter o menor desgaste possível ao levarem o óleo do fundo do mar até a plataforma. O material que constitui os dutos flexíveis sofre grande desgaste, devido à ação:

do movimento das correntes marítimas e da pressão elevada das águas profundas sobre os mesmos (SOUZA, 2000). A Figura 1.1 ilustra uma plataforma com os dutos flexíveis.

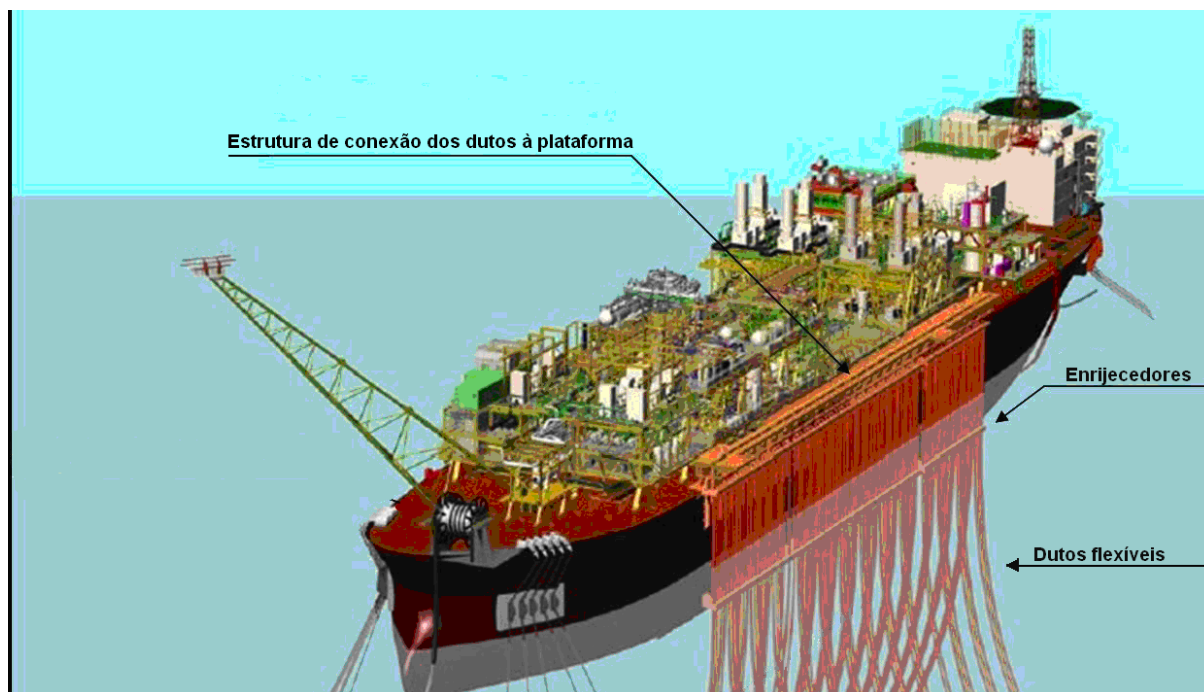


Figura 1.1 – Visão geral do projeto da plataforma P50 (RAMOS NETO, 2010).

Estes dutos são revestidos por uma camada polimérica externa que serve de proteção às camadas internas de metal. As camadas poliméricas internas e a externa também propiciam maior flexibilidade do duto para que este suporte o movimento da água. Para a ligação do duto flexível à plataforma, este atravessa um conector boca de sino e um enrijecedor (*bend stiffener*), que faz o amortecimento do movimento do duto na ligação com a plataforma. Os enrijecedores são constituídos de polímero na parte de contato com o duto flexível. Assim, a camada polimérica externa do duto sofre desgaste quando em contato e movimento relativo com o enrijecedor. Esse desgaste acarreta necessariamente o reparo do mesmo ou até mesmo a substituição de todo o duto, o que gera alto custo financeiro. Para prolongar a vida útil dos dutos flexíveis faz-se necessário escolher materiais poliméricos que sejam mais resistentes ao desgaste (HWANG et al., 2008).

As pesquisas na área de tribologia se justificam pela existência de poucos modelos teóricos, que possam ser usados como base na escolha do material que constituirá equipamentos que possuam superfícies em movimento relativo (SUH; SAKA, 1981), como acontece no problema citado acima na exploração de petróleo.

A compreensão do desgaste polimérico exige o conhecimento detalhado das propriedades de massa do material. Como foi observado por Briscoe e Tabor em 1981, não

existem informações suficientes sobre estas propriedades, o que levou ao necessário crescimento de pesquisa na área de materiais. Atualmente estas informações ainda não são suficientes, o que motiva a continuidade das pesquisas.

A combinação de metal e materiais poliméricos ocupa posição de destaque na composição de máquinas e equipamentos onde existem componentes que sofrem atrito. Esta combinação propicia resistência e durabilidade destes componentes (BARTENEV; LAVRENTEV, 1981). Este é o caso de composição dos dutos flexíveis.

A estrutura de um duto flexível, mostrada na Fig. 1.2, é basicamente composta de camadas de aço enroladas helicoidalmente e de camadas homogêneas de termoplásticos com diferentes geometrias e materiais.

A camada interna de termoplástico assegura a contenção do fluido transportado (óleo bruto, gás e água), ao passo que a externa oferece proteção contra corrosão, abrasão e proteção mecânica. As camadas helicoidais de aço provêm a resistência mecânica (SOUZA, 2000).



Figura 1.2 – Estrutura de um duto flexível (CHEN, 1995).

Para evitar flexão exagerada destes dutos são utilizados enrijecedores instalados aproximadamente a 30 m abaixo da conexão com a plataforma, que suavizam os raios de dobramento, gerados pelos movimentos causados por ondas e correntes marítimas.

As plataformas apresentam um movimento vertical gerado pelas ondas do mar, num ciclo aproximado de dez segundos. No momento da ascensão, o duto flexível é tracionado e deforma no sentido longitudinal (RAMOS NETO, 2010).

Para alcançar os poços, que não estão localizados na linha vertical da plataforma, os dutos flexíveis sofrem flexão a partir do enrijecedor. Além disto, as correntezas fazem com que oscilem lateralmente. Este movimento aumenta a pressão de contato no lado solicitado do enrijecedor, onde o valor das forças normais pode alcançar dezenas de toneladas (RAMOS NETO, 2010).

A Figura 1.3 mostra esquematicamente o duto flexível; o enrijecedor, e os sentidos de movimentação que causam a interação entre eles. Considerando as características de movimentação do duto em relação ao enrijecedor, pode-se afirmar que se trata de um sistema tribológico com baixas velocidades (4 mm/s) e altas cargas, num contato deslizante entre pares poliméricos no eixo vertical, submersos em água do mar.

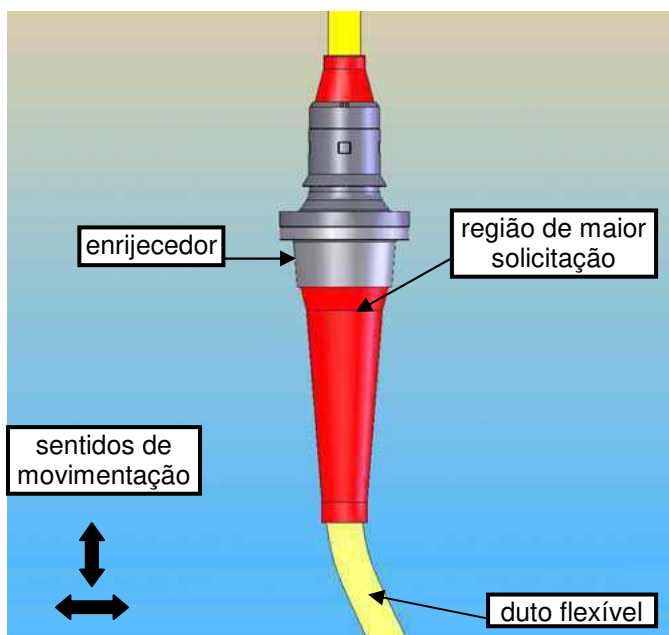


Figura 1.3 – Conexão do duto flexível com enrijecedor e movimentos do sistema tribológico (HWANG et al., 2008).

A movimentação desses dutos em relação à estrutura das plataformas pode resultar em apreciável desgaste da camada externa polimérica. Como consequência dessa movimentação, a capa polimérica, que usualmente é confeccionada em PE (polietileno), pode ser localmente destruída, como mostrado na Fig. 1.4, expondo a armadura na região do enrijecedor, e causando a inutilização do duto flexível (HWANG et al., 2008).

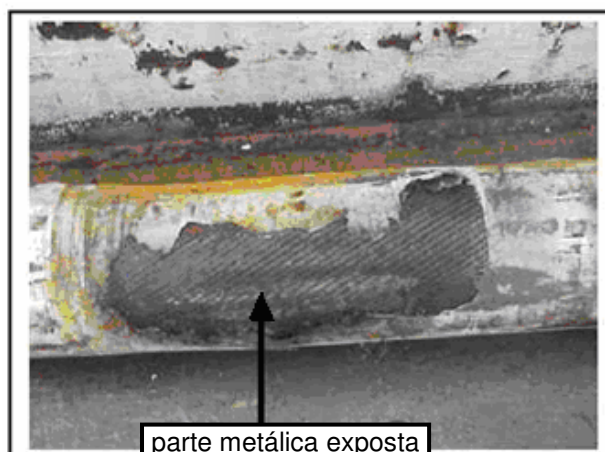


Figura 1.4 – Desgaste da capa externa do duto flexível (HWANG et al., 2008).

O desgaste na região do enrijecedor pode levar, num caso extremo, à interrupção da produção de um poço para reparo ou substituição do duto. É de fundamental importância que a qualificação de materiais poliméricos para a constituição do duto e do enrijecedor, seja estudada para se chegar a uma previsão confiável de vida útil dos mesmos (HWANG et al., 2008).

A seleção apropriada de um sistema de ensaios tribológicos e sua escala podem ter grande influência no mecanismo de desgaste (SAMYN, 2005b). Para a obtenção de dados relevantes para projetos de partes poliméricas sob altas cargas e baixas velocidades, as condições simuladas em laboratório devem ser as mais próximas possíveis das condições reais de aplicação (SAMYN, 2005a). Dificilmente podem ser feitas extrapolações e, quando feitas, podem resultar em erros importantes (SAMYN, 2005c), visto que, principalmente para polímeros, os mecanismos podem ser influenciados pela capacidade de formação de filme, fluência e área de contato (SAMYN, 2005a).

Efeitos de borda e concentração de tensões que se manifestam sob altas cargas são reduzidos devido à pequena fração de borda em relação ao volume total da amostra (SAMYN, 2005a). Estes autores verificaram também que o comportamento térmico do sistema em escala real é alterado, onde a condutividade térmica foi reduzida em 30% (HWANG et al., 2008).

Outro parâmetro dependente da escala é a mobilidade dos fragmentos de desgaste, que pode ser influenciada pelo tamanho da amostra, resultando em desempenhos que não correspondem aos observados em situações de campo (VERMEULEN, 1989).

Além disto, no caso de materiais com elevada elasticidade, a área de contato e a distribuição da carga passam a ser influenciadas pelo tamanho da amostra, apresentando um maior efeito de bordas (FRANCO, 2006).

Desta forma, a utilização de ensaios em escala reduzida para simular condições de campo é extremamente difícil, principalmente se, se considerar que materiais de diferentes comportamentos mecânicos podem estar envolvidos no contato duto flexível / enrijecedor.

1.2 Objetivo do trabalho

Para a realização dos ensaios de desgaste em escala real em dutos flexíveis, foi desenvolvido, projetado e construído o Tribômetro de Grandes Dimensões (TGD) pela equipe do Laboratório de Tecnologia em Atrito e Desgaste (LTAD) da Universidade Federal de Uberlândia. Neste contexto se insere o presente trabalho, que tem por objetivo instrumentar o TGD através do uso de sensores específicos, monitorar e avaliar o sistema com relação às forças aplicadas, deslocamentos, vibrações e temperaturas, possibilitando o funcionamento deste TGD de forma automatizada.

1.3 Organização do trabalho

No Capítulo 2, o Tribômetro para ensaios de desgaste por deslizamento é descrito. A instrumentação do TGD é detalhada no Capítulo 3. O procedimento experimental executado para verificação do funcionamento da instrumentação é descrito no Capítulo 4. A verificação da instrumentação com o TGD completo e discussões do resultado são apresentados no Capítulo 5. Em seguida, são apresentadas a conclusão deste trabalho e as sugestões para trabalhos futuros e, por fim, enumeram-se as referências bibliográficas.

CAPÍTULO II

DESCRIÇÃO DO TRIBÔMETRO CONSTRUÍDO PARA REALIZAR ENSAIOS DE DESGASTE POR DESLIZAMENTO

2.1 Sistema mecânico

O Tribômetro de Grandes Dimensões (TGD) para ensaios de desgaste por deslizamento em dutos flexíveis, a que se refere este trabalho, foi desenvolvido no Laboratório de Tecnologia em Atrito e Desgaste (LTAD) da Universidade Federal de Uberlândia.

Esse TGD foi concebido para simular em escala real os eventos de desgaste por deslizamento, a que estão submetidos os dutos flexíveis de petróleo, bem como as pressões de contato entre estes e os seus enrijecedores. A ilustração da Fig. 2.1 mostra o par em questão: amostra de duto flexível e do enrijecedor.

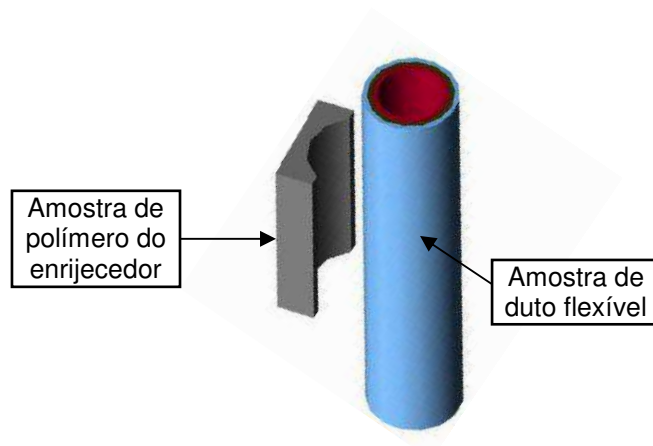


Figura 2.1 – Representação do par tribológico duto flexível / enrijecedor (HWANG et al., 2008).

Como a direção da movimentação do duto flexível no mar é vertical, no TGD um par de cilindros hidráulicos, posicionados verticalmente simula esse movimento da amostra de duto flexível, com um curso máximo de 200 mm. Outro par de cilindros, no eixo horizontal, aplica pressões de contato de duas amostras de enrijecedor contra a amostra de duto flexível. Na Figura 2.2 estão ilustrados os dois pares de cilindros responsáveis pela aplicação dos esforços e movimentação da amostra de duto flexível.

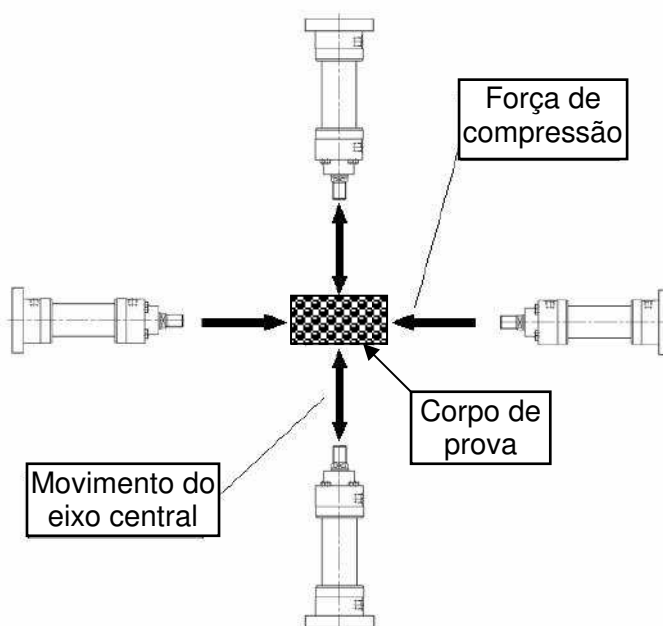


Figura 2.2 – Concepção do sistema de aplicação de esforços e movimentação do Tribômetro (HWANG et al., 2008).

O uso do eixo vertical de movimentação permite uma condição tal que simula o movimento real das partículas de desgaste, pois este sentido de movimento pode apresentar comportamentos e trajetórias diferentes de um sistema horizontal (HWANG et al, 2008).

Os cilindros horizontais são conectados em circuitos hidráulicos separados, para possibilitar o posicionamento individual de cada um deles. Assim, ajustes de posicionamento podem ser executados com facilidade.

Duas amostras de polímero são comprimidas contra a amostra de duto flexível, posicionada no centro do Tribômetro. A Figura 2.3 apresenta a parte central do TGD. As amostras de polímero do enrijecedor estão encaixadas dentro dos porta-amostras e o duto flexível é montado sobre um cilindro rígido no eixo vertical, denominado neste trabalho de eixo central.

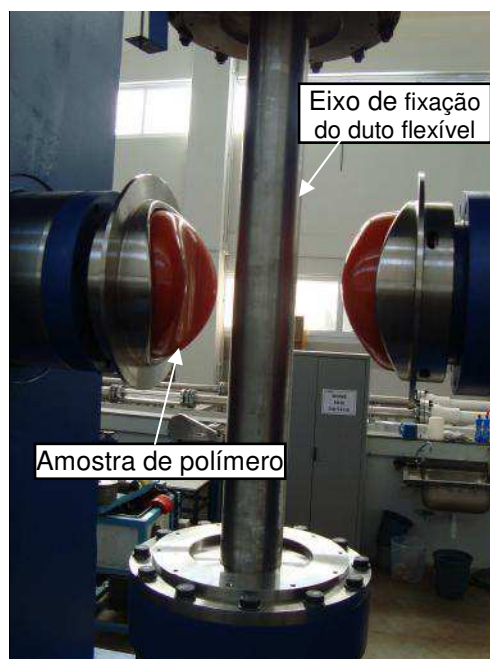


Figura 2.3 – Detalhes das amostras de polímeros do enrijecedor no Tribômetro.

Para se verificar a força exercida na compressão das amostras, entre os cilindros hidráulicos e as amostras foram incluídas duas células de carga, ver Fig. 2.4. Os cilindros hidráulicos que fazem a compressão têm classe de pressão de 25 MPa, e são impulsionados por uma bomba hidráulica acionada por um motor elétrico com potência de 15 CV (ou 11 kW). A força de compressão das amostras é controlada automaticamente por uma válvula proporcional redutora de pressão.

O monitoramento do desgaste das amostras é realizado, através da medição da espessura das amostras, sob pressão constante, no decorrer do ensaio. Este monitoramento utiliza dois sensores de deslocamento LVDT (*linear variable differential transformer*), posicionados paralelamente ao deslocamento dos cilindros hidráulicos horizontais do sistema de compressão.

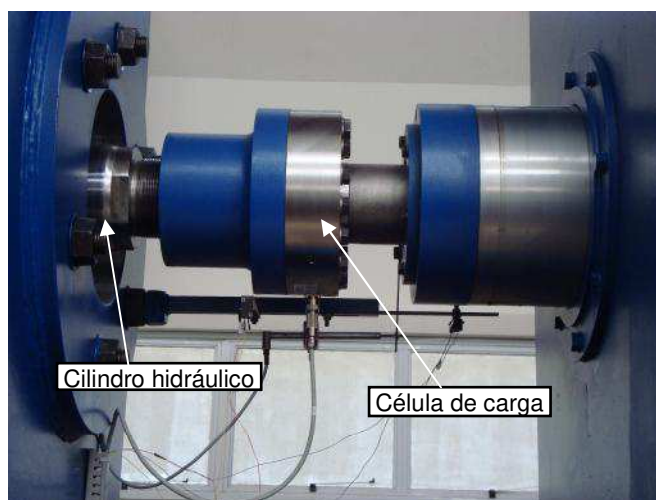


Figura 2.4 – Detalhes do sistema de compressão.

O movimento oscilatório do TGD é gerado por um motor elétrico de potência de 25 CV (ou 18 kW), que aciona uma bomba hidráulica. Essa bomba alimenta os cilindros hidráulicos. São utilizadas válvulas direcionais que fazem à intercomunicação dos cilindros hidráulicos: superior e inferior, possibilitando que estes trabalhem em conjunto, um fazendo força de compressão e o outro de tração. Este trabalho move a amostra de duto flexível em um sentido. Ao atingir um limite de deslocamento o trabalho dos cilindros hidráulicos se inverte mudando o sentido de movimentação do duto flexível.

O movimento oscilatório é realizado utilizando-se um controle em malha fechada, tendo como parâmetro de controle a velocidade do movimento de oscilação, que será verificada por um LVDT que acompanha o movimento de oscilação. Duas células de carga instaladas entre os cilindros hidráulicos e a amostra de duto flexível monitoram a força aplicada no sistema durante os ensaios, possibilitando o cálculo do coeficiente de atrito. O sistema mecânico do TGD está ilustrado na Fig. 2.5.

Durante os ensaios, as amostras são submersas em água resfriada para que o ensaio reproduza de maneira mais próxima ao sistema real, tanto no que se refere ao comportamento térmico, bem como no movimento das partículas resultantes do desgaste dos materiais.

A vibração do equipamento é acompanhada por quatro acelerômetros fixados em pontos de maior vibração (LADEIRA, 2009). As informações recebidas pelos condicionadores de sinais dos sensores são transmitidas a um computador e tratadas por um programa. Os dados adquiridos pelos computadores utilizados nos sistemas de controle do TGD são transmitidos ao CLP onde são processados os sistemas de controle. O processo de instrumentação do TGD é detalhado no Capítulo 3 desta dissertação.

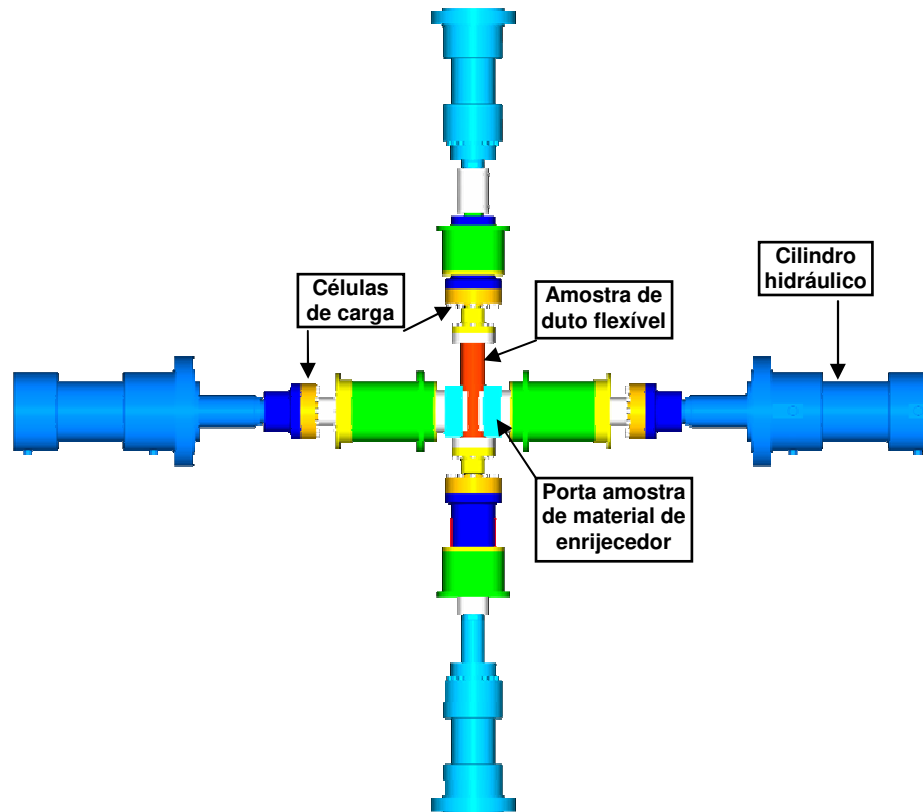


Figura 2.5 – Detalhes do acoplamento dos cilindros ao sistema (HWANG et al., 2008).

2.2 Estrutura de sustentação do sistema dinâmico

O Laboratório de Tecnologia em Atrito e Desgaste desenvolveu o projeto da estrutura de sustentação do sistema dinâmico. Nesse contexto, foi realizado um estudo dos parâmetros mecânicos tendo em vista a definição da estrutura de suporte do TGD. Especial ênfase foi dada a aspectos de rigidez e tensões nominais, de tal forma a garantir a estabilidade do sistema durante a operação. O fator custo precisou também ser considerado, de modo a se conseguir efetivar a contratação do serviço de construção da estrutura (FRANCO, 2010). A estrutura, mostrada na Fig. 2.6, possui: 4,0 m de altura; 4,7 m de comprimento; 1,7 m de largura; e massa de 20.000 kg.



Figura 2.6 – Estrutura do Tribômetro de Grandes Dimensões.

2.3 Sistema hidráulico do Tribômetro

O sistema hidráulico do TGD foi adquirido do mercado com configuração especial de acordo com o projeto feito pelo LTAD para a construção do TGD.

Conforme relatório interno de Moraes (2008), os cilindros hidráulicos foram especificados para exercerem força de até 1 MN. As válvulas hidráulicas controlam os movimentos dos cilindros e a forças exercidas por eles.

O sistema de oscilação dos cilindros hidráulicos é acionado através de uma válvula direcional proporcional, que faz controle da direção do fluxo hidráulico e da vazão. O controle do êmbolo é feito por meio de um solenóide proporcional. A pressão máxima de operação desta válvula é de 31,5 MPa. Esta válvula possui eletrônica de comando integrada com sinal de comando de ± 10 V, máxima histerese menor que 5%, faixa de inversão menor que 1%, sensibilidade de resposta menor que 0,5%.

O sistema de compressão do corpo de prova é acionado através de uma válvula proporcional redutora de pressão de três vias, que controla pressão até 31,0 MPa, e permite vazão de até $2,4 \text{ m}^3 / \text{h}$. Esta válvula possui eletrônica de comando integrada com sinal de comando de ± 10 V e máxima histerese menor que 1%.

As bombas hidráulicas deste sistema são de pistão axial variável, com pressão de trabalho máxima de 35,0 MPa, com sistema de controle de carga e vazão.

O sistema hidráulico é movido por três motores elétricos, ver Fig. 2.7. O motor à esquerda na Figura 2.7a é do sistema de oscilação dos cilindros hidráulicos e possui potência de 25 CV (ou 18 kW). O motor à direita na Figura 2.7a é do sistema de compressão do corpo de prova e possui a potência de 15 CV (ou 11 kW). O motor da Figura 2.7b pertence ao sistema de recirculação e filtragem do óleo e tem potência de 3 CV (2,2 kW).



Figura 2.7 – Motores elétricos do sistema hidráulico: a) Motor do sistema de oscilação e motor do sistema de compressão, b) Motor do sistema de recirculação de óleo.

2.4 Controle do sistema hidráulico

O acionamento dos motores elétricos do sistema hidráulico é realizado através de um painel elétrico central. Este painel contém um sistema de comando e proteção do sistema elétrico de acionamento dos motores.

A partida do motor elétrico da bomba do sistema de compressão é executada por uma chave estrela-triângulo, onde circuitos elétricos com contatores diminuem a tensão de alimentação, aumentam a impedância, diminuindo a corrente e o conjugado do motor no momento da partida. O comando da partida do motor elétrico da bomba do sistema de oscilação, por sua vez, é feito através de Softstart (chave de partida estática, destinada à aceleração, desaceleração e proteção de motores de indução trifásicos, mediante o ajuste do ângulo de disparo de tiristores (WEG, 2011)). Os acionamentos dos motores elétricos são realizados através de botões tipo pulsadores, de liga e desliga, instalados na porta do painel elétrico, mostrados na Fig. 2.8.

Para estes motores, foram instalados sinalizadores na porta do painel elétrico com as funções de:

- Bomba Oscilação Ligada;
- Bomba Oscilação Desligada;
- Falha Bomba Oscilação;
- Bomba Recirculação Ligada;

- Bomba Recirculação Desligada;
- Falha Bomba Recirculação;
- Bomba Compressão Ligada;
- Bomba Compressão Desligada;
- Falha Bomba Compressão;
- Sobrecarga dos Motores.

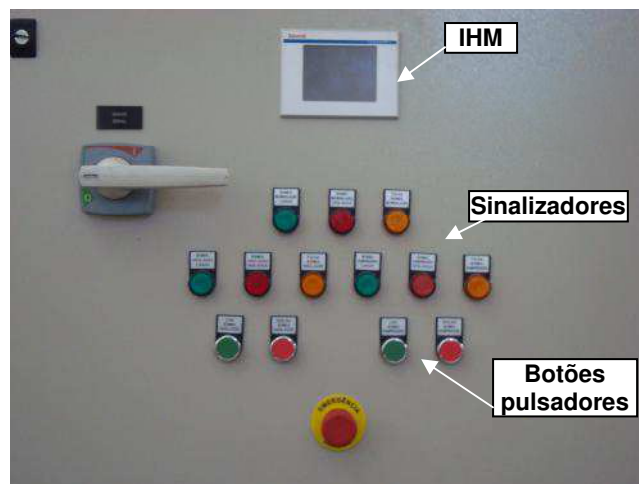


Figura 2.8 – Parte externa do painel elétrico do Tribômetro.

O CLP (Controlador Lógico Programável) modelo: IndraControl L10, fabricado pela Rexroth, ilustrado na Fig. 2.9, tem a função de coordenar todos os movimentos necessários na preparação para os ensaios e durante os ensaios seguindo a programação e os parâmetros especificados, a saber: quantidade de ciclos de oscilação; valor das forças de compressão; velocidade de deslocamento do eixo central com a amostra de duto flexível; deslocamento total do eixo central; máximo deslocamento dos cilindros; e temperatura da água do tanque de ensaio.



Figura 2.9 – CLP utilizado no controle do sistema.

O CLP aciona as válvulas proporcionais de controle de vazão e pressão e recebe sinais dos sensores de posições e de força das células de cargas que estão instalados no TGD para o controle em malha fechada. Ele recebe também informações de nível e temperatura do óleo do reservatório para fazer o controle e monitoração de todo o sistema hidráulico, inclusive do sistema de filtragem e refrigeração do óleo.

A IHM (Interface homem-máquina) conectada ao CLP está instalada na porta do painel de controle, conforme Fig. 2.8. Ela está programada para permitir ao usuário selecionar a forma de acionamento do sistema hidráulico que pode ser manual ou automático.

Ao ser selecionada a forma de acionamento manual, ver Fig. 2.10, estando ligados os motores das duas bombas hidráulicas de movimentação dos cilindros, bem como o motor da bomba de refrigeração, e não havendo nenhuma mensagem de alarme, poderá ser ativado este comando. A sua seleção é feita através de botão na tela da IHM e, uma vez acionado, não havendo mensagens de erro procede-se um ajuste da porcentagem de vazão da válvula que controla a compressão, bem como o ajuste da porcentagem de abertura da válvula de controle de pressão que aciona a oscilação do sistema. Após este ajuste, é possível, através de um botão na tela da IHM, avançar ou retornar os cilindros hidráulicos de compressão e de oscilação. Estes comandos são individualizados para que se possa ajustar os cilindros durante o posicionamento dos corpos de prova, o movimento dos cilindros é limitado por chaves fim-de-curso ligadas ao CLP.

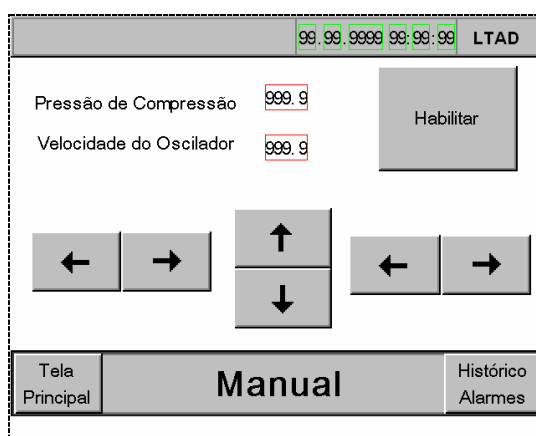


Figura 2.10 – Tela da IHM para operação manual do Tribômetro.

A ativação do sistema em modo automático é realizada pela seleção do modo de acionamento e do botão “INICIAR”. O processo se inicia estando ligados todos os motores elétricos das bombas e não havendo nenhuma mensagem de alarme. Com as condições iniciais atendidas os cilindros de compressão são avançados com os valores de pressão

ajustados anteriormente. O movimento dos cilindros é acompanhado pelo sensor de pressão e pelas células de cargas. Estes valores são informados, e caso venha a ser ultrapassado algum dos valores estabelecidos, é acionado o alarme e todo o sistema irá parar. Essas são condições para que haja movimento dos cilindros hidráulicos de compressão: bomba hidráulica do sistema de compressão ligada; válvula direcional de ventagem ligada; válvula proporcional de controle de pressão ativa; válvula direcional digital esteja ativa para os dois cilindros.

Após sistema de compressão atingir o parâmetro de força pré-determinado, o sistema de oscilação será acionado, iniciando o movimento de oscilação. Este movimento de oscilação é acompanhado pela leitura de um LVDT, e deve ter seu curso igual ao determinado pelo operador no sistema de controle. Essas são condições para o movimento: bomba hidráulica sistema de oscilação ligada; válvula direcional de ventagem ligada; válvula direcional proporcional ativa.

Paralelamente são monitorados os valores das células de carga. Caso venha a ocorrer uma diferença, entre o valor de pré-determinado e o valor real, maior ou igual a um valor máximo determinado: o sistema é desligado; aciona um alarme e mostra uma mensagem do motivo de acionamento do sistema de segurança.

Um dos objetivos deste sistema é medir o desgaste dos corpos de prova. Assim, ao iniciar o sistema, o operador determina os limites de deslocamento dos cilindros horizontais. Caso esses valores sejam ultrapassados, o teste é encerrado. Esses limites servem ainda de proteção para o sistema, caso haja algum acidente ou avaria de componentes. O sistema pode ainda ser interrompido por sinais indicativos de vibração excessiva. Esse sinal digital é enviado pelo computador que monitora as vibrações no TGD.

Não sendo encerrado o teste pelos fatores mencionados, o ensaio é finalizado pelo número de ciclos atingido (um ciclo equivale a uma oscilação completa).

Após ter finalizado o ensaio, seja pelo número de ciclos, seja por interrupção segue-se o seguinte procedimento para abrir cilindros de compressão: bomba hidráulica do sistema de compressão ligada; válvula direcional de ventagem ligada; válvula proporcional de controle de pressão ativa; válvulas direcionais digitais dos cilindros de compressão, ativas.

O desligamento dos motores elétricos das bombas hidráulicas pode ser feito através dos botões desliga ou através do botão de comando de emergência, todos instalados na parte frontal do painel elétrico. O operador também pode escolher qual motor deseja desligar, porém, para desligar o motor da bomba de refrigeração, é necessário que as duas bombas principais estejam também desligadas.

CAPÍTULO III

INSTRUMENTAÇÃO DO TRIBÔMETRO

3.1 Introdução

Após conhecer a mecânica do TGD, descrita no Capítulo 2, foi feita uma revisão bibliográfica do funcionamento de sensores e condicionadores de sinais que poderiam ser utilizados na instrumentação do TGD. Foi realizado um projeto de instrumentação do TGD, utilizando os sensores mais adequados ao trabalho mecânico a ser realizado no desgaste por deslizamento. Neste Capítulo é apresentado um resumo da revisão teórica dos sensores escolhidos para a instrumentação e a atuação destes sensores no trabalho mecânico realizado pelo TGD.

3.2 Monitoramento das forças de compressão e oscilação

Em 1678, Robert Hooke estabeleceu a relação que existe entre tensões e deformações em corpos submetidos a solicitações mecânicas, como apresentado na Eq. 3.1, onde: σ é a tensão normal; E é o módulo de elasticidade do material e ϵ a deformação específica.

$$\sigma = E \times \epsilon \quad (3.1)$$

Se o material for isótropo e homogêneo e seu limite elástico não for superado, então se verifica que a relação entre a tensão aplicada e a deformação sofrida pelo material é linear. Esta relação é utilizada no sensor célula de carga, que pela deformação sofrida no corpo quantifica a força aplicada. Na questão de deformação de materiais também, de

acordo com o princípio físico expresso pela Eq. 3.2, ao se tensionar uma barra de um condutor aumentando o comprimento l , a área da seção transversal A diminui, aumentando a resistência R , e ao se comprimir esta barra na direção do comprimento, a seção transversal aumenta, diminuindo a resistência.

$$R = \rho \times \frac{l}{A} \quad (3.2)$$

Com a relação de Hooke, Eq. 3.1, de deformação mecânica e com o princípio de deformação de condutores elétricos criaram-se os extensômetros. Dentre os diferentes procedimentos existentes para converter deformações mecânicas em sinais elétricos proporcionais, o mais conhecido é o que utiliza elementos cuja resistência elétrica varia em função de pequenas deformações longitudinais. Esses elementos são pequenas células extensiométricas fixadas na superfície do corpo de prova, formando um conjunto solidário, que recebe o nome de célula de carga. A Figura 3.1 é apresentada a ilustração de um extensômetro, a variação de resistência pode ser medida de maneira eficaz por um circuito tipo ponte de Wheatstone (FIALHO, 2004).

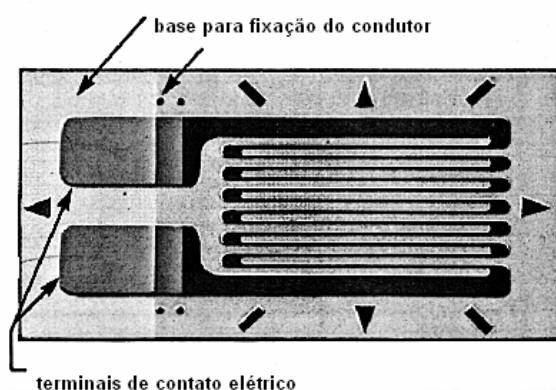


Figura 3.1 – Ilustração de um *strain gauge* (<<http://www.circuitstoday.com/strain-gauge>>).

A célula de carga atua na medição de força quando sofre deformação de sua estrutura devido à aplicação de força em sua superfície externa. O material utilizado na construção das células de carga deve ser elástico, e possuir certas características especiais, tais como: elevada rigidez; elevada carga para ruptura; elevado limite elástico; baixo módulo de elasticidade.

As células de carga construídas com *strain-gauges* podem ter diversos tipos de construção, se adequando ao uso e a faixa de força aplicada. Os *strain gauges* estão

aderidos às superfícies do corpo que sofrem a mesma deformação que a estrutura da célula de carga. Na Fig. 3.2 são exemplificadas formas de construção de células de carga. A letra T identifica os *strain gauges* que medem a força de tração e a letra C identifica os *strain gauges* que medem força de compressão.

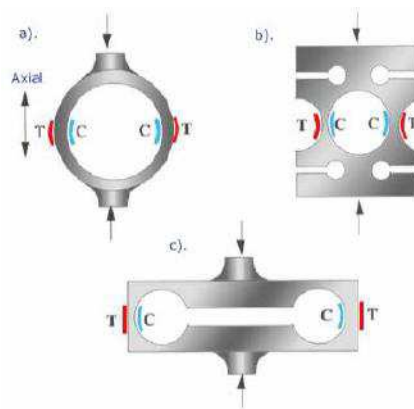


Figura 3.2 – Exemplos de construção de células de carga.

Como visto no Capítulo 2, as forças que os dois cilindros hidráulicos fazem para comprimir as amostras de enrijecedor contra a amostra de duto flexível, bem como as forças que os outros dois cilindros fazem para movimentar o duto flexível são medidas através de quatro células de carga. As células de carga são os sensores de força mais adequados para a faixa de forças aplicadas no TGD e para os movimentos dinâmicos do sistema. A Figura 3.3 apresenta uma foto da célula de carga instalada na parte superior do sistema de oscilação, acima do eixo central e abaixo do cilindro hidráulico superior.

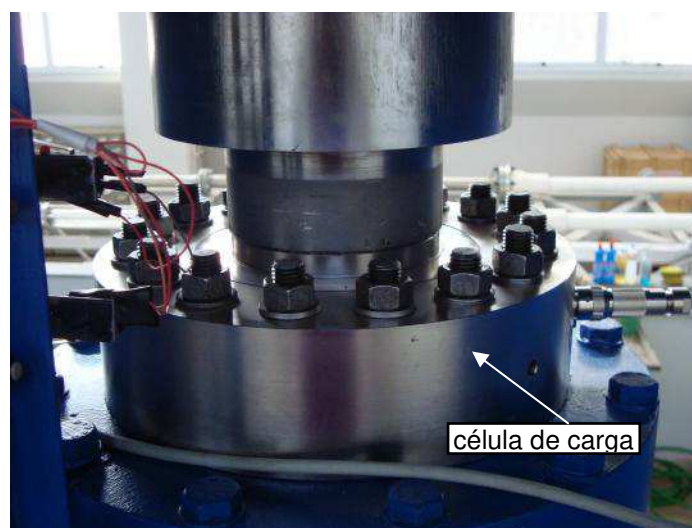


Figura 3.3 – Célula de carga da parte superior do sistema de oscilação do Tribômetro.

As quatro células de carga utilizadas no sistema Tribômetro são do modelo U10 M de 500 kN, da marca HBM - Hottinger Baldwin Messtechnik GmbH. Este modelo pode ser utilizado para medir forças de tração e compressão estáticas e dinâmicas. Este sensor é robusto para os valores de força do sistema em que será utilizado, e ainda é de montagem plana que se adéqua ao trabalho dinâmico dos cilindros hidráulicos. Seu desenho simétrico nas duas faces torna a verificação de deformação bem distribuída por toda a superfície, conforme Fig. 3.4a. A sensibilidade deste sensor é de 2 a 2,5 mV/V. Sua alimentação é feita em tensão contínua de 5 V. O máximo torque permitido para esta célula de carga é 1270 N.m. O trabalho dinâmico realizado pelo TGD não gera torque sobre a célula de carga. A máxima força aplicável é 230% da força nominal. Este sensor de força, a princípio, é compatível com o nível de força que será aplicado pelos cilindros hidráulicos sobre as amostras de polímeros, que é de no máximo de 100 kN. Esta força foi definida através do projeto mecânico do TGD.

Esta célula de carga não é adequada para ser utilizada em contato direto com água do mar. Assim é necessário atentar que uma das células de carga está instalada sob o reservatório de água, utilizado para que as amostras fiquem submersas durante os ensaios, e sendo definido o uso de água do mar para o ensaio é necessário antes certificar que não há vazamentos no reservatório.

Um parâmetro que deve ser observado para este sensor é que a diferença de temperatura entre as faces do sensor pode causar erro de medição. Esta diferença de temperatura pode ser causada por: arrefecimento ou calor radiante. As fontes de calor do TGD foram analisadas, sendo que o atrito entre as amostras gera calor, mas este calor será dissipado na água resfriada do tanque de ensaio. Outra fonte de calor é o óleo sob pressão elevada, utilizado nos cilindros hidráulicos. Esse óleo é, porém, resfriado em uma torre de resfriamento externa. Quanto a fontes de calor externas ao sistema, o TGD está instalado dentro de um galpão, onde a temperatura varia de maneira uniforme, e nas proximidades do TGD não existem outros equipamentos que sejam fonte de calor considerável para o ambiente.

A poeira ou outros tipos de sujeira nas superfícies externas da célula de carga podem causar erros de medição, sendo necessário verificar antes dos ensaios a limpeza da célula de carga.



Figura 3.4 – Célula de carga utilizada no Tribômetro: a) Construção interna da U10 M; b) Foto da célula de carga (HBM - Data Sheet Force Transducers U10 M).

No ensaio de desgaste por deslizamento, os êmbolos do cilindros hidráulicos horizontais são avançados, comprimindo as amostras de enrijecedor contra a amostra de duto flexível. Observando a relação definida pela Eq. 3.3, medindo-se a área A de efetivo contato das amostras e verificando a força F medida pelas células de carga em modo estático é possível chegar à pressão P desejada para os ensaios de compressão. Nos ensaios de desgaste de materiais poliméricos foi estabelecida a pressão contato da amostras de até 3 MPa.

$$P = F / A \quad (3.3)$$

Após a estabilização da força de compressão das amostras, o desgaste por deslizamento das amostras é efetuado com a movimentação da amostra de duto flexível. Os cilindros hidráulicos posicionados na vertical realizam o movimento oscilatório do duto flexível. Estes cilindros hidráulicos têm suas câmaras internas interligadas. Assim, eles realizam um trabalho conjunto, ou seja, enquanto um faz força de compressão o outro faz força de tração, movendo a amostra de duto flexível na direção vertical nos dois sentidos.

As forças aplicadas na oscilação da amostra são monitoradas através das células de carga. Na Fig. 3.5 são identificados os mancais ligados aos cilindros hidráulicos, superior e inferior, bem como as duas células de carga que medem as forças aplicadas pelos cilindros. O valor da força para oscilação é um parâmetro necessário no cálculo do coeficiente de atrito entre as amostras, durante os ensaios.

Foi estipulado um controle dos valores máximos das forças aplicadas no sistema de oscilação como forma de manter a segurança durante a operação do TGD. Verificou-se que existe uma diferença de força medida pela célula de carga inferior e superior, devido à diferença de massa suportada pelas mesmas. O conhecimento experimental do sistema vai

determinar a diferença máxima entre estas forças medidas, possibilitando a utilização deste parâmetro como fator de segurança do equipamento.

Como o movimento é dinâmico, faz-se necessário medir tanto a força de atrito quanto o peso próprio dos componentes do sistema de deslizamento. Dessa forma, poder-se-á calcular de forma precisa o coeficiente de atrito.

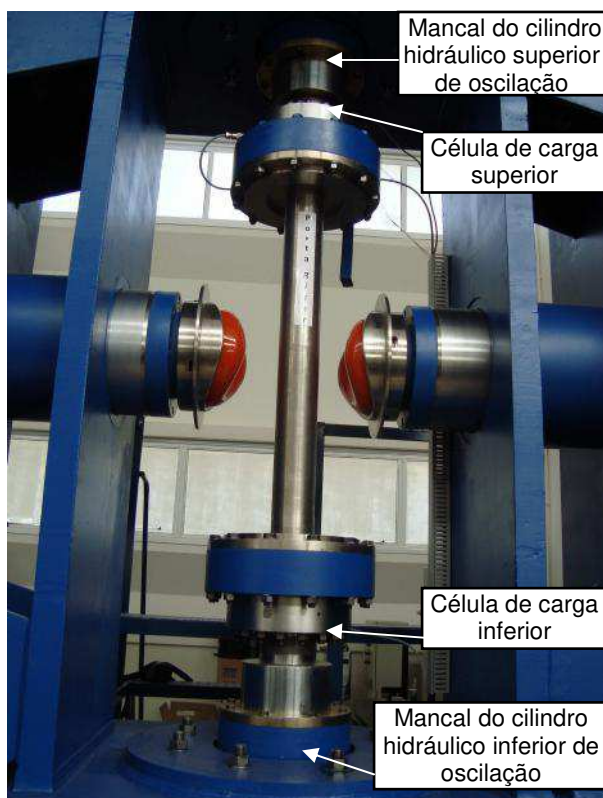


Figura 3.5 – Detalhes do sistema de oscilação.

3.3 Monitoramento de deslocamento dos cilindros horizontais e verticais

O LVDT, sensor indutivo de deslocamento, caracteriza-se por um núcleo móvel que desliza, fazendo a conexão eletromagnética, entre uma bobina no primário e duas bobinas idênticas no secundário conectadas em circuito série-oposto. O princípio de funcionamento de um LVDT é ilustrado na Fig. 3.6. Quando uma força externa é aplicada sobre o êmbolo, este se movimenta no interior das bobinas. A indutância mútua de cada bobina do secundário em relação ao primário varia, alterando a tensão de saída do LVDT.

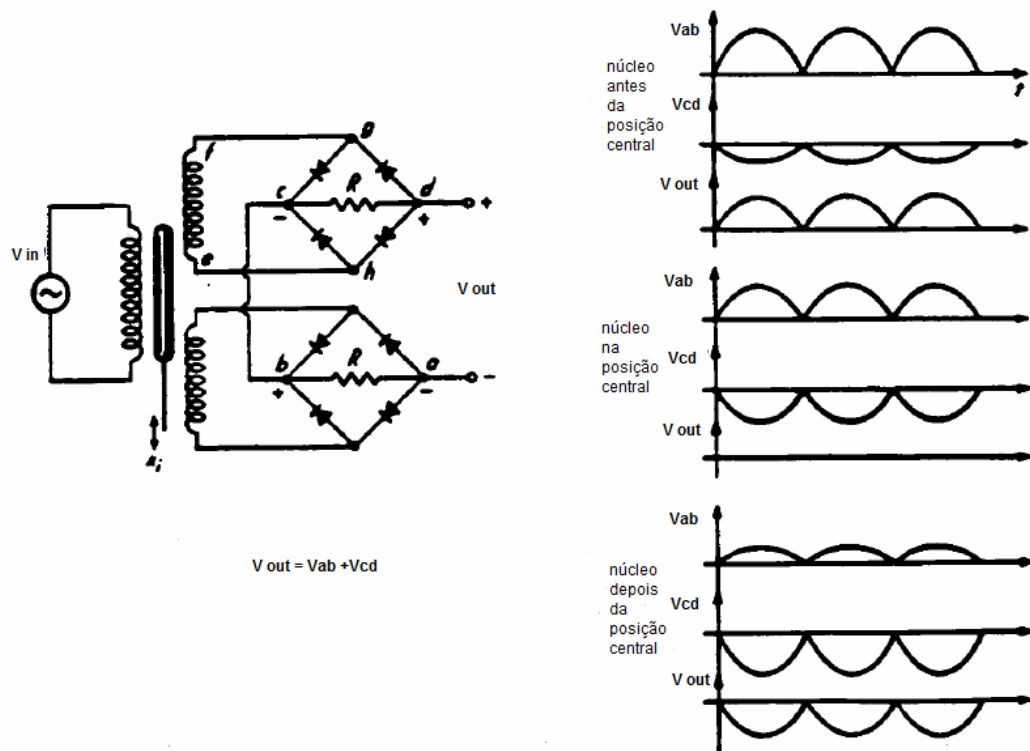


Figura 3.6 – Princípio de funcionamento de um LVDT (Adaptado de: DYER, 2001).

No TGD foram instalados três LVDTs, fabricados pela HBM - Hottinger Baldwin Messtechnik GmbH: um de modelo WA300, com deslocamento nominal de 300 mm para acompanhar o deslocamento vertical dos cilindros de oscilação; os outros dois de modelo WA100, com deslocamento nominal de 100 mm para limitar o desgaste das amostras durante o ensaio. A Figura 3.7 apresenta dois LVDT de tamanhos diferentes e extremidades de conexão dos êmbolos diferentes.



Figura 3.7 – LVDTs utilizados no Tribômetro (HBM – Data Sheet Inductive Standard Displacement Transducers).

Os LVDTs utilizados no TGD não são afetados pela sujeira do ambiente, possuem grau de proteção IP54 (protegido contra poeira e projeção d'água), que permite seu uso em ambientes abertos, como o galpão onde está instalado o TGD. O desgaste mecânico deste tipo de LVDT é praticamente desprezível se corretamente utilizado. Este modelo de sensor se caracteriza por: sensibilidade de 80 mV/V e desvio de linearidade inclusive por histerese, menor que $\pm 0,2\%$.

Os LVDTs foram instalados no TGD, utilizando suportes construídos no próprio Laboratório. Estes suportes propiciam o rápido ajuste de posicionamento, a cada troca das amostras que serão ensaiadas, e também permite a movimentação adequada do núcleo. O sensor e o êmbolo do LVDT precisam ser posicionados exatamente num ângulo de 90 graus em relação à superfície que sofrerá deslocamento. Este posicionamento é necessário para que o núcleo possa acompanhar o movimento sem sofrer flexão lateral, que ocasiona atrito entre o êmbolo e o sensor. A extremidade do êmbolo foi fixada à superfície que sofre deslocamento através de um suporte que dá sustentação ao êmbolo e permite ajustes para o posicionamento adequado. Erros de medição podem ocorrer se o êmbolo estiver danificado ou deformado. Na Fig. 3.8 é mostrada uma foto do LVDT, que acompanha o desenvolvimento do processo de desgaste das amostras, posicionado no lado esquerdo do TGD.



Figura 3.8 – Suportes de fixação dos LVDTs.

O LVDT utilizado é imune à interferência de sinais eletromagnéticos, mas ao se aproximarem dois ou mais destes sensores pode haver interferência de sinal entre eles, sendo necessários criar uma isolação a ruídos eletromagnéticos. No TGD não há necessidade de isolação de ruídos eletromagnéticos, porque eles estão instalados a uma distância segura, um do outro.

Quanto ao aterramento, todas as partes de captura de sinal dos sensores devem estar no mesmo potencial de terra. No TGD, estes sensores estão ligados ao mesmo condicionador de sinais, que está devidamente aterrado.

Como já citado anteriormente, nos ensaios de desgaste por deslizamento do TGD, a limitação do máximo desgaste das amostras será realizado por dois sensores de deslocamento do tipo LVDT, instalados paralelamente ao sistema de compressão das amostras, como mostrado na Fig. 3.9. Os êmbolos dos LVDTs se movem devido aos deslocamentos dos êmbolos dos cilindros hidráulicos de compressão.

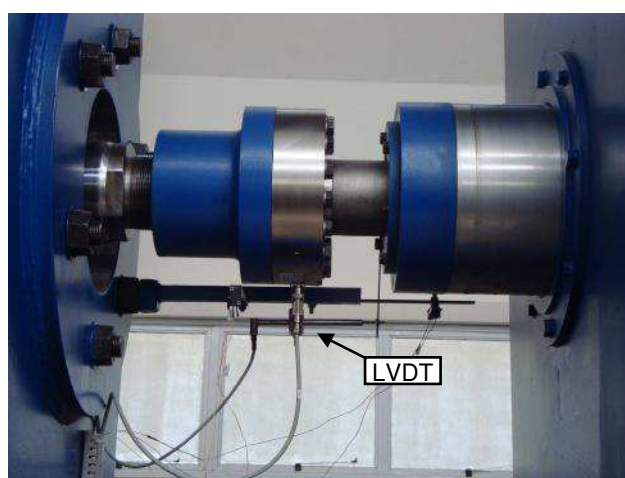


Figura 3.9 – LVDT do lado esquerdo que limita o desgaste das amostras.

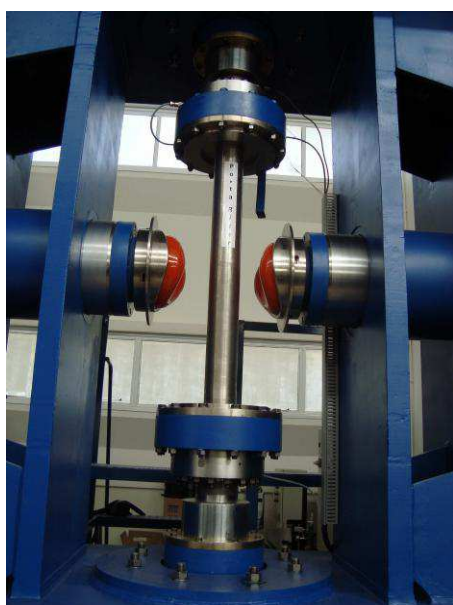
O valor medido por cada LVDT é zerado após a estabilização da força de compressão no início do ensaio. Durante os ensaios, as amostras perdem massa na região de contato. O núcleo do LVDT se movimentará com a diminuição da massa das amostras, medindo o desgaste e garantindo através de um sistema de controle um limite máximo seguro para perda de massa das amostras.

Para acompanhar o deslocamento vertical do duto flexível, no movimento de oscilação foi utilizado o mesmo tipo de LVDT do sistema de compressão, com deslocamento nominal de 300 mm.

A Figura 3.10a mostra a parte central do Tribômetro. O eixo central é o local onde se encaixa a amostra de duto flexível. Este eixo faz a ligação mecânica, entre os cilindros hidráulicos do movimento oscilatório. A Figura 3.10b mostra os detalhes do LVDT instalado em um suporte para acompanhar o movimento oscilatório.

No processo de automação do TGD, será criado após a instrumentação, um programa no CLP, com controle de malha fechada, utilizando um controlador do tipo PID (Proporcional Integral Derivativo). A velocidade de deslocamento do sistema de oscilação

será o parâmetro de entrada do sistema de controle. O sistema de controle visa manter constante a velocidade de subida e descida do cilindro hidráulico. O LVDT também monitora o deslocamento dos cilindros, possibilitando manter o deslocamento do eixo central dentro do limite programado.



a)



b)

Figura 3.10 – Monitoramento do deslocamento no movimento de oscilação: a) parte central do Tribômetro; b) detalhe da instalação do LVDT que acompanha o movimento de oscilação.

3.4 Monitoramento da temperatura do tanque de ensaio

As termorresistências do tipo PT100 são muito utilizadas industrialmente devido à alta estabilidade, larga faixa de temperatura de medição e alta precisão. A estabilidade é um fator de grande importância na indústria, pois é a capacidade do sensor manter e reproduzir suas características dentro da faixa especificada de operação, sendo o PT100 um sensor de estabilidade confiável. A Figura 3.11a mostra o esquema de construção do PT100. O “resistor de medição” varia seu valor de resistência com a variação da temperatura. O restante do circuito mostra o condicionador de sinal para utilização deste sensor. A Figura 3.11b mostra a parte interna da construção do PT100 e a Figura 3.11c apresenta a parte externa do sensor.

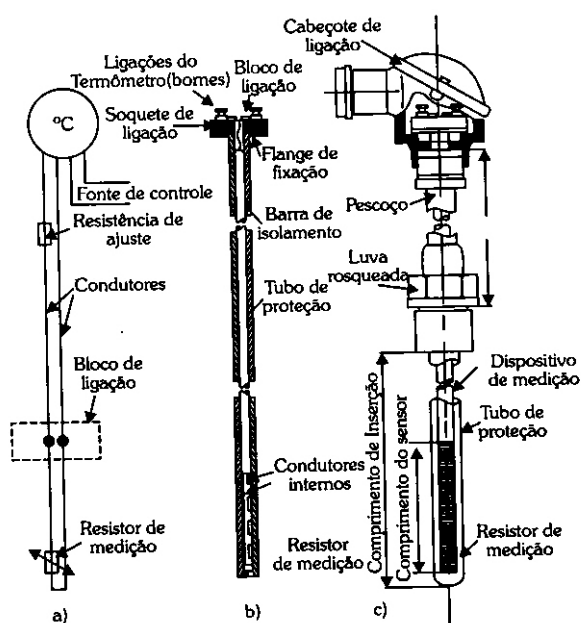


Figura 3.11 – Esquema de construção de um PT100 (FIALHO, 2004).

Segundo Fialho (2004), “constante de tempo” é o tempo necessário para o sensor reagir a uma mudança brusca de temperatura e atingir 63,2% da variação da temperatura. O PT100 tem um tempo de resposta relativamente alto em relação a outros tipos de sensores. É necessário que todo o bulbo externo do PT100 esteja com temperatura equilibrada para que a temperatura seja indicada corretamente. As vantagens do uso do PT100 são: possuir alta precisão dentro da faixa de utilização; com a ligação adequada não existe limitação para distância de operação; dispensa a utilização de fiação especial para ligação; se adequadamente protegido, permite utilização em qualquer ambiente; tem boas características de reprodutibilidade (FIALHO, 2004).

Circuitos de medição com resistência variável necessitam da alimentação de uma fonte de tensão, como é o caso do PT100. O método adequado de se medir o valor instantâneo desta resistência variável é através do uso de pontes balanceadas, devido à precisão conseguida.

A ponte de Wheatstone, ilustrada na Fig. 3.12, é utilizada para medir a variação da resistência do PT100. Estando a resistência variável do PT100 a 100°C, com todos os resistores balanceados, a tensão de saída E_{AB} será nula. Quando a temperatura do resistor do PT100 muda, alterando o valor da resistência, o valor da tensão de saída E_{AB} se altera segundo Eq. 3.4 (DOEBELIN, 2004).

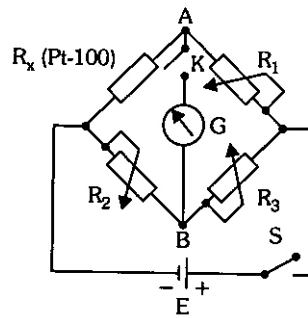


Figura 3.12 – Ponte de Wheatstone usada na medição de temperatura com um PT100 (FIALHO, 2004).

$$E_{AB} = \left(\frac{R_x + \Delta R_x}{R_x + \Delta R_x + R_1} - \frac{R_2}{R_2 + R_3} \right) E \quad (3.4)$$

Os ensaios no TGD serão realizados com as amostras submersas em água resfriada, um recipiente foi construído com esta finalidade. Este recipiente envolve parte do eixo central, onde será encaixado o duto flexível e também as amostras de material do enrijecedor, ele conterá água com a mesma temperatura do sistema real, abaixo 20° Celsius. A temperatura da água é um parâmetro que possivelmente será variado para os diversos ensaios, para verificação da influencia da temperatura no desgaste. Será instalado um termoresistor em contato com água do tanque, para monitorar a temperatura da água onde será realizado o ensaio de desgaste por deslizamento. A temperatura vai ser controlada por uma unidade de resfriamento.

A temperatura da água será monitorada com o uso de um termoresistor PT100 ilustrado na Fig. 3.13. O PT100 será ligado ao condicionador de sinais Spider8. E os dados adquiridos possibilitarão verificar a atuação da unidade de resfriamento, e serão armazenados através de um programa na plataforma Labview®.



Figura 3.13 – Termoresistor PT100 (Radar Industrial).

3.5 Condicionador dos sinais gerados pelos sensores de força, deslocamento e temperatura

O condicionador de sinais utilizado para as células de carga, LVDTs e o termoresistor é o Spider8 da HBM - *Hottinger Baldwin Messtechnik GmbH*, ver Fig. 3.14. Este é um sistema eletrônico de medição para variáveis elétricas resultante de sistemas mecânicos, tais como: pressão; força; temperatura; aceleração.



Figura 3.14 – Condicionador de sinais Spider8 (Spider8 - PC- Measurement Electronics).

O Spider8 possui oito canais de entrada para sensores. Este condicionador pode ser usado com: *strain gages*, sensores indutivos e sensores potenciométricos. A comunicação com o computador pode ser feita através da porta paralela ou da interface RS232. O Spider8 tem por características: amostragem com taxa de aquisição de 9.600 amostras/s por canal; pré-filtragem analógica *anti-aliasing*; amplificadores digitais; filtro digital programável; alimentação dos sensores através de filtros; conversor A/D separado por canal; absoluta sincronização da aquisição de dados.

Na transmissão de dados dos sensores do TGD para o computador está sendo utilizada a porta paralela. Esta é a forma de maior velocidade de transmissão para este equipamento, que transmite os dados de cada sensor de modo serial por um dos pinos da porta paralela. No computador a utilização da porta paralela é configurada através de arquivos API (*Application Program Interface* ou Interface de Programas de Aplicação) bibliotecas dinâmicas para aplicações do Windows. Os dados adquiridos através do Spider8 são recebidos pelo programa criado na plataforma Labview®.

3.6 Monitoramento da vibração do Tribômetro durante o ensaio

Sistemas mecânicos possuindo massa e elasticidade são passíveis de movimento relativo. Se o movimento se repete depois de determinado intervalo de tempo, este movimento é denominado vibração. Vibração, em geral, é uma forma de energia perdida e

indesejável em muitos casos. A existência da vibração em sistemas mecânicos é particularmente preocupante para máquinas, porque produz barulho, leva a fratura de peças componentes e transmite forças e movimentos indesejáveis a objetos nas vizinhanças (SETO, 1971).

A vibração normalmente ocorre devido a: movimentos dinâmicos gerados por folgas nas peças do sistema, folgas estas, ocasionadas pelas tolerâncias de medidas na fabricação; e atrito entre peças de uma máquina (SETO, 1971).

As vibrações podem excitar as frequências naturais das peças que compõem o sistema, fazendo com que a vibração seja amplificada, podendo até danificar o conjunto estruturalmente. A ressonância ocorre quando a frequência de excitação do sistema é igual à frequência natural característica do sistema. Se isto acontecer, a amplitude de vibração aumentará sem limite, sendo regulada pela rigidez e pelo amortecimento do sistema (SETO, 1971).

A quantificação da vibração pode ser feita em diversos aspectos, como por exemplo: através do valor pico-a-pico que indica a máxima amplitude, é usado, por exemplo, onde o deslocamento vibratório da máquina é parte crítica na tensão máxima dos elementos de máquina. O valor de pico é particularmente usado na indicação de níveis de impacto de curta duração. O valor médio é usado quando se quer considerar a amplitude em um determinado tempo. O valor *RMS* (*root mean square*) é a mais importante medida da amplitude porque ele mostra a média da energia contida no movimento vibratório; mostra o potencial destrutivo da vibração (FERNANDES, 2000).

O posicionamento vertical do acelerômetro orientado pelo eixo S_z está representado na Fig. 3.15, sendo que a máxima sensibilidade fornecida pelo acelerômetro está dentro do ângulo Φ , menor que de $2,5^\circ$, partindo do eixo S_z até o eixo S (ROBERT; ERIC, 2010). Verifica-se que o posicionamento incorreto do acelerômetro pode gerar deficiência na ação do acelerômetro (DOEBELIN, 2004)

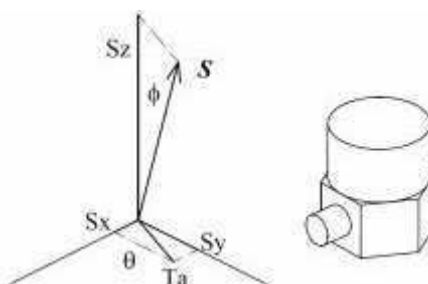


Figura 3.15 – Posicionamento do acelerômetro em relação à máxima sensibilidade (ROBERT; ERIC, 2010).

No projeto do sistema mecânico do TGD foi considerado que em termos dinâmicos existiriam movimento relativo e atrito entre suas partes, levando à necessidade de considerar a vibração gerada pelo equipamento. Este equipamento, por sua complexidade de construção e variação dos materiais a serem testados, não possibilitou em sua fase de projeto cálculos da vibração que iria gerar. O projeto do TGD considerou a necessidade de amortecimento das vibrações que poderiam ser geradas. Assim, pela massa e dimensões do equipamento definidas no projeto, foi prevista uma base de concreto para instalação do mesmo. Esta base foi projetada para suportar a massa do equipamento, os movimentos dinâmicos e para amortecer as vibrações geradas.

A estrutura do TGD foi montada sobre um bloco de concreto construído especificamente para ele durante a construção do prédio 5F, onde está instalado o equipamento. Esta base foi construída separada do restante do piso do galpão, evitando-se assim que vibrações sejam transmitidas para outros equipamentos. A Figura 3.16 apresenta a base onde está atualmente instalado o TGD.



Figura 3.16 – Base de instalação do Tribômetro.

Mesmo considerando que as vibrações geradas pelo TGD serão amortecidas pelo bloco da base, por questão de segurança, o TGD foi equipado com quatro acelerômetros que farão o monitoramento das amplitudes das vibrações. O sistema de monitoramento de vibrações desligará os motores do sistema hidráulico, parando o ensaio, caso o valor da vibração se iguale ao valor máximo pré-definido nos parâmetros de configuração inicial do ensaio.

O Tribômetro gera atrito entre as amostras de enrijecedor e a amostra de duto flexível, quando estas são comprimidas e é executado o movimento oscilatório do ensaio de desgaste por deslizamento, podendo ser fonte de vibrações.

A estrutura do TGD e seus componentes foram projetados com grande massa, rigidez e amortecimento; de modo que não se esperam altas amplitudes de vibração, mesmo que o sistema vibre na frequência de ressonância, onde o fator amortecimento é mais eficaz.

Para a instrumentação do TGD na parte de vibrações foram estudados os sensores de vibração, sendo que os acelerômetros convertem o movimento vibratório em sinais elétricos. Estes sinais são enviados a uma placa de aquisição, que amplifica, filtra e converte o sinal de analógico para digital. Da placa de aquisição o sinal elétrico é transferido para ser analisado no computador.

Para a instrumentação do TGD, no monitoramento de vibração foi necessário verificar a sensibilidade dos acelerômetros a serem utilizados, sendo que a maior causa de alteração da sensibilidade é a variação de temperatura (DOEBELIN, 2004). A Figura 3.17 mostra o gráfico da variação de sensibilidade do acelerômetro utilizado no TGD. Na faixa de temperatura de 50 a 90°F a variação de sensibilidade é quase nula, sendo que a temperatura varia dentro desta faixa no local onde esta instalado o TGD.

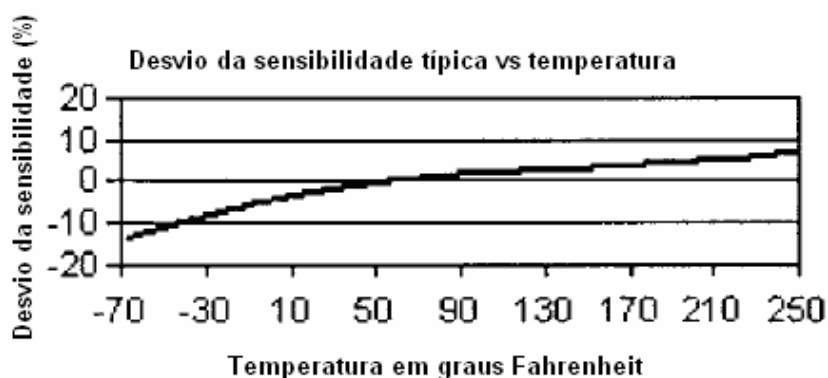


Figura 3.17 – Curva da relação de desvio da sensibilidade em função da temperatura do acelerômetro utilizado na instrumentação do Tribômetro (Adaptado de: Model 352C67 ICP® Accelerometer Installation and Operating Manual).

Os posicionamentos dos acelerômetros serão definidos de modo experimental, com o TGD em funcionamento. Eles serão posicionados nos locais e posições que mais vibram. A fixação dos acelerômetros será realizada com cera de abelha na fase de identificação dos pontos de maior vibração e o melhor posicionamento.

Durante o andamento do primeiro ensaio, com o desgaste das amostras, que pode não ser uniforme gerando diferentes níveis de vibração no sistema, será conveniente

confirmar os pontos de maior vibração repetindo a identificação. Depois de identificados os pontos de maior vibração a fixação dos acelerômetros deverá ser feita com parafuso, o que propicia maior segurança devido ao não deslocamento dos mesmos e maiores faixas de frequência de trabalho, que é com sensibilidade constante, ilustrado na Fig. 3.18.

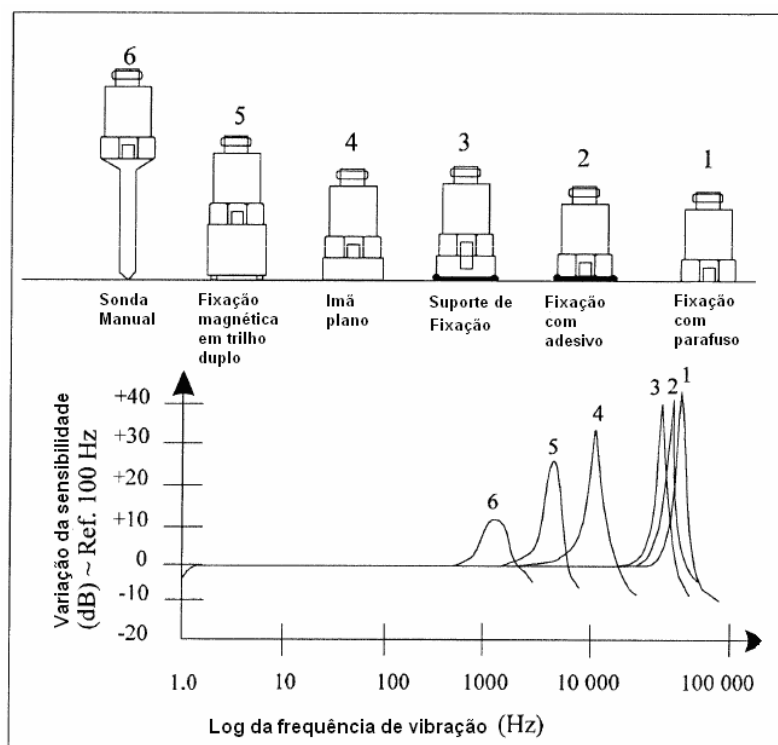


Figura 3.18 – Fixação do acelerômetro e derivação da sensibilidade (Adaptado de: Model 352C67 ICP®).

A movimentação dos cabos dos acelerômetros acrescenta ruídos ao sinal de vibração captado pelos mesmos. Os cabos dos acelerômetros deverão ser fixados na estrutura do TGD.

Os acelerômetros não sofrerão interferência de ruídos eletromagnéticos por estarem distantes dos circuitos elétricos que acionam os cilindros hidráulicos. Ruídos de fontes térmicas não será problema, considerando que o equipamento está dentro de um galpão protegido de grandes variações térmicas. As fontes de calor do TGD são: o óleo sob pressão no sistema hidráulico e o atrito entre as amostras nos ensaios. Estas fontes geradoras de calor serão mantidas em baixas temperaturas através de unidades de resfriamento.

Os quatro acelerômetros utilizados na monitoração do TGD são fabricados pela PCB Piezotronics®, modelo 352C67. O programa de monitoramento da vibração foi desenvolvido pela equipe do LTAD, tendo por base o software LabView® da National Instruments. Para a

aquisição e condicionamento dos sinais dos acelerômetros está sendo utilizada no TGD uma placa de aquisição de dados da marca National Instruments, modelo USB – 9233.

Os acelerômetros utilizados na instrumentação do TGD, ilustrado na Fig. 3.19, incorporam no circuito interno um condicionador eletrônico de sinal, que transforma a cargas de alta impedância gerada pelo material piezelétrico em baixa impedância para que esta tensão gerada possa ser transmitida pelos cabos. Estes acelerômetros respondem a sinais de vibração na faixa de frequência de 0,5 a 10.000 Hz com variação de 5%. A frequência de ressonância é de 35 kHz. A sensibilidade deste acelerômetro tem um padrão de 10,2 mV/(m/s²), mas para utilizar este sensor é necessário verificar o valor de sensibilidade do Certificado de Calibração. Sua sensibilidade transversa é menor que 3% da sensibilidade na posição vertical, isto demonstra a necessidade de posicionar o mesmo em diferentes direções, para verificar a direção que apresenta maior amplitude.



Figura 3.19 - Acelerômetro utilizado na instrumentação do Tribômetro (<<http://www.pcb.com/Accelerometers/Default.asp>>).

A placa de aquisição de dados de vibração, ilustrada na foto da Fig. 3.20, é um módulo dinâmico com quatro canais de entrada para fazer medições de alta precisão de sensores do tipo IEPE (*Integrated Electronics Piezo Electric*). Os canais de entrada adquirem os sinais simultaneamente à taxa de 2 Hz a 50 kHz. Para cada canal de entrada, o sinal do sensor é acoplado, armazenado, pré-filtrado analogicamente, e amostrado em 24 bits utilizando conversor analógico digital delta-sigma com filtragem que ajusta a frequência de corte automaticamente pela taxa de amostragem.

O conversor analógico digital tipo delta-sigma modulador atua da seguinte forma: se a taxa de aquisição é de 25 kHz, cada canal de entrada de sinal atualiza os dados à taxa de 3,2 MHz (128 vezes a taxa de aquisição) e faz uma pré-filtragem analógica de acordo com a taxa de Nyquist. Na sequência, os dados filtrados são convertidos para digital em 24 bits e digitalmente reamostrados em 25 kHz. Este filtro rejeita componentes do sinal acima da frequência de Nyquist (12,5 kHz). Esta combinação analógica e digital de filtragem fornece uma melhor representação do sinal quando rejeita os sinais fora da banda.

A comunicação da placa de aquisição com o computador é feita através da porta de comunicação USB 2.0, que não limita a velocidade de aquisição de dados dos sensores de vibração, na transmissão de dados ao computador.



Figura 3.20 – Placa de aquisição de dados utilizada na instrumentação do Tribômetro (USB Dynamic Signal Acquisition).

3.7 Programa de aquisição de dados e monitoramento dos sinais dos sensores

Para monitoramento, análise e armazenamento dos sinais dos sensores, que verificam o trabalho dinâmico do sistema TGD foi desenvolvido pela equipe do LTAD um programa computacional, com base no Software Labview®. Os dados coletados dos sensores também fornecerão informações para controle do processo e para análise do resultado do ensaio.

O programa, conforme interface com o usuário mostrada na Fig. 3.21, recebe como parâmetro inicial o número de ciclos do movimento oscilatório a ser executado. Para o sistema de controle em malha fechada é necessário definir também a força de compressão e a velocidade de oscilação.

Para a segurança do ensaio, antes deste ser iniciado devem ser definidos os valores limites de trabalho do sistema, tais como: o máximo desgaste do material; o coeficiente de atrito máximo entre as amostras de enrijecedor e a amostra do duto flexível; a amplitude de vibração máxima; a faixa de temperatura que o ensaio pode ser realizado. Estes parâmetros serão acompanhados durante o ensaio. Se algum deles for ultrapassado, um alarme será acionado, e os motores do sistema hidráulico de compressão e oscilação serão desligados. Quando o alarme é acionado, o parâmetro que fez acionar o alarme fica visível ao operador, assim como os dados coletados até aquele momento.

A interface do programa informa em tempo real os valores obtidos pelos sensores. Existem ainda comandos para gerar gráficos dos valores recebidos dos sensores. O progresso do ensaio pode ser acompanhado na tela do computador em percentual executado da quantidade de ciclos, em tempo de ensaio ou em quantidade de ciclos já executados.

O programa de monitoramento e controle calcula, em tempo real, a média do valor de força das duas células de carga do sistema de compressão e os transfere para o CLP processar o controle de malha fechada do sistema de compressão. O programa calcula também a velocidade de oscilação através da derivada do deslocamento medido pelo LVDT, e a transfere em tempo real para o CLP e para o sistema de controle de malha fechada do sistema de oscilação. O comando para desligar o sistema, se algum parâmetro de segurança for ultrapassado, também é transferido em tempo real para o CLP.

A comunicação entre o computador e o CLP em tempo real utiliza a configuração de um servidor OPC (*OLE for Process Control*). A tecnologia OLE (*Object Linking and Embedding*) foi desenvolvida pela Microsoft em meados de 1990 para suprir a necessidade de se integrar diferentes aplicações dentro da plataforma Windows.

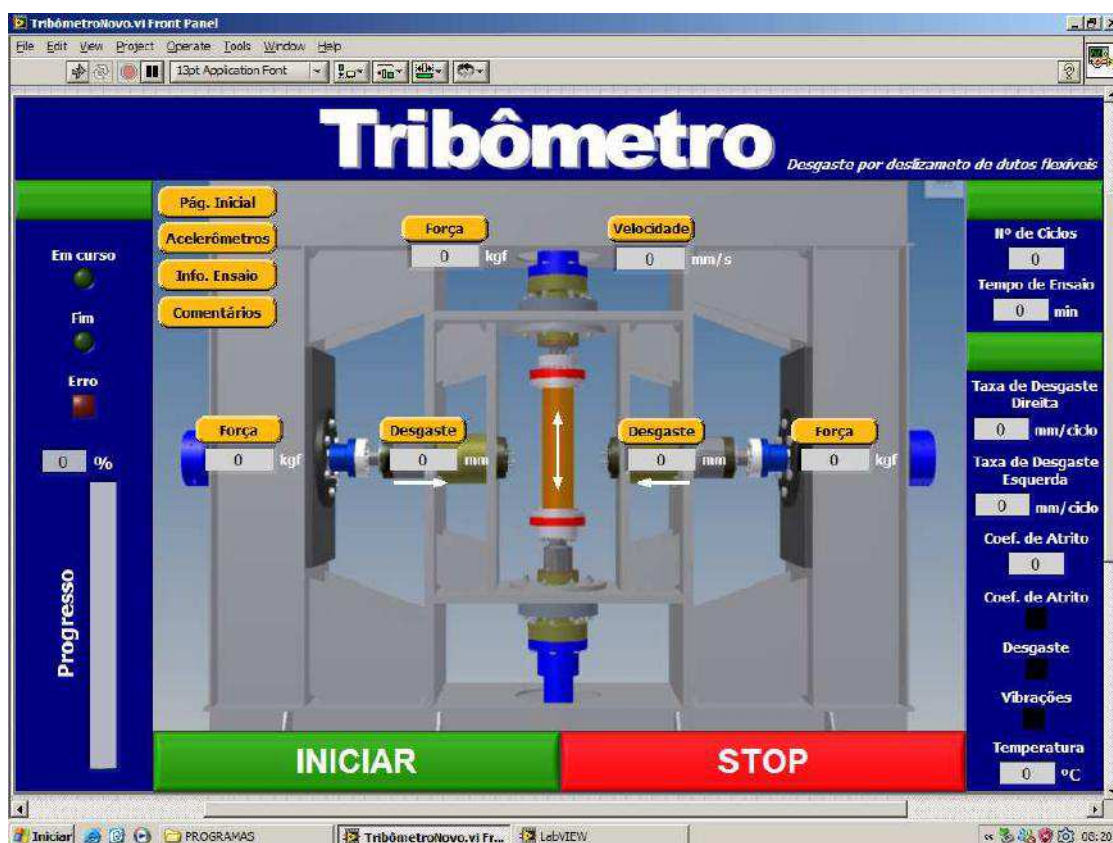


Figura 3.21 – Interface do programa de monitoramento dos sinais adquiridos dos sensores.

3.8 Limitação do deslocamento das hastes dos cilindros

O deslocamento máximo dos êmbolos dos quatro cilindros hidráulicos precisa ser monitorado para que o êmbolo do LVDT não execute um deslocamento além de seu curso funcional máximo, pois acarretaria em danos ao LVDT. Se um dos êmbolos dos cilindros

hidráulicos horizontais avançar, comprimindo o eixo central, sem a oposição de força do outro cilindro hidráulico da horizontal, o eixo central do TGD pode ser desnivelado.

Este deslocamento também deve ser limitado, porque entre os dois cilindros verticais está instalado o eixo central. O comprimento do eixo central é maior que o espaço entre um êmbolo de um cilindro avançado e o outro totalmente recuado. Este fato possibilita que o eixo central possa ser comprimido entre os êmbolos dos dois cilindros, se um deles chegar ao recuo máximo e o outro continuar avançando. Isto pode ocorrer porque os dois trabalham em conjunto, quando um recua o outro avança.

Visando a segurança operacional do TGD foram instaladas seis chaves fim-de-curso, para manterem a movimentação dos êmbolos dos cilindros hidráulicos dentro de um deslocamento adequado. A chave fim-de-curso quando acionada pelo deslocamento do êmbolo do cilindro hidráulico fecha um circuito elétrico. Este circuito elétrico é alimentado pela fonte do CLP e a saída de cada uma das chaves fim-de-curso está ligada a uma entrada digital do CLP. O CLP está programado para não permitir o movimento do êmbolo do cilindro no sentido em que a chave fim-de-curso limita.

CAPÍTULO IV

PROCEDIMENTOS PRÁTICOS PARA A INSTRUMENTAÇÃO

4.1 Ensaios para validação do monitoramento de vibrações

O TGD foi construído para ensaios de diferentes tipos de materiais. O atrito gerado pelo deslizamento entre as amostras de enrijecedor e a amostra de duto flexível pode gerar, no TGD, diferentes níveis de vibração que precisam ser monitoradas e mantidas em níveis que não causem danos ao equipamento.

Como descrito por Paulo et al. (2008), os ensaios de validação do monitoramento de vibrações foram realizados em um tribômetro de escala reduzida (Drill Pipe), porque o Tribômetro em escala real, na ocasião da validação do sistema, estava em fase de construção e ainda não possibilitava testes.

Para a aquisição e análise do sinal adquirido dos acelerômetros foi desenvolvido um programa utilizando o software LabView® 8.5. A interface do usuário é apresentada na Fig. 4.1. Através deste programa são adquiridos os sinais dos acelerômetros e analisados os dados de vibração no domínio do tempo e da frequência.

Ao iniciar o programa, o usuário tem três opções, quais sejam: “Ensaio de Aquisição”, “Leitura de Dados do Arquivo” e “Análise de Fourier”, como mostrado na parte inferior, esquerda da Fig. 4.1.

Caso a opção “Ensaio de Aquisição” seja selecionada, o programa faz a aquisição dos sinais de vibração a que estão submetidos os acelerômetros e estes dados são apresentados na tela do computador na forma gráfica, com escala de amplitude de vibração em mV, por tempo em segundos. A aquisição de dados da Fig. 4.1 utilizou a taxa de 2,5 kHz, se houver necessidade esta taxa de aquisição pode ser alterada. Os dados adquiridos são salvos em um arquivo e o processo se repete até que o programa seja parado pelo

usuário ou pela ultrapassagem do valor máximo de amplitude de vibração estipulado como limite de segurança.

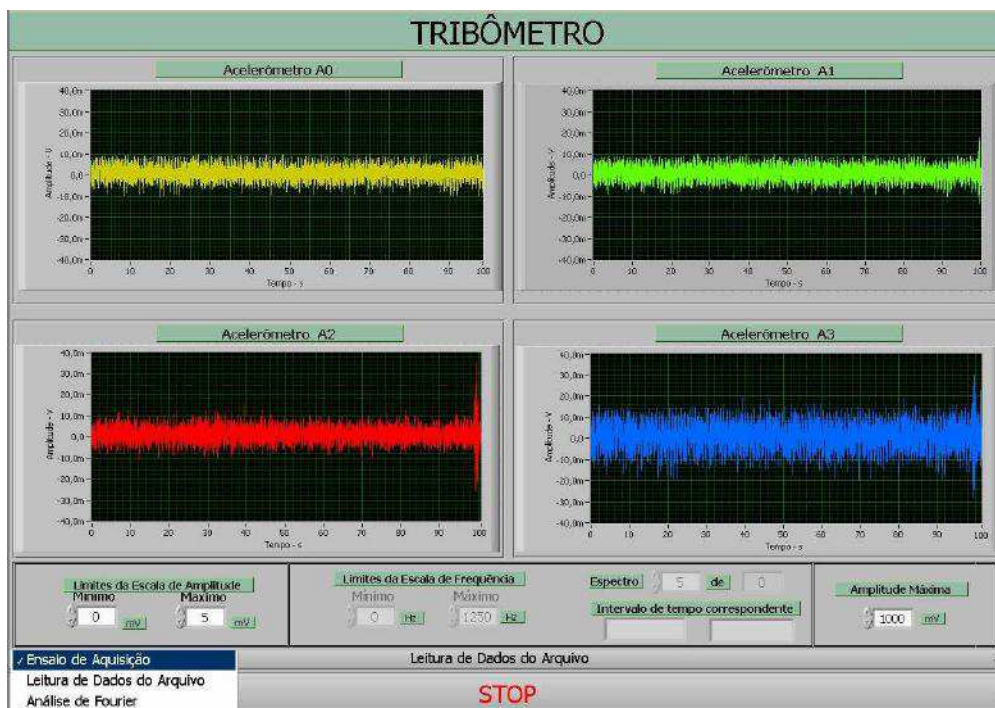


Figura 4.1 - Interface do programa de monitoramento de vibrações.

Caso seja selecionada a opção “Leitura de Dados do Arquivo”, o programa abre uma tela para que o usuário escolha qual arquivo de ensaio ele deseja analisar, sendo que o programa salva os dados em um arquivo, cujo nome corresponde à data e ao horário do ensaio. Escolhido o arquivo, o programa apresenta, na tela do computador, os dados de vibração adquiridos dos acelerômetros durante o ensaio.

Caso a opção “Análise de Fourier” seja selecionada, o programa também abre uma tela para que o usuário escolha qual arquivo de ensaio ele deseja analisar. Escolhido o arquivo, é solicitado ao usuário o intervalo de tempo do ensaio que deve ser utilizado na Transformada de Fourier. Feito isto, o programa processa a Transformada de Fourier com os dados do arquivo, e mostra na tela do computador os dados de vibração em função da frequência.

Para as opções “Ensaio de Aquisição” e “Leitura de Dados do Arquivo”, é habilitado na tela o controle da escala de amplitude. Isto é importante para facilitar a comparação da magnitude dos sinais adquiridos de diferentes acelerômetros. Da mesma maneira, para a opção “Análise de Fourier” é habilitado o controle da faixa de frequência a ser visualizada. A Figura 4.2 mostra o fluxograma do programa desenvolvido.

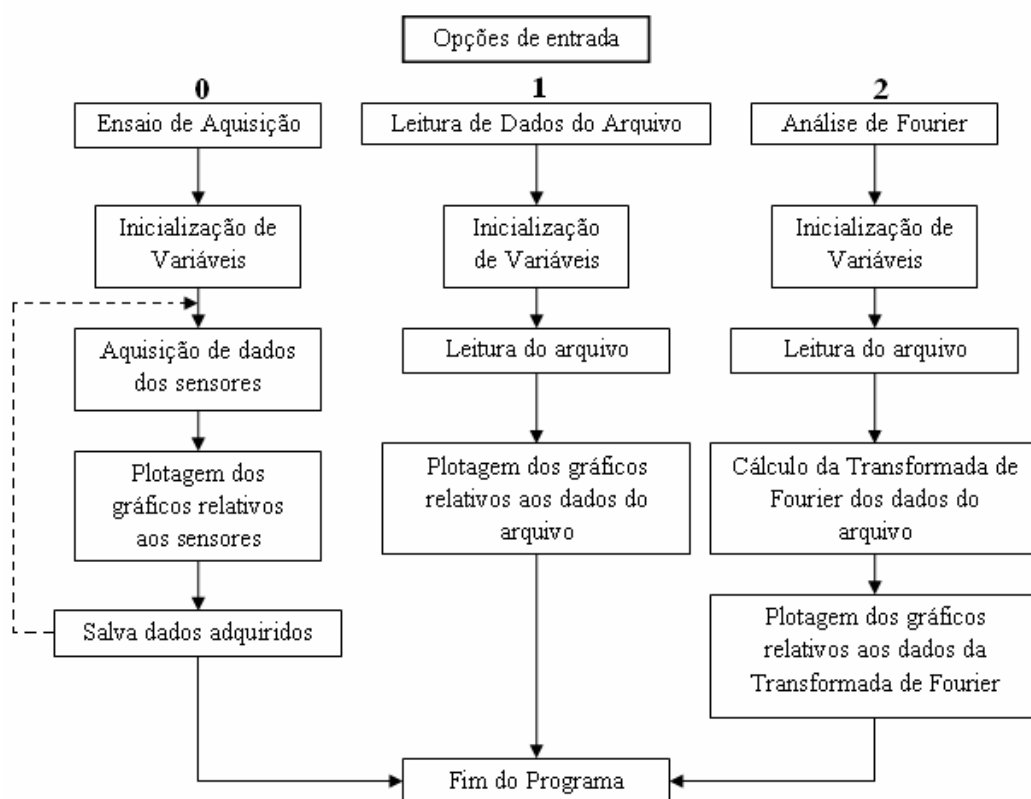


Figura 4.2 - Fluxograma do programa de monitoramento de vibrações (PAULO et al., 2008).

Para realizar as medições de vibração no Drill Pipe, primeiramente foram definidas três regiões na estrutura, a priori, sujeitas a vibrações de maior intensidade. Estas regiões estão indicadas e enumeradas na Fig. 4.3.



Figura 4.3 – Tribômetro (Drill Pipe) utilizado na validação do sistema de monitoramento de vibrações.

Para verificar se existe um ponto crítico de vibração no equipamento, em cada região, foram posicionados os quatro acelerômetros em pontos diferentes, e em seguida foi realizado um ensaio para aquisição de dados vibração.

Após o ensaio, que durou 10 minutos para cada região, os dados salvos foram analisados através de gráficos, assim pôde-se determinar o ponto de maior vibração para cada região.

Adotando o mesmo procedimento para as três regiões da Figura 4.3 foi possível determinar os quatro pontos que apresentam maior amplitude de vibração. A amplitude de vibração será usada como fator de segurança do ensaio através da determinação do parâmetro de controle “Amplitude máxima”. Nestas posições, serão instalados os acelerômetros que irão monitorar as vibrações da estrutura durante um ensaio de desgaste.

Para confirmar o funcionamento do sistema de monitoramento nas posições críticas determinadas pelas aquisições anteriores, foi realizado outro ensaio posicionando-se os quatro acelerômetros nos quatro locais mais críticos de vibração. Os dados deste ensaio estão mostrados nos gráficos da Fig. 4.4.

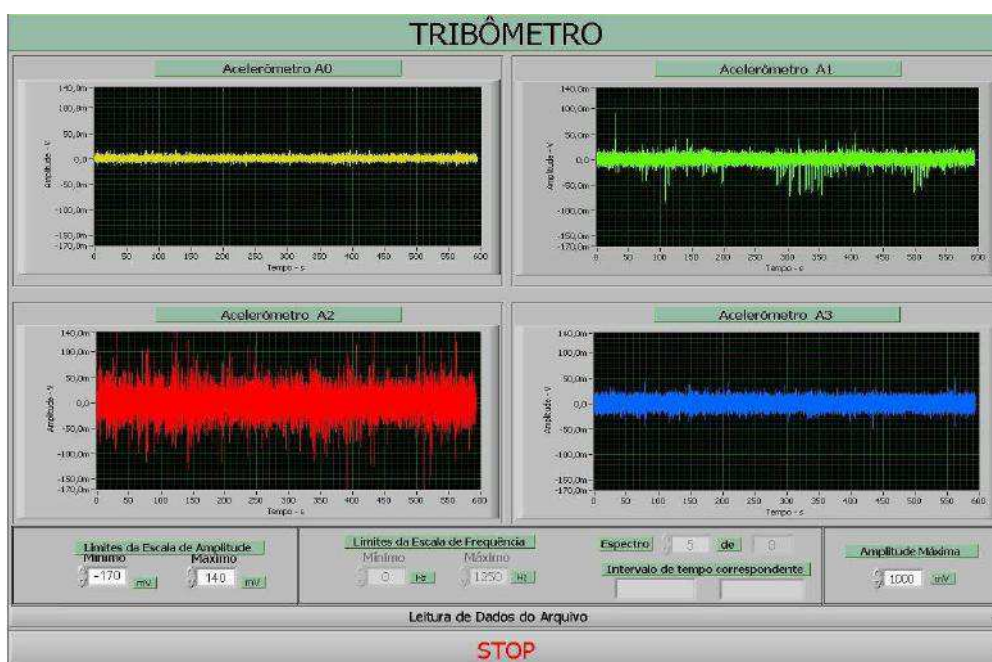


Figura 4.4 - Ensaio realizado com acelerômetros em posições críticas do *Drill Pipe*.

A Figura 4.5 mostra os gráficos das amplitudes de vibração em relação à frequência para os quatro acelerômetros. A vibração apresenta maior amplitude nas frequências abaixo de 300 Hz. O acelerômetro que percebe maior vibração é o A2, que está posicionado mais próximo da região de contato entre o contra-corpo e a amostra. Observa-se ainda uma amplitude maior do sinal na frequência de 60 Hz e seus múltiplos. É muito provável que estes sinais sejam ruídos gerados pelo sistema elétrico e introduzidos no sistema de monitoramento. Confirmando-se serem ruídos, devem ser filtrados para não se somarem aos sinais de vibração.

No Capítulo 5 serão relatados os ensaios preliminares para ajustes do sistema de monitoramento de vibrações, validado no tribômetro de pequenas dimensões (*Drill Pipe*). Estes ensaios serão realizados, no Tribômetro de Grandes Dimensões, com o equipamento completo.

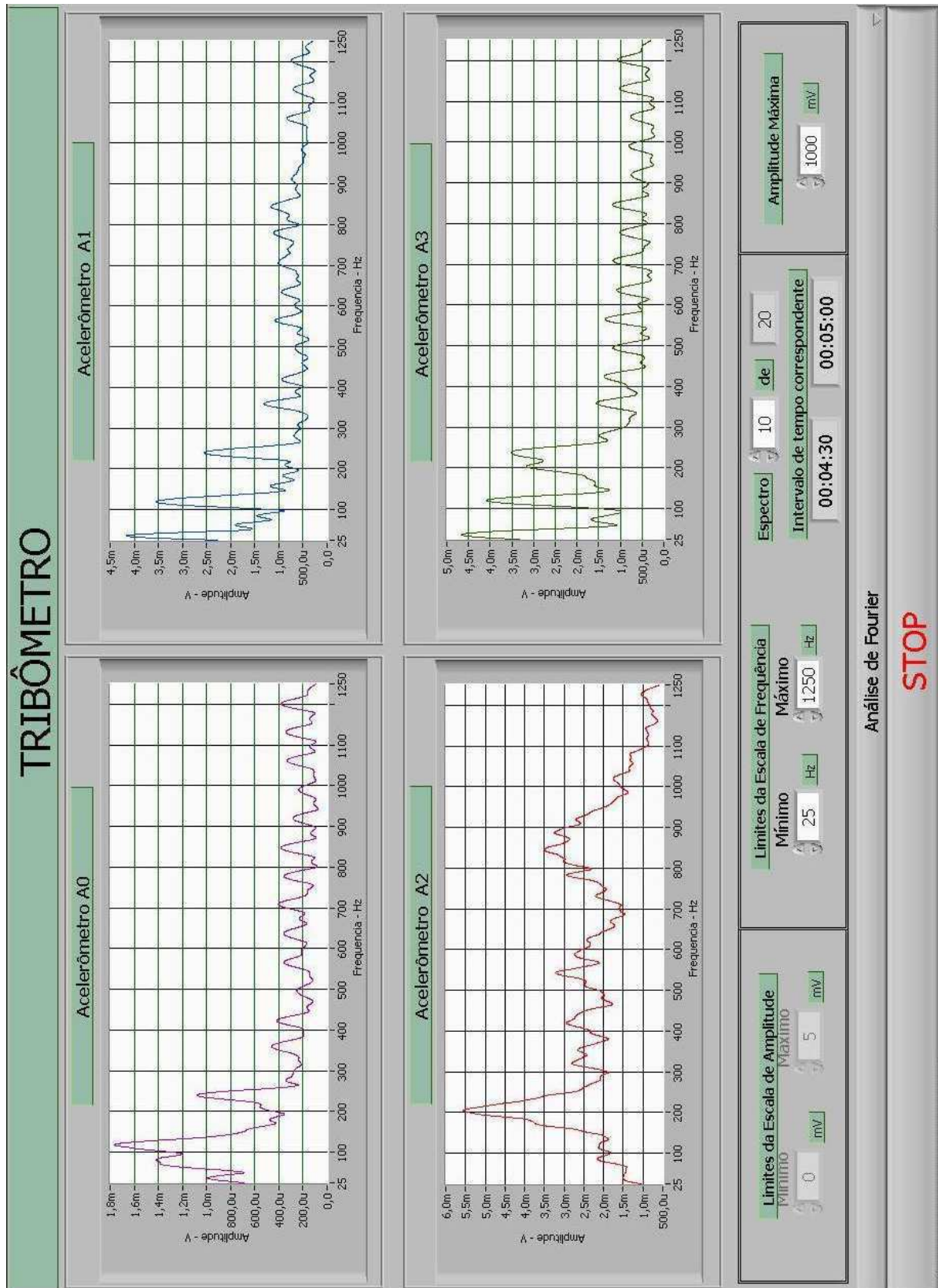


Figura 4.5 - Espectros de magnitude dos dados dos acelerômetros nas posições críticas.

4.2 Ensaios de verificação do funcionamento das chaves fim-de-curso

Para verificar o funcionamento das chaves fim-de-curso como limitadoras do deslocamento das hastes dos cilindros hidráulicos, foram executados testes operacionais de movimentação dos cilindros hidráulicos com acionamento em modo manual através da IHM. As hastes dos cilindros executaram movimentos avançando e recuando no percurso de deslocamento permitido pelas chaves fim-de-curso. Para validar o programa executado pelo CLP foi verificado também, se ao acionar determinada chave fim-de-curso, os movimentos das hastes em outros sentidos seriam comprometidos. Repetiu-se o teste três vezes, sendo que este sistema de segurança atendeu o esperado, sem nenhum problema.

4.3 Integração ao sistema e verificação do funcionamento dos LVDTs do sistema de compressão

Estão fixados em paralelo aos dois cilindros de compressão dois LVDTs para acompanhar a evolução do processo de desgaste das amostras durante os ensaios, cada LVDT acompanha o deslocamento de cada êmbolo de cilindro hidráulico .

Os LVDTs precisam ser ajustados ao TGD com adequada precisão antes de se executarem os testes para verificar o funcionamento destes. Os alinhamentos dos LVDTs foram realizados com os movimentos para avanço e recuo dos êmbolos dos cilindros hidráulicos do sistema de compressão. Os LVDTs foram fixados ao TGD através de suportes ajustáveis, possibilitando um rápido posicionamento dos mesmos. Para se posicionar com exatidão cada LVDT em paralelo ao movimento do êmbolo do cilindro, utilizou-se um esquadro, ver Fig. 4.6. O correto posicionamento do LVDT é importante para que durante a movimentação do êmbolo do LVDT não ocorra atrito entre o êmbolo e a parte externa do sensor. Ajustou-se o paralelismo do sensor em relação ao movimento dos êmbolos dos cilindros hidráulicos nas direções vertical e horizontal.

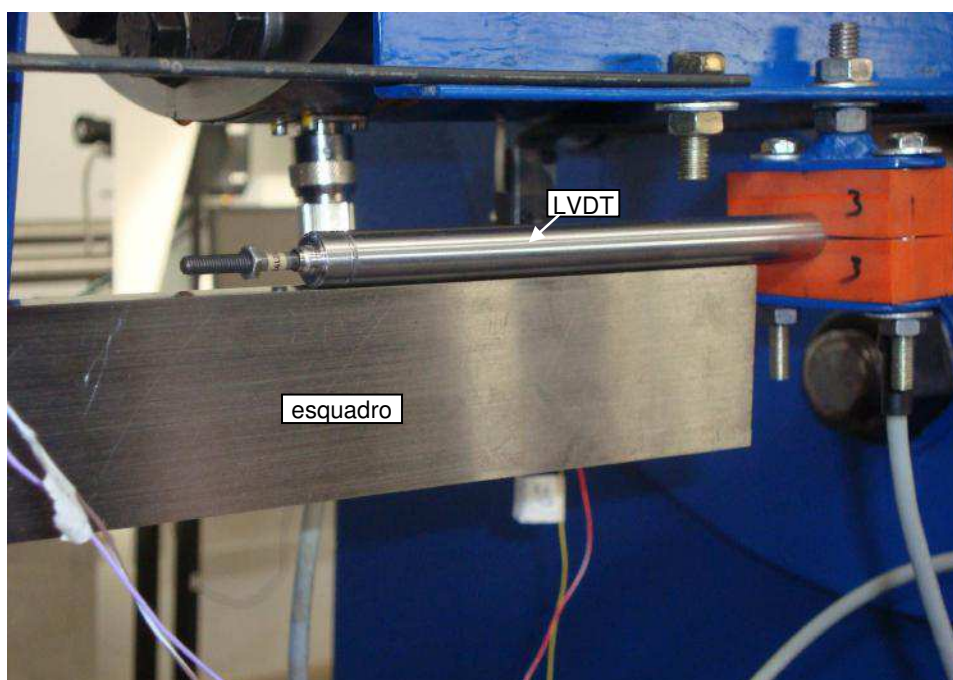


Figura 4.6 – Alinhamento do LVDT que limita o desgaste.

A verificação do alinhamento dos LVDTs com os cilindros hidráulicos de compressão também foi feita com nível de bolha, ver Fig. 4.7.



Figura 4.7 – Verificação do alinhamento do LVDT utilizando nível de bolha.

A verificação do funcionamento dos LVDTs foi executada por comparação com um relógio comparador. Para esta verificação foram produzidos pequenos deslocamentos dos êmbolos dos cilindros hidráulicos e comparados os valores de deslocamento medidos pelo LVDT e pelo relógio comparador.

Na verificação do funcionamento dos LVDTs, foram considerados os Certificados de Calibração fornecidos pelo fabricante (ver Tab. 4.1 e 4.2), onde se podem verificar os erros de medição característico dos sensores. Para o LVDT posicionado a esquerda das amostras, o erro máximo de 0,100 mm ocorre no deslocamento de 70 mm, e para o LVDT a direita das amostras, o erro máximo é de -0,077 mm no deslocamento de 60 mm. As medições do Certificado têm como referência o valor 0 mm. Os erros apresentados nos Certificados não são acumulativos e dependem da posição do êmbolo do LVDT.

Tabela 4.1 – Valores do Certificado de Calibração do LVDT posicionado a esquerda das amostras (HBM).

Deslocamento do núcleo do LVDT [mm]	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
Erro [mm]	0,000	0,005	-0,010	0,011	0,056	0,008	-0,060	-0,100	-0,019	0,003	0,000

Tabela 4.2 – Valores do Certificado de Calibração do LVDT posicionado a direita das amostras (HBM).

Deslocamento do núcleo do LVDT [mm]	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
Erro [mm]	0,000	-0,004	-0,059	-0,042	-0,006	-0,045	-0,077	-0,029	0,016	-0,030	0,000

O relógio comparador utilizado é do tipo analógico, modelo de código 2046F, fabricado pela Mitutoyo, com uma faixa de operação de 0 a 10 mm, e resolução de 0,01 mm. Sua força de deslocamento do fuso de medição é de 1,4 N, com precisão 15 μm . Pelo Certificado de Calibração fornecido pelo fabricante, este equipamento de medição apresenta um erro máximo de 0,006 mm.

Este relógio foi fixado, paralelo ao LVDT, no TGD através da base magnética que acompanha este instrumento de medição. O fuso de deslocamento foi apoiado no mesmo suporte que o LVDT, como ilustrado na Fig. 4.9. Este posicionamento propiciou igual deslocamento para os dois sensores, na verificação de funcionamento do LVDT, por comparação aos valores medidos pelo relógio comparador.

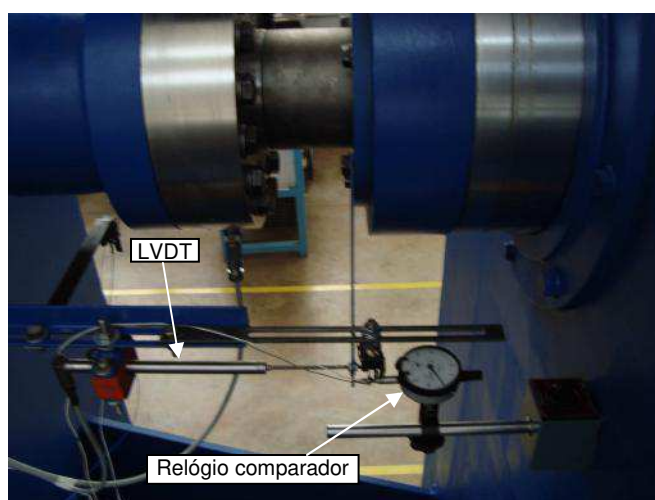


Figura 4.9 – Posicionamento do relógio comparador para verificação do LVDT.

Para execução do ensaio da verificação, seguiu-se o método utilizado pelo fabricante para calibração do LVDT. Partiu-se de uma referência para fazer medições em intervalos discretos, com a diferença que, no presente trabalho, não foi possível percorrer todo o curso do LVDT. Assim, o êmbolo do LVDT foi posicionado em sua marca central e no programa de aquisição de dados, foi feita a tara do valor de deslocamento apresentado pelo LVDT. O relógio comparador foi posicionado com o fuso no máximo deslocamento e o mostrador foi zerado neste ponto.

Com os equipamentos de medição devidamente preparados, foram comandados, manualmente através da IHM do CLP, pequenos deslocamentos do êmbolo do cilindro hidráulico no sentido de recuar o fuso do relógio comparador, que estava totalmente avançado.

O deslocamento total dos êmbolos dos cilindros, neste ensaio, foi de cerca de 6 mm. Como o acionamento da movimentação dos cilindros foi feita manualmente, procurou-se a

cada movimento fazer o menor deslocamento possível para obter maior resolução na comparação do deslocamento medido pelo dois instrumentos de medição. O movimento também foi feito no sentido oposto, recuando o êmbolo do cilindro hidráulico.

Foi realizada então a comparação dos dados coletados dos dois instrumentos de medição, verificando-se a diferença de medição entre eles. O gráfico da Fig. 4.10 mostra a diferença dos valores medidos pelos dois instrumentos a cada deslocamento. Esta diferença de valores chega no máximo a 0,04 mm.

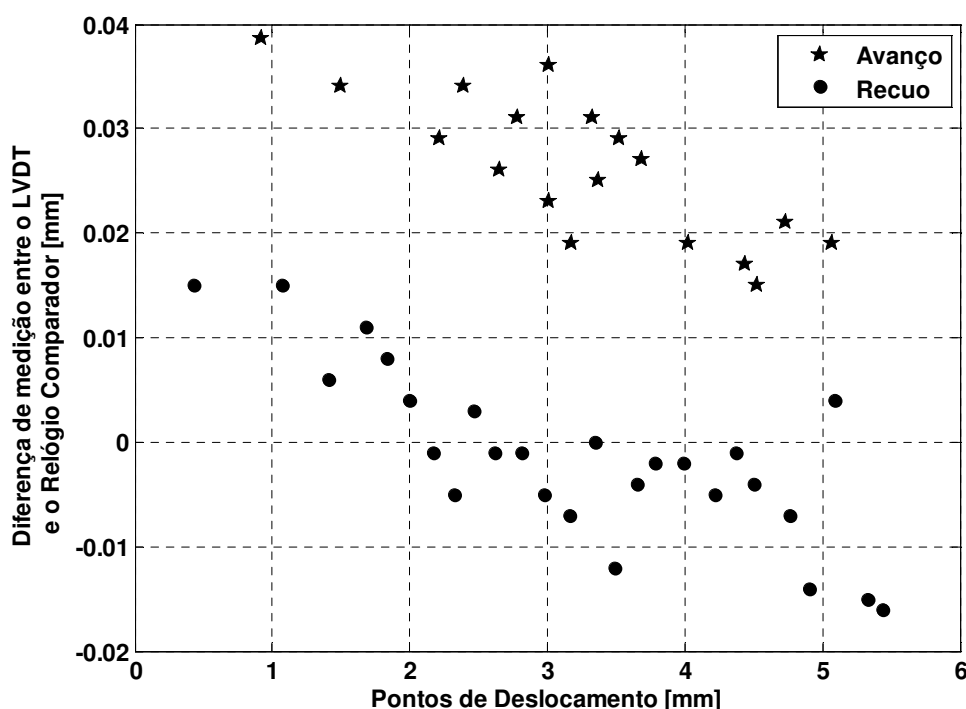


Figura 4.10 – Diferença entre os valores medidos pelo LVDT da esquerda e o relógio comparador, no avanço e recuo.

Analisando os dados do Certificado de Calibração do LVDT da esquerda, no intervalo de comprimento entre 50 mm e 60 mm, em que está sendo feita esta verificação de medição, o erro característico do LVDT passa de 0,008 mm para -0,060 mm, ou seja, varia de -0,052 mm. Após a correção do erro característico do LVDT, obteve-se o gráfico da Fig. 4.11 que relaciona o deslocamento medido pelo relógio comparador ao deslocamento medido pelo LVDT. O erro sistemático máximo no ensaio avançando, após correção do erro característico do LVDT, foi de 0,023 mm, e o desvio máximo do erro foi de -0,008 mm. No ensaio recuando o erro máximo foi de -0,013 mm, e o desvio máximo -0,008 mm.

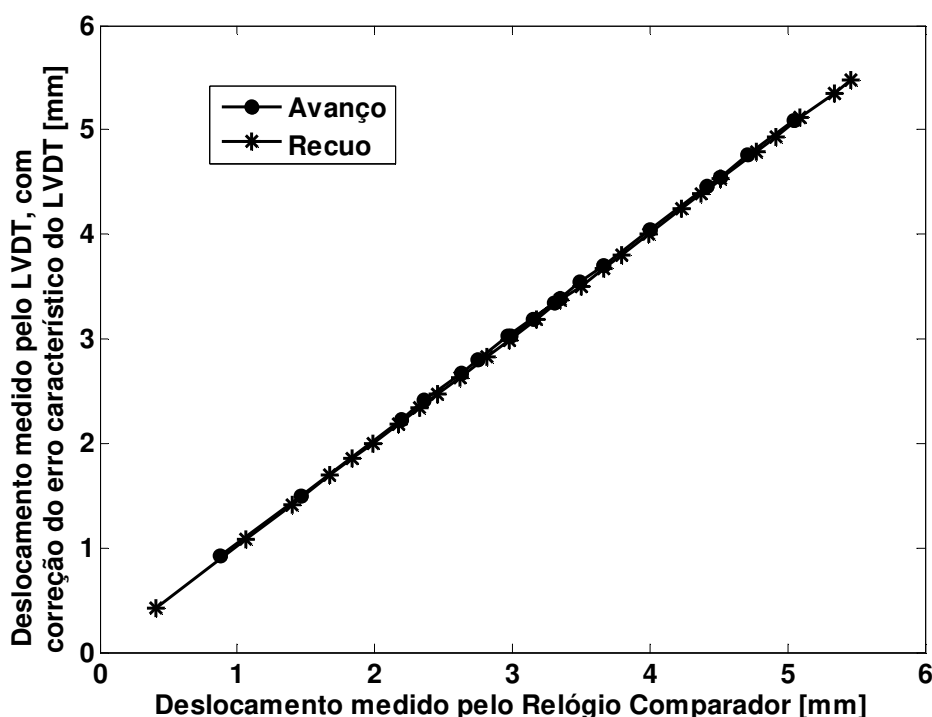


Figura 4.11 – Relação entre os valores medidos pelo LVDT da esquerda e o relógio comparador, no avanço e recuo, após correção do erro característico do LVDT.

Os dados do LVDT foram coletados através do monitoramento dos deslocamento via computador, utilizando o Spider8 para aquisição dos sinais, com taxa de aquisição de dados máxima para o equipamento, que é de 9.600 amostras/s por canal. Os valores apresentados pelo relógio comparador analógico foram monitorados visualmente a cada movimentação. Neste monitoramento foi observado o cuidado para que não ocorresse erro de paralaxe. A resolução da aquisição de sinais do LVDT é de 0,0187 mm, e a resolução do Relógio é de 0,01 mm. A incerteza devida à resolução do LVDT é de $\pm 0,00935$ mm, e para o relógio é de $\pm 0,005$ mm. A soma das incertezas dos dois instrumentos de medição é, portanto, de $\pm 0,01435$ mm.

A diferença de valores entre as medidas feitas através do LVDT e do Relógio Comparador apresentam uma pequena histerese entre os movimentos de avanço e de recuo da haste do mesmo cilindro hidráulico. Esta histerese pode ser causada por folga na fixação do êmbolo do LVDT no suporte.

Para verificação do funcionamento do LVDT do lado direito utilizou-se o mesmo método que para o LVDT do lado esquerdo. A instalação do relógio comparador seguiu os mesmos parâmetros, como mostra a Fig. 4.12.



Figura 4.12 – Detalhes do posicionamento do relógio comparador para verificação do LVDT do lado direito.

A cada deslocamento da haste do cilindro, verificou-se a diferença de medição entre o LVDT e o relógio. O resultado destas diferenças de medição é apresentado no gráfico da Fig. 4.13.

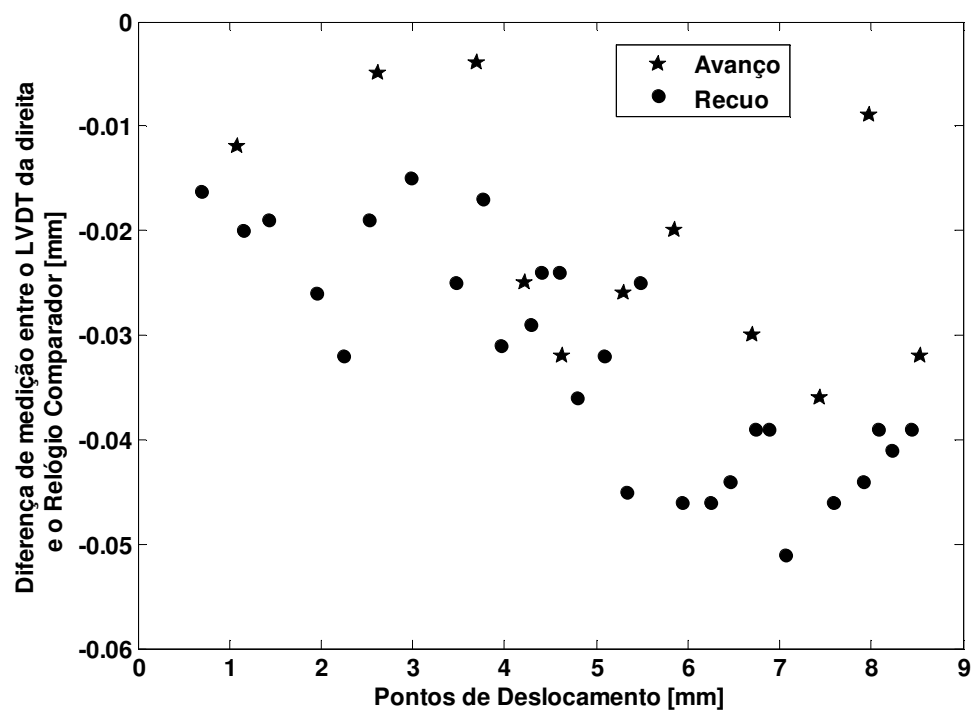


Figura 4.13 – Diferença dos valores medidos pelo LVDT da direita e relógio comparador, no avanço e recuo.

Pelos dados do Certificado de Calibração do LVDT da direita, na variação de medição de 10 mm, entre os valores de 50 mm e 60 mm, o erro característico do LVDT foi de -0,045 mm para -0,077 mm, com uma variação de -0,032 mm. Na Figura 4.14 é apresentado o gráfico da relação entre os valores medidos pelo relógio comparador e pelo LVDT, após a correção do erro característico do LVDT. O erro sistemático máximo no ensaio avançando, após correção do erro característico do LVDT, foi de 0,009 mm, e o desvio máximo do erro foi de -0,012 mm. No ensaio recuando o erro máximo foi de 0,016 mm, e o desvio máximo -0,006 mm.

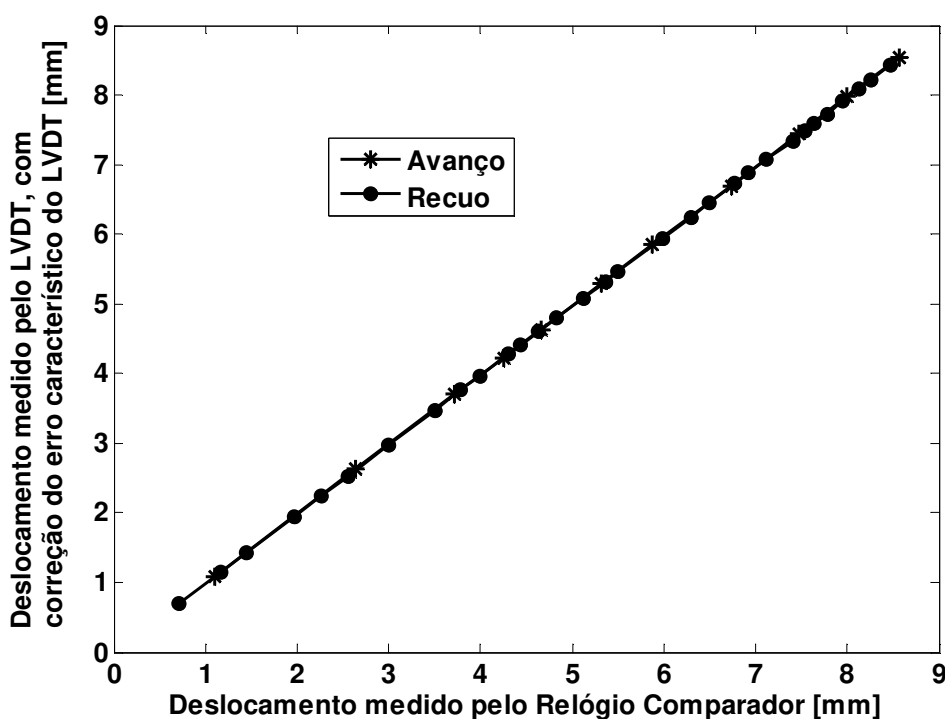


Figura 4.14 – Diferença entre os valores medidos pelo LVDT da direita e o relógio comparador, no avanço e recuo, após correção do erro característico do LVDT.

Na análise dos dados dos ensaios para verificação do funcionamento dos LVDTs, observou-se que: o LVDT da direita apresentou um erro máximo neste teste de 0,016 mm e o LVDT da esquerda apresentou em erro máximo neste teste de 0,023 mm. A soma das incertezas dos dois instrumentos de medição é de $\pm 0,01435$ mm. Assim, considera-se que o funcionamento dos LVDTs está correto, pois o erro observado não atinge três vezes a resolução do LVDT e a soma das incertezas dos instrumentos de medição se aproxima do valor da resolução dos LVDT em nanômetros.

Para complementar a verificação do funcionamento dos LVDTs que limitam o processo de desgaste das amostras, foi medido o nível de variação do sinal do sensor de deslocamento devido ao movimento de oscilação do eixo central. Este teste é apresentado no ensaio com o TGD completo (todos os subsistemas montados), descrito no Capítulo 5.

4.4 Integração ao sistema e verificação do funcionamento do LVDT do sistema de oscilação

Nos ensaios no TGD, é executado um movimento oscilatório de subida e descida do eixo central, para que aconteça o desgaste por deslizamento das amostras. Antes de alinhar o LVDT que acompanha o deslocamento do eixo central neste movimento, foi conferido o alinhamento vertical do eixo central do TGD, e também conferido o posicionamento na direção horizontal do suporte do eixo central e da célula de carga por serem as base de aplicação da força para movimentação do eixo central. Estas verificações foram realizadas utilizando-se um nível de bolha. E com um esquadro fez-se o alinhamento do LVDT com relação ao movimento do eixo central, como mostra da foto da Fig. 4.15.



Figura 4.15 – Ajuste do alinhamento do LVDT utilizando um esquadro.

Após este alinhamento mecânico, foi realizada a confirmação visual do alinhamento da parte externa do LVDT ao êmbolo, no ciclo de movimentação do sistema de oscilação. Movimentou-se os êmbolos dos cilindros de oscilação para certificar que em todo o percurso o LVDT não encontra resistência lateral, que poderia gerar atrito entre o êmbolo e a parte externa do sensor.

Assim como foi feito na verificação do funcionamento dos LVDTs que monitoram o desgaste das amostras, para se apurar a correção da medição de deslocamento do LVDT

que acompanha o movimento de oscilação, foram executados ensaios por comparação, entre os valores medidos pelo LVDT e os valores medidos pelo relógio comparador. Neste ensaio foram produzidos pequenos deslocamentos dos êmbolos dos cilindros hidráulicos verticais e observados os valores de deslocamento medidos pelo LVDT e pelo relógio comparador.

Para a verificação do funcionamento do LVDT foram considerados os valores de erro dos Certificados de Calibração fornecidos pelos fabricantes do LVDT e do relógio comparador. Os valores do Certificado de Calibração do LVDT em deslocamento e erro estão na Tab. 4.3, onde se pode verificar que o erro de medição máximo característico do sensor foi de -0,389 mm para deslocamento de 210 mm.

Tabela 4.3 – Valores do Certificado de Calibração do LVDT da oscilação (HBM).

Deslocamento do núcleo do LVDT [mm]	0	15	30	45	60	75	90	105	120	135	150
Erro [mm]	0,000	-0,301	-0,074	-0,105	-0,309	-0,115	0,037	0,144	0,001	-0,204	-0,232
Deslocamento do núcleo do LVDT [mm]	165	180	195	210	225	240	255	270	285	300	
Erro [mm]	-0,133	-0,254	-0,374	-0,389	-0,240	-0,172	-0,105	-0,038	-0,105	0,000	

Seguindo o mesmo processo de verificação do funcionamento dos LVDTs do sistema de compressão. Na figura 4.16 é apresentado o gráfico com os resultados da diferença de medição entre os dois instrumentos.

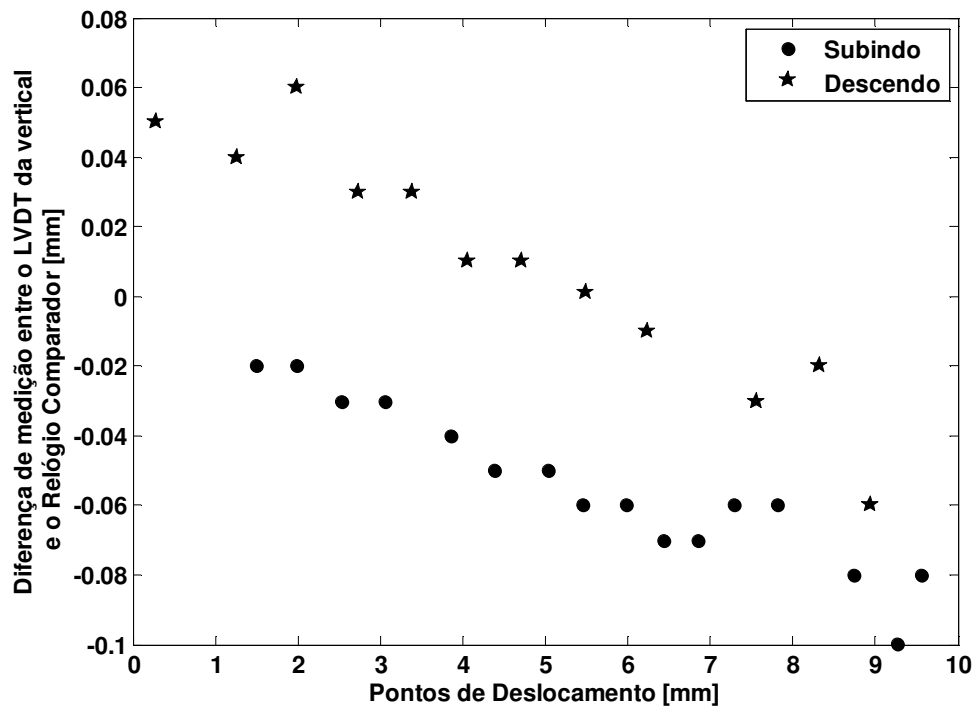


Figura 4.16 – Diferença de medição entre o LVDT da vertical e o relógio comparador, no movimento oscilatório.

Pelos dados do fabricante sobre o LVDT do sistema de oscilação, na variação de medição de 15 mm, entre os valores de 150 mm e 135 mm, o erro característico do LVDT se altera de -0,232 mm para -0,204 mm, com uma variação de 0,028 mm. Após a correção do erro característico do LVDT nos dados coletados, obteve-se o gráfico da Fig. 4.17, que apresenta a relação entre os valores medidos pelo relógio comparador e pelo LVDT. O erro sistemático máximo no ensaio subindo, após correção do erro característico do LVDT, foi de 0,007 mm, e o desvio máximo do erro foi de -0,002 mm. No ensaio descendo o erro máximo foi de 0,016 mm, e o desvio máximo -0,068 mm.

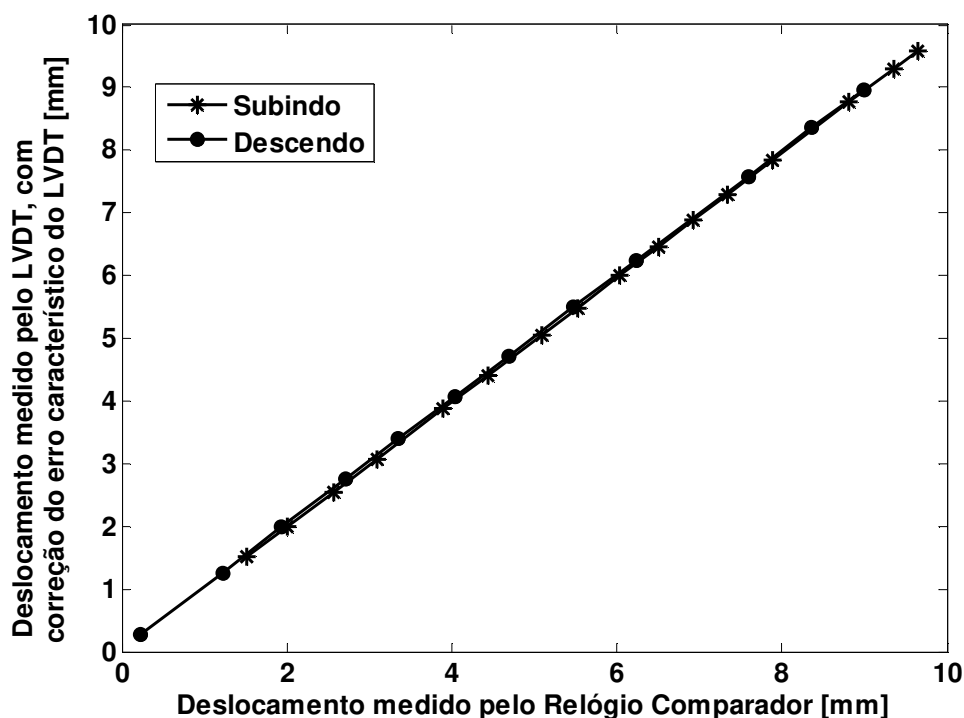


Figura 4.17 – Diferença de medição entre o LVDT da vertical e o relógio comparador, após correção do erro característico do LVDT.

As haste dos cilindros hidráulicos se movimentam quando as bombas hidráulicas são desativadas devido a força da gravidade. Esta movimentação prejudicou as leituras dos valores medidos, ocasionando uma diferença crescente nos valores, chegando a 0,09 mm. Acredita-se, que a histerese observada entre os movimentos de subida e descida, se deva também à movimentação dos cilindros no momento em que foi feita a tara dos sensores para início do deslocamento. A derivação de linearidade por histerese para este modelo de LVDT é menor que 0,2%, segundo o fabricante. Isso demonstra que esse desvio não é devido ao LVDT.

Havendo necessidade de maior precisão na verificação da velocidade de movimentação do sistema de oscilação, deve ser realizada outra medição comparativa. Neste teste, deve ser acionado o sistema de compressão, que evitará a movimentação dos êmbolos dos cilindros hidráulicos verticais quando a bomba hidráulica estiver desligada.

Os erros característicos de medição do LVDT são significativos e variáveis em seu comprimento. Assim, para maior correção dos valores de deslocamento medidos pelos LVDTs é necessário corrigir os dados adquiridos.

4.5 Verificação do funcionamento do sistema de compressão

Para se conseguir o funcionamento adequado do sistema de compressão com base nos parâmetros definidos em projeto, foi necessário se ter o conhecimento teórico do funcionamento dos sensores e atuadores deste sistema, bem como a verificação isolada de cada um destes sensores. Para a integração destes sensores e atuadores ao sistema de compressão do TGD, foi necessário verificar a atuação destes no conjunto do sistema de compressão. O sistema de compressão é constituído basicamente por dois cilindros hidráulicos, controlados por uma válvula proporcional redutora de pressão e duas células de carga. A Figura 4.18a mostra o ponto de atuação do sistema de compressão e a Figura 4.18b mostra a célula de carga e o mancal esquerdo do sistema de compressão.

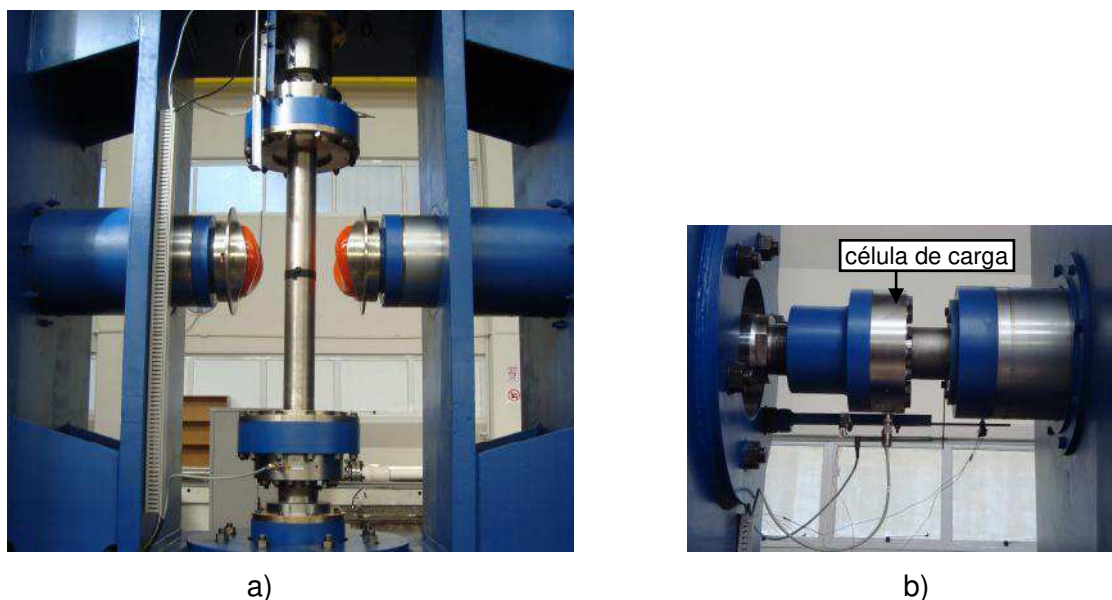


Figura 4.18 – Sistema de compressão das amostras: a) Parte do Tribômetro onde atua a compressão; b) Célula de carga que mede a força de compressão.

Os Certificados de Calibração das células de carga, fornecidos pelo fabricante, foram considerados como base para utilização deste sensor na instrumentação do TGD. As forças especificadas para o TGD, a princípio para dutos de quatro polegadas, são de até 100 kN. As células de carga tem sensibilidade que varia com a força aplicada. Para a força de 200 kN a célula de carga da direita tem sensibilidade de $-0,8386 \text{ mV/V}$ para compressão. A célula de carga da esquerda do sistema de compressão apresentou a sensibilidade de $-0,8353 \text{ mV/V}$ para compressão em 200 kN. A sensibilidade das células de carga podem ser ajustadas para 1 mV/V , de acordo com o manual “Instruções de Montagem” fornecido pelo fabricante.

Antes das células de carga serem integradas ao TGD, com o objetivo de conhecer o funcionamento do sensor de força, validar a aquisição de dados e confirmar a calibração executada pelo fabricante, foram feitas no LTAD verificações de funcionamento das mesmas, de modo estático, com cargas de até 1 kN. Estas verificações seguiram as instruções de uso do equipamento feitas pelo fabricante. A verificação foi feita por comparação utilizando cargas de peso conhecido, medida em balança com certificado de calibração. Os resultados desta verificação de funcionamento ficaram dentro do esperado. Não foi possível realizar ensaios com cargas maiores devido à dificuldade de deslocar a carga e a falta de uma balança capaz de verificar o valor da carga com precisão equivalente à da célula de carga.

Após a montagem das células de carga no sistema de compressão, foi verificado o desempenho das mesmas no sistema. Foram planejados experimentos para conhecer a atuação da válvula de redução proporcional de pressão, que controla as forças aplicadas pelos êmbolos dos cilindros hidráulicos e a resposta das duas células de carga. Através deste ensaio, foram gerados dados para a identificação deste sistema e a criação de um sistema de controle em malha aberta para testes.

Primeiramente, para executar a verificação de funcionamento das células de carga integradas no sistema de compressão do TGD, foi preparado um ensaio, utilizando um bloco de metal em substituição ao sistema com amostras para que se pudesse aplicar as forças máximas do sistema de compressão, foi considerado que a válvula de redução proporcional de pressão é o ponto crítico no controle da força de compressão.

A faixa de variação de corrente de ativação desta válvula está no intervalo de 4 a 20 mA. A pressão de trabalho máxima da válvula é de 31 MPa, sendo a pressão máxima que o sistema hidráulico fornece é de 20 MPa. A válvula proporcional de redução de pressão tem resposta linear com valores de pressão acima de 6% da pressão máxima da válvula, que equivale à corrente de ativação linear de 7,2 mA a 20 mA, conforme gráfico fornecido pelo fabricante, Fig. 4.19.

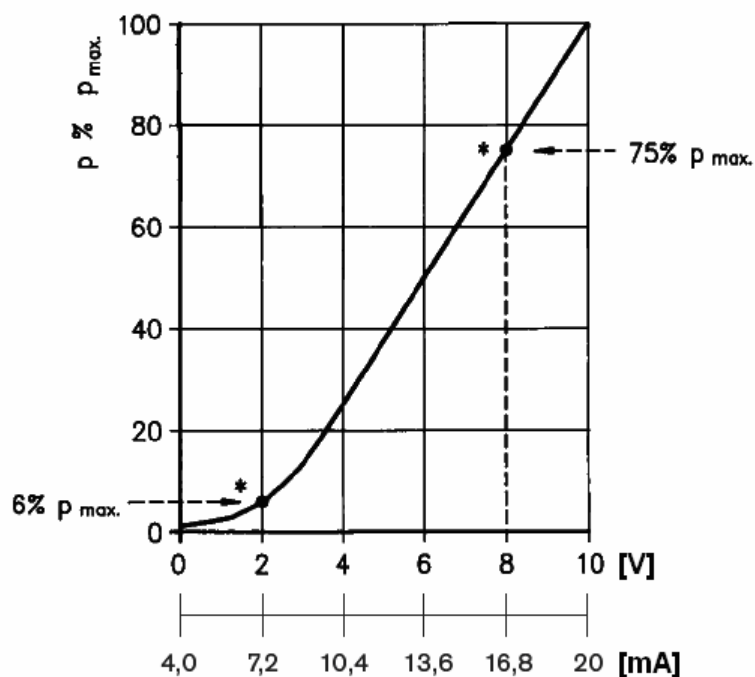


Figura 4.19 – Curva de pressão em função da corrente de ativação da válvula proporcional de redução de pressão (Bosch Rexroth).

Neste ensaio, foram aplicados 20 valores diferentes de corrente de ativação na faixa adequada a ativação da válvula, de 4 a 20 mA. A cada valor de corrente foi feita a leitura da pressão interna nos cilindros hidráulicos através do manômetro digital da unidade hidráulica, mostrado na Fig. 4.20. Além disso, os valores das forças de compressão foram registrados pelas células de carga da parte direita e da parte esquerda do sistema de compressão.



Figura 4.20 – Bloco de válvulas da unidade hidráulica mostrando o manômetro digital do sistema de compressão e válvulas do Tribômetro.

Os valores de pressão medidos são apresentados no gráfico da Fig. 4.21. O sistema satura em 16 mA, que corresponde a 20 MPa. O gráfico mostra pouca variação da pressão até 7,2 mA. De 2 a 18 MPa a válvula tem atuação linear e crescente com a corrente.

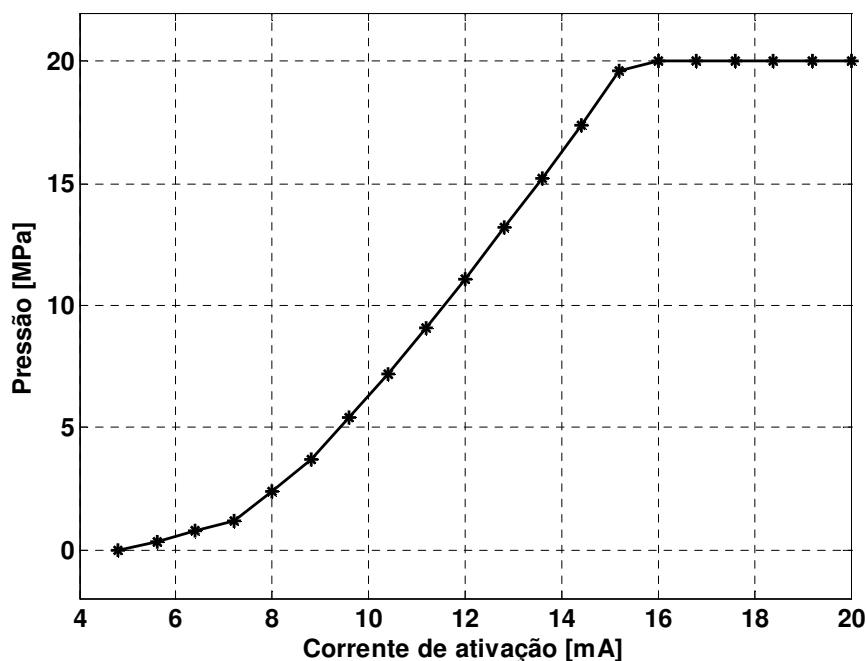


Figura 4.21 – Pressão verificada no manômetro digital em função da corrente de ativação aplicada à válvula de redução proporcional de pressão.

Para comparação dos resultados obtidos no ensaio com o gráfico da válvula proporcional redutora de pressão fornecido pelo fabricante, foi feita a conversão dos dados para percentuais da pressão máxima da válvula, que é de 31 MPa. O gráfico da Fig. 4.22 apresenta os resultados obtidos em percentual de pressão hidráulica, com a variação de corrente de ativação.

A região do gráfico acima de 7,2 mA é considerada linear pelo fabricante. O sistema de compressão do TGD satura com valores de corrente acima de 15,2 mA, a declividade do gráfico ($\Delta Y/\Delta X$) nesta região considerada linear é 7,4198, sendo que o gráfico fornecido pelo fabricante tem a declividade de 7,1875, considerando os valores de corrente 7,2 mA e 16,8 mA.

Observa-se no gráfico da Fig. 4.22, que a corrente de ativação de 7,2 mA não produz 6% da pressão máxima, como especificado pelo fabricante, o valor encontrado é de 3,8% da pressão máxima.

A seguir é descrito outro ensaio realizado para detalhar o funcionamento da válvula que controla o sistema de compressão na região de pressão abaixo de 10% da pressão

máxima. Foi considerado que o funcionamento da válvula corresponde ao descrito nas informações técnicas fornecidas pelo fabricante.

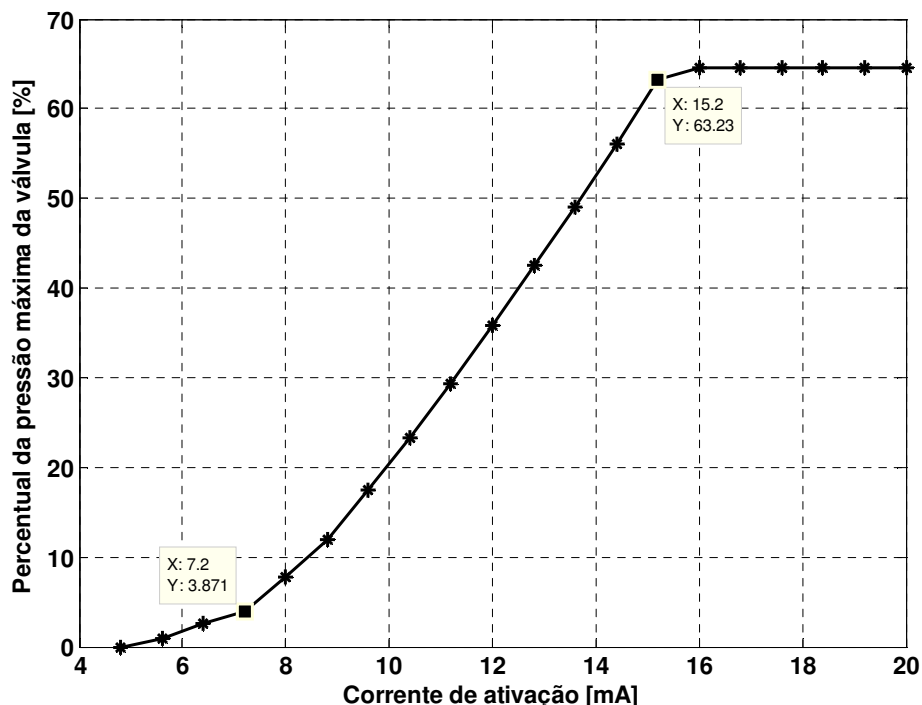


Figura 4.22 – Curva do percentual da pressão máxima da válvula pela corrente de ativação da válvula proporcional de redução de pressão, com pressão máxima de 31 MPa.

As forças medidas pelas duas células de carga do sistema de compressão, durante este ensaio, são praticamente iguais para cada valor de pressão aplicada, como mostra o gráfico da Fig. 4.23. No TGD, as forças são aplicadas na mesma direção, em sentidos opostos e sobre o mesmo corpo de prova. Verifica-se com estes valores um parâmetro de correto funcionamento das células de carga no sistema.

As forças medidas pelas células de carga estão de acordo com o projetado para o TGD, com o sistema de compressão saturado em pressão, o que ocorre com a abertura da válvula acima de 75% da pressão máxima, a força detectada pelas células de carga atingem uma média de 980 kN, sendo que foi construído para que com 20 MPa ou 200 bar atingir 1000 kN.

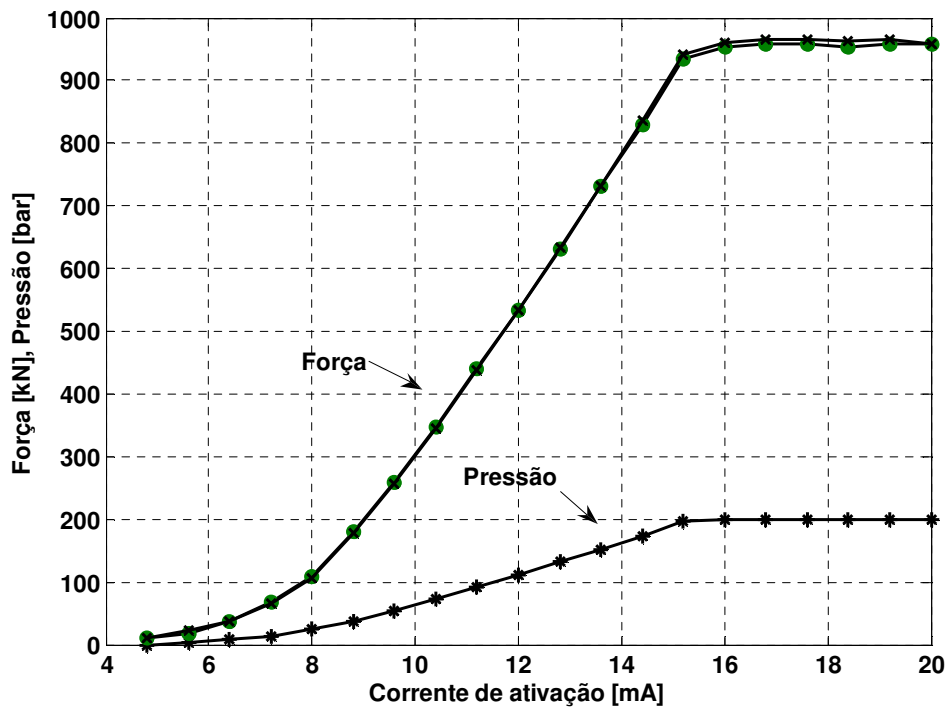


Figura 4.23 – Curva de operação do sistema hidráulico de compressão.

Utilizando a relação da Eq. 3.2, onde $\text{Pressão [N/m}^2\text{]} = \text{Força [N]} / \text{Área [m}^2\text{]}$ e a relação de equivalência $1 \text{ [N/m}^2\text{]} = 1 \text{ [Pa]}$, para os dados coletados durante o ensaio de pressão e força, obteve-se o gráfico da Fig. 4.24. Observando-se a região de linearidade da válvula informada pelo fabricante e os dados apresentados no gráfico da Fig. 4.24, verifica-se que a relação entre força e pressão até 8 mA variou em cerca de 65% em relação a região de linearidade, que é de 8 a 20 mA. Na faixa de linearidade a relação entre a força e a pressão é praticamente constante. Esta relação demonstra o funcionamento correto do sistema hidráulico de compressão e das duas células de carga.

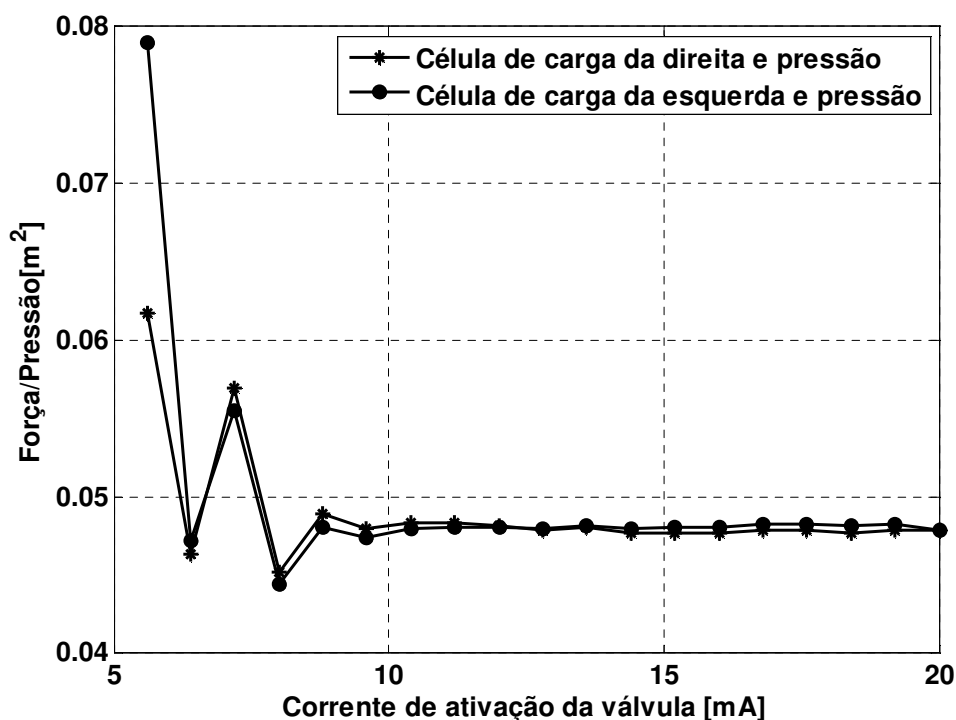


Figura 4.24 – Relação entre os valores de pressão e forças das duas células de carga em função da corrente de ativação.

Como especificado pelo projeto do TGD para o sistema de compressão, a pressão máxima de contato das amostras é de 3 MPa. Com os dados do ensaio anterior, decidiu-se realizar outro ensaio utilizando como objetos de compressão, as amostras de material de enrijecedor e o eixo central em substituição a amostra de duto flexível. A área de contato medida entre as amostras de enrijecedor e o eixo central é de 0,0131 m². Para se obter a pressão máxima no contato das amostras é necessária uma força máxima de 39,37 kN, ou 4,01 tf.

Foi definido executar um ensaio restringindo a identificação a atuação da válvula e das células de carga aos parâmetros que a princípio serão utilizados no equipamento. A força de compressão das amostras num intervalo de 2 a 5 tf, ou 19,62 a 49,05 kN. Para gerar esta força de compressão é necessária uma corrente de ativação de 5,6 a 7,2 mA, valores na faixa não linear da válvula proporcional redutora de pressão, utilizada no sistema de compressão das amostras.

Os dados coletados do ensaio anterior em que foi utilizada toda a faixa de valores de corrente de ativação da válvula, possibilitou a criação de uma equação para controle de malha aberta da força de compressão. Esta equação abrangia toda a faixa de trabalho da válvula. A equação foi testada e apresentou como resposta valores que divergiam muito do

esperado. Resolve-se não utilizá-la no acionamento do sistema. Assim, o sistema foi dividido em duas partes e foram geradas duas equações. Uma equação para a faixa de 0 a 8,0 mA de corrente de ativação, que é a faixa não linear, também não apresentou bons resultados de controle. A outra equação para a faixa de 8,0 a 20,0 mA apresentou boa resposta de controle, com pouca variação da resposta esperada.

4.6 Verificação do funcionamento do sistema de oscilação

O TGD executará o movimento de oscilação do eixo central na direção vertical durante os ensaios. O eixo central é a base para fixação da amostra de duto flexível. A Figura 4.25a mostra uma foto deste eixo central instalado no TGD. Este movimento oscilatório é realizado pelo acionamento em conjunto dos cilindros hidráulicos das partes superior e inferior. A movimentação dos cilindros hidráulicos é controlada por uma válvula limitadora de pressão e uma válvula direcional proporcional que controla a vazão de óleo para a movimentação dos dois cilindros hidráulicos de maneira conjunta, porque os dois cilindros estão interligados. Duas células de carga medem as forças aplicadas pelos dois cilindros hidráulicos. Um LVDT acompanha o deslocamento do eixo central no movimento oscilatório, ver Fig. 4.25 b.

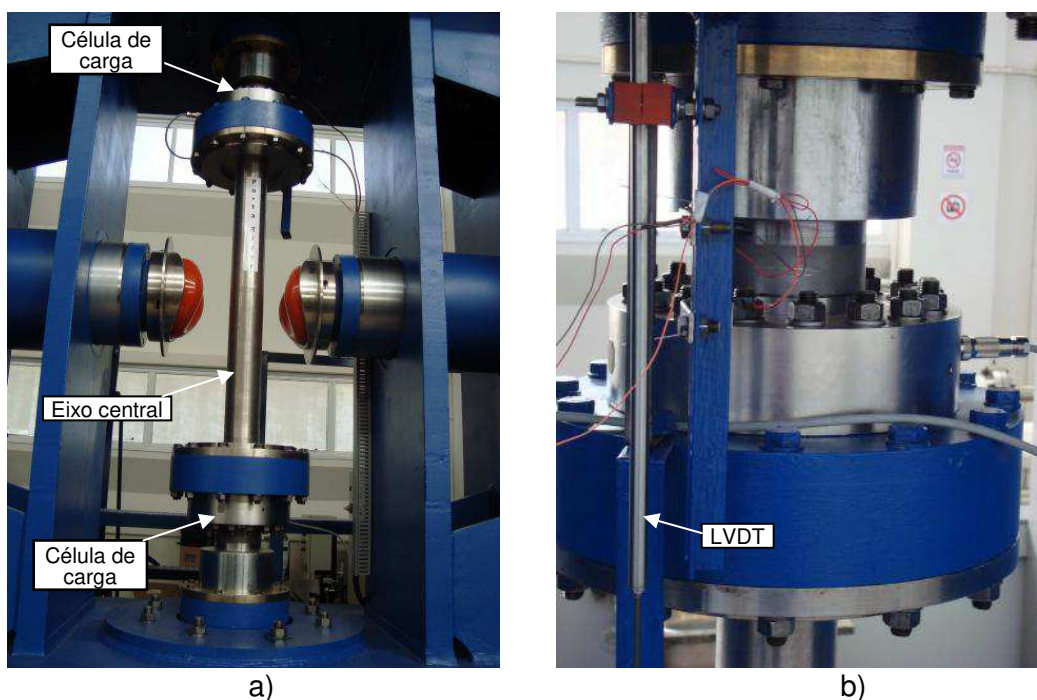


Figura 4.25 – Sistema de movimentação vertical do duto flexível: a) Eixo central; b) LVDT do sistema de oscilação.

Como primeiro passo para verificar o funcionamento do sistema de oscilação foi feito um ensaio sem utilizar a compressão das amostras. Neste ensaio foi verificado o deslocamento do eixo central e a atuação das chaves fim-de-curso que limitam a amplitude deste deslocamento. O gráfico da Fig. 4.26 apresenta o sinal recebido do LVDT do sistema de oscilação. O eixo fez um movimento de 143,1 mm de maneira uniforme na subida e descida do eixo. Neste ensaio a pressão máxima do sistema de oscilação foi ajustada para 3 MPa e o percentual de ativação da válvula de controle de vazão em 15%.

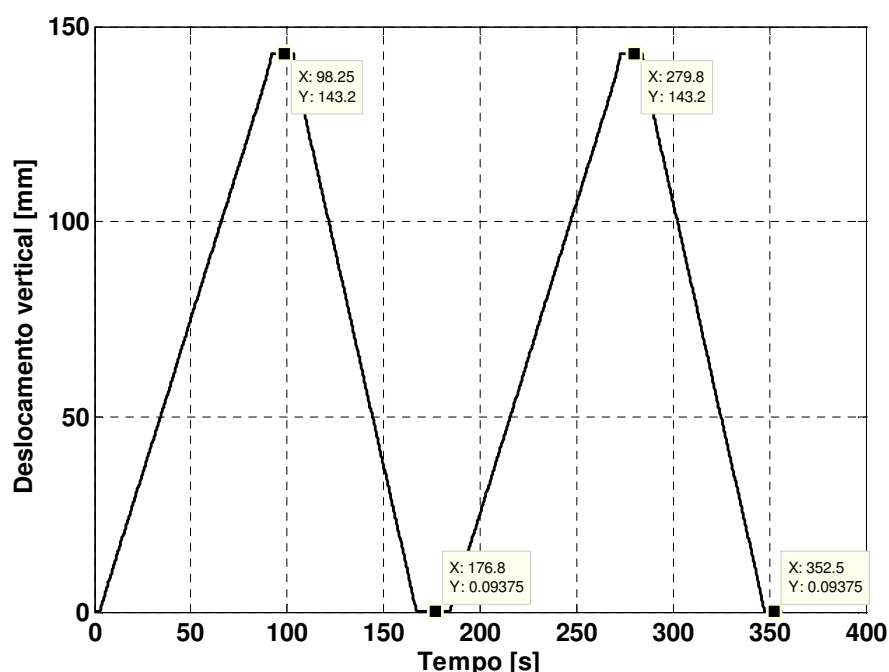


Figura 4.26 – Deslocamento do eixo central medido através do LVDT, sistema com pressão máxima de 3 MPa e vazão em 15%.

Pelos dados da Tab. 4.4 referentes a este ensaio, verifica-se que o tempo de subida do eixo foi de 89,5 s e é maior que o tempo de descida, que foi de 63,75 s. Isto se deve ao movimento ser na direção vertical, sofrendo influência da força da gravidade. Neste ensaio, sistema hidráulico foi configurado para trabalhar com parâmetros fixos, sendo que os resultados demonstram a necessidade de um sistema de controle para se obter a mesma velocidade de movimentação na subida e na descida do eixo.

Tabela 4.4 – Dados do ensaio de deslocamento do eixo central.

Tempo de subida [s]	Deslocamento na subida [mm]	Tempo de descida [s]	Deslocamento na descida [mm]
89,50	143,13	63,75	143,04

Para maior conhecimento do sistema de oscilação, foi executado outro ensaio mais completo, com pressão ajustada manualmente para os valores máximos de 3 MPa, 6 MPa, 8 MPa e 15 MPa. A vazão da válvula de controle proporcional de vazão foi definida através do programa de monitoramento, nos seguintes valores de percentual de abertura: 15%, 35%, 50%, 75% e 99%.

Neste ensaio foi verificada a relação entre o funcionamento do sistema hidráulico de oscilação e a velocidade de movimentação do eixo central. Na Tab. 4.5 são apresentados os limites mínimo e máximo de configuração de pressão e vazão do ensaio (pressão: 3 MPa, vazão: 15% e pressão: 8 MPa, vazão: 99%), tendo como resultado dados de tempo e deslocamento. Nestes dados verifica-se que, aumentando pressão e vazão, o tempo para os cilindros fazerem o deslocamento vertical é menor. Na Tab. 4.6. são apresentadas as velocidades resultantes destes valores de configuração. Verifica-se com estes dados que a velocidade com pressão máxima de 8 MPa e vazão de 99% está no máximo que foi projetado para o sistema 10 mm/s.

Tabela 4.5 – Relação entre as diferentes configurações do sistema hidráulico e o tempo de deslocamento do eixo vertical.

Sistema hidráulico	Tempo de subida [s]	Deslocamento [mm]	Tempo de descida [s]	Deslocamento [mm]
Pressão máxima: 3 MPa Vazão: 15%	89,5	143,13	63,75	143,04
Pressão máxima: 8 MPa Vazão: 99%	15,0	144,48	14,0	141,35

Tabela 4.6 – Relação entre as diferentes configurações do sistema hidráulico e a velocidade de deslocamento do eixo vertical.

Sistema hidráulico	Velocidade de subida [mm/s]	Velocidade de descida [mm/s]
Pressão máxima: 3 MPa Vazão: 15%	1,59	2,24
Pressão máxima: 8 MPa Vazão: 99%	9,63	10,09

Com pressão máxima ajustada em 15 MPa, o sistema satura em 25% de abertura da válvula de controle de vazão, com a velocidade máxima do sistema hidráulico de 10 mm/s, ver Fig. 4.27.

A velocidade de oscilação do eixo central do TGD será de no máximo 4 mm/s, com pressão máxima ajustada em 15 MPa, os percentuais de vazão tem menor faixa valores para ajuste da velocidade, do que fixar a pressão máxima em valores menores. Assim, este valor de pressão máxima não é mais analisado nos próximos ensaios, onde se foi definido o melhor ajuste de pressão máxima em 6 MPa.

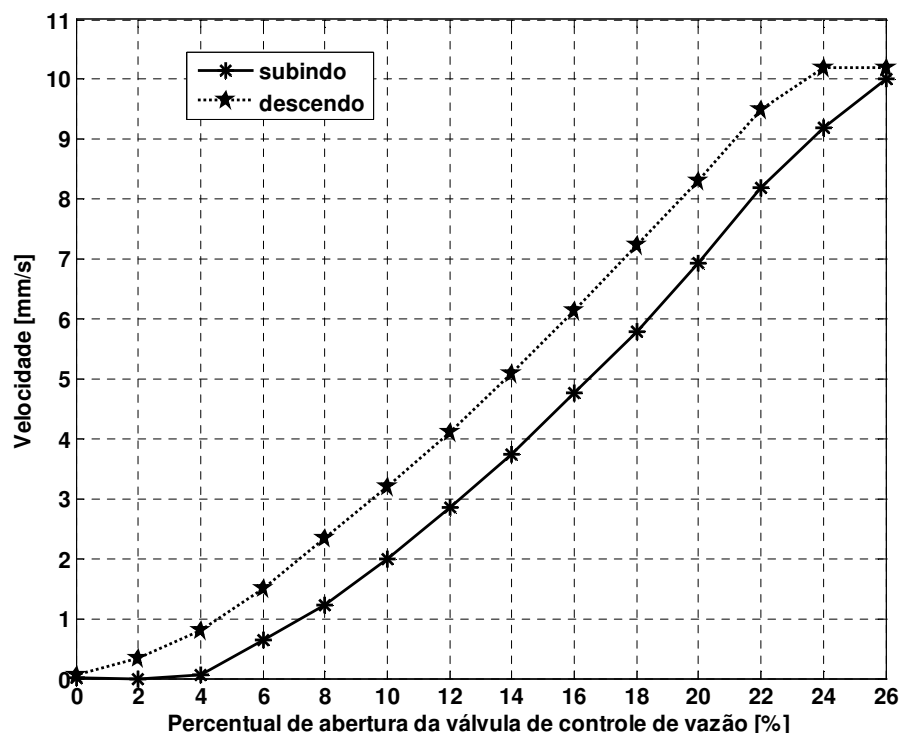


Figura 4.27 – Velocidade do sistema de oscilação em função do percentual de ativação da válvula de controle de vazão, com pressão limitada em 15 MPa.

A Fig. 4.28 mostra a comparação dos valores adquiridos com pressão máxima de 3 MPa, 6 MPa e 8 MPa. Com pressão máxima de 3 MPa, o sistema satura aproximadamente na velocidade de 8 mm/s, não chegando a atingir a velocidade máxima de 10 mm/s. Foi observado através do manômetro analógico, que com valores menores de vazão a pressão do sistema não chega aos valores máximos. Por exemplo com pressão máxima ajustada para 8 MPa, com vazão de 15%, a pressão do sistema atinge 3,3 MPa. Estes valores baixos de pressão, quando a vazão também é baixa, são consequência da baixa resistência mecânica à movimentação do cilindro.

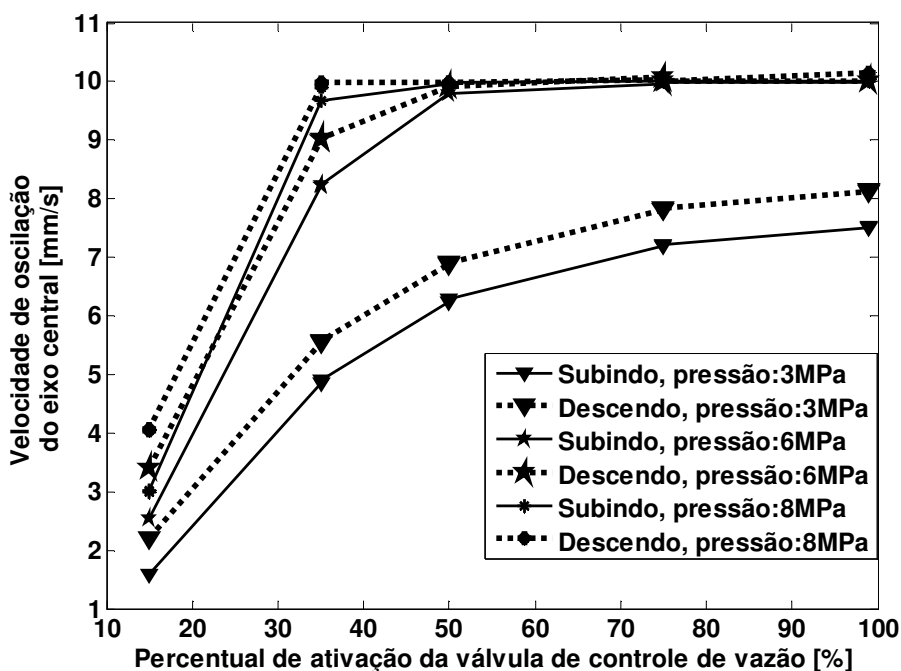


Figura 4.28 – Comportamento da velocidade de oscilação em função do percentual de ativação da válvula de controle de vazão, com três configurações de pressão máxima, sem atuação do sistema de compressão.

Foi executado um outro ensaio para se obter maiores detalhes operacionais do sistema hidráulico de oscilação, com pressão máxima em 6 MPa. Este valor foi escolhido por se mostrar mais adequado ao trabalho do TGD, uma vez que não há saturação da velocidade tão rapidamente como as pressões de 8 e 15 MPa e por atingir a velocidade máxima, o que não ocorre com a limitação da pressão a 3 MPa. Neste ensaio foi variado o percentual de vazão de dois em dois, partindo de zero até que o sistema atingisse a velocidade de 4 mm/s, como é desejado para o trabalho do TGD, ver resultados no gráfico da Fig. 4.29. Este ensaio produziu dados para ser gerado um controle de malha aberta da velocidade.

A equação 4.1 foi definida para o controle de malha aberta do movimento de descida. E a equação 4.2 foi definida para o controle de velocidade no movimento de subida, onde x é a velocidade em mm/s e y é o percentual de abertura da válvula de controle de vazão. No gráfico da Fig. 4.29 são apresentadas as retas resultantes desta equações para comparação.

$$y = 3,28x + 3,20 \quad (4.1)$$

$$y = 3,84x + 4,72 \quad (4.2)$$

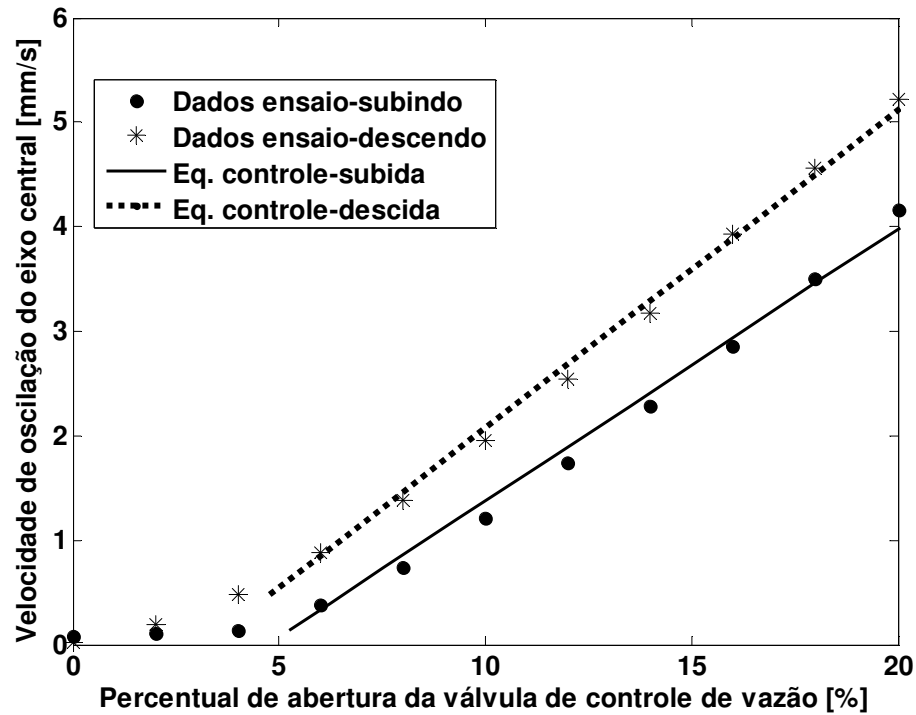


Figura 4.29 – Detalhamento do comportamento da velocidade de oscilação, com pressão limitada a 6 MPa, sem utilização do sistema de compressão.

O Capítulo 5 apresenta o ensaio com o sistema completo, onde é verificado o desempenho do TGD no trabalho conjunto dos sistemas de compressão e oscilação.

CAPÍTULO 5

VERIFICAÇÃO DA INSTRUMENTAÇÃO DO TRIBÔMETRO COM O SISTEMA COMPLETO E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

5.1 Preparação do Tribômetro para realização dos ensaios com toda a instrumentação instalada

Os ensaios preliminares de teste da instrumentação, descritos no Capítulo 4, forneceram informações sobre o funcionamento individualizado, dos sensores; dos atuadores e dos programas de monitoramento. Neste capítulo são apresentados novos ensaios para complementar a verificação do funcionamento da instrumentação, com o TGD completamente montado, inclusive com a amostra de duto flexível e o reservatório de água. Para estes ensaios, foram novamente posicionados e testados todos os sensores de forma individualizada. O funcionamento do sistema hidráulico também foi verificado, antes dos ensaios.

A montagem do TGD, nestes ensaios, foi completada com a instalação do reservatório de água. Ao centro da Fig. 5.1 tem-se uma amostra de duto flexível, em contato com esta amostra estão as amostras de material de enrijecedor. Em torno destas amostras é mostrado o recipiente de contenção de água, sem a tampa frontal. Este recipiente tem a finalidade de propiciar condições mais próximas às reais do local onde ocorre o desgaste, ou seja, da água do mar. Para simular o desgaste que se dá submerso na água do mar, os ensaios poderão ser realizados em água, inclusive com possível controle de temperatura. Para efetuar os ensaios que serão aqui apresentados, a tampa frontal transparente foi colocada na cuba de contenção da água.

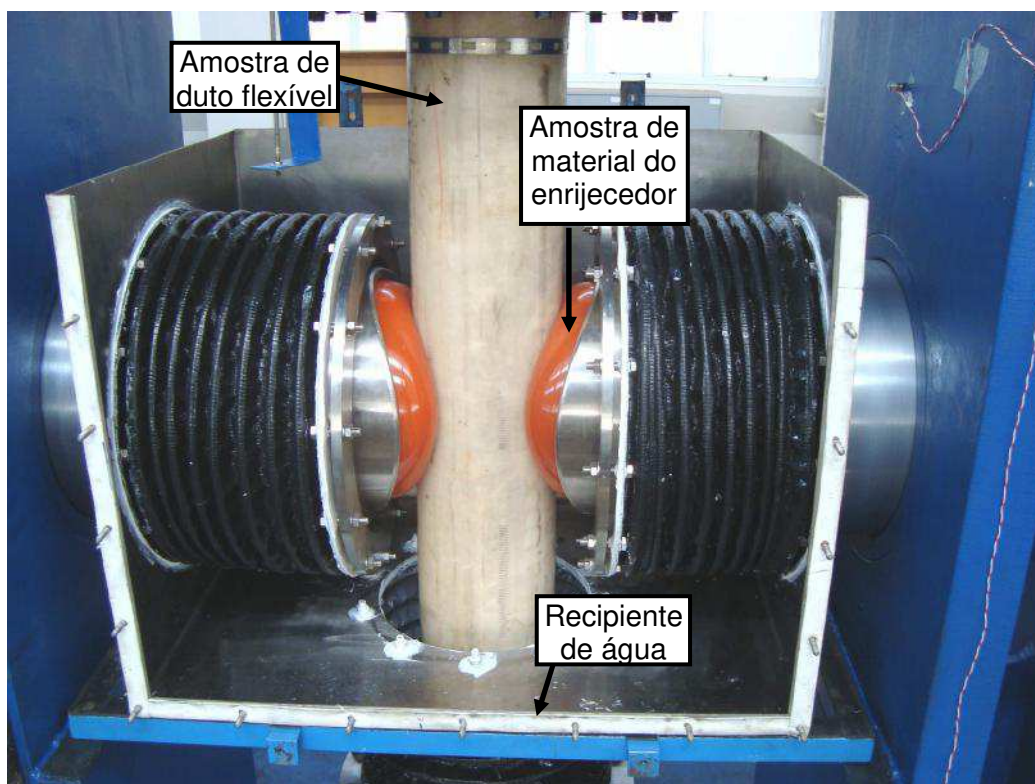


Figura 5.1 – Recipiente de água instalado no Tribômetro para a realização de ensaios submersos.

A área de contato das amostras ficou maior do que a medida nos ensaios do Capítulo 4, devido ao diâmetro da parte central ter aumentado com a instalação da amostra de duto flexível no TGD. Para a quantificação da área efetiva de contato das amostras de material de enrijecedor com a amostra de duto flexível, foi feito um procedimento prático para marcar estas áreas de contato. A área de contato cresce com o aumento da força de compressão, devido ao poliuretano ser bastante flexível. Isto já havia sido observado nos ensaios anteriores. Assim, para se obter a medida dessa área, as amostras foram comprimidas com uma força aproximadamente igual à que será utilizada nos ensaios de desgaste. Para este procedimento foram afastadas as amostras de enrijecedor, foi passado giz sobre a área de possível contato no duto flexível. A seguir as amostras de enrijecedor foram molhadas para que ocorresse a adesão do giz quando as amostras estivessem sob compressão. O sistema de compressão foi acionado com 20% de abertura da válvula, de acordo com os ensaios preliminares, resulta em uma força de 66,59 kN. Foram retiradas as amostras dos enrijecedores para identificação da área de contato com o duto flexível, como mostra a Fig. 5.2. A forma da área de contato aproxima-se de uma elipse. Para conhecer a área de contato mediram-se os diâmetros, sendo que o eixo menor foi planejado, pois foi medida a superfície de contato utilizando uma trena. A área de contato, calculada por

aproximação a uma elipse, foi de $0,02067 \text{ m}^2$. As amostras de enrijecedor foram recolocadas no suporte e foi aplicada uma compressão com 30% de abertura da válvula. A força resultante foi de 177,80 kN, com uma área medida de $0,02474 \text{ m}^2$. A diferença na área se deve à maior deformação da amostra com a maior força de compressão.

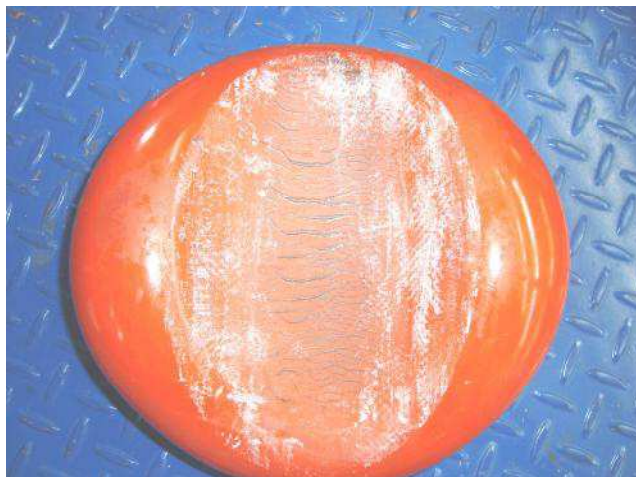


Figura 5.2 – Apresentação da área de contato na amostra de enrijecedor.

Como a parte central do TGD foi desmontada para colocação da amostra de duto flexível e do recipiente de água, foram feitos testes preliminares para verificar o funcionamento dos sistemas de oscilação e de compressão. Utilizaram-se alguns percentuais de compressão e de oscilação. Com a ativação da válvula de compressão em 50%, a capa polimérica da amostra do duto flexível foi movimentada em relação à parte metálica interna. Para solucionar este problema fez-se necessário fixar a parte polimérica com abraçadeiras de alta resistência.

Nesta parte de preparação dos ensaios com o sistema completo foi realizada a verificação da resposta das equações que foram geradas para controle de malha aberta, as equações do sistema de compressão não apresentaram bons resultados, devido a válvula de controle de pressão estar atuando em sua faixa não linear, como verificado no Capítulo 4. Assim, decidiu-se fazer os ensaios configurando percentuais de ativação das válvulas de controle dos sistemas de compressão e de oscilação. Como a pressão de contato das amostras projetada para os ensaios de desgaste é de até 3 MPa, para o sistema de compressão foram definidos os valores de percentuais de ativação da válvula de controle de pressão da Tab. 5.1, adequados às pressões de projeto e selecionados de acordo com os resultados dos ensaios descritos no Capítulo 4.

Tabela 5.1 – Percentuais de ativação da válvula de controle de compressão, força adquirida com sistema estático e pressão de contato das amostras calculada com o uso destes valores de força e com a área de contato de 0,02067 m².

Percentual de ativação da válvula de controle de compressão das amostras	Força de compressão medida sem oscilação [kN]	Pressão de contato das amostras [MPa], calculada com a área de 0,02067 m ²
10%	23,69	1,15
15%	37,77	1,82
20%	66,59	3,22

O sistema tribológico real, que determinou os parâmetros para a construção do TGD, se movimenta com velocidade de até 4 mm/s, faixa de velocidade que será utilizada no sistema de oscilação do TGD. Para os testes deste capítulo foram utilizados os percentuais da Tab. 5.2, resultantes das análises do sistema de oscilação mostradas no Capítulo 4. Esta tabela relaciona os percentuais de abertura da válvula de controle de vazão com a velocidade de movimentação do eixo central na subida e descida.

Tabela 5.2 – Percentuais utilizados para oscilação nos ensaios com o sistema completo e velocidades de subida e descida medidas sem uso de compressão.

Percentual de abertura da válvula de controle de vazão, com pressão máxima de 6 MPa, do sistema de oscilação	Velocidade de subida do eixo central [mm/s], sem compressão	Velocidade de descida do eixo central [mm/s], sem compressão
12%	1,705	2,540
14%	2,279	3,174
16%	2,881	3,846
18%	3,518	4,534
20%	4,178	5,229

Os parâmetros dos ensaios com o sistema completo, ver Tab. 5.3, foram retirados do cruzamento dos percentuais de ativação das válvulas de controle de compressão e de oscilação, mostrados nas Tab. 5.1 e 5.2.

Tabela 5.3 – Parâmetros dos ensaios com o sistema completo.

Parâmetros dos Ensaios		Percentual de ativação da válvula de controle de compressão das amostras		
		10%	15%	20%
Percentual de ativação da válvula de controle de vazão do sistema de oscilação, com pressão máxima em 6 MPa.	12%	Ensaio 1	Ensaio 6	Ensaio 11
	14%	Ensaio 2	Ensaio 7	Ensaio 12
	16%	Ensaio 3	Ensaio 8	Ensaio 13
	18%	Ensaio 4	Ensaio 9	Ensaio 14
	20%	Ensaio 5	Ensaio 10	Ensaio 15

Para cada par de percentuais de ativação das válvulas de controle de compressão e de oscilação, realizou-se o seguinte trabalho mecânico: o sistema de compressão foi ativado; após a estabilização da força de compressão, o sistema de oscilação movimentou a amostra de duto flexível, partindo do ponto de contato com a chave fim-de-curso superior; a amostra de duto flexível desceu até o contato com a chave fim-de-curso inferior, parou e subiu novamente ao ponto de partida, realizando um ciclo completo. Durante este ciclo de oscilação foi gerado um arquivo com os dados advindos dos sensores, para serem posteriormente analisados. Os ensaios foram realizados com o TGD completo e com as amostras submersas em água, como mostra a foto da Fig. 5.3.



Figura 5.3 – Equipamento montado para os ensaios com o sistema completo.

5.2 Monitoramento de vibrações nos ensaios com o sistema completo

No Capítulo 4 foi descrito o ensaio realizado no Drill Pipe para validação do funcionamento dos acelerômetros e do programa desenvolvido para monitoramento de vibrações. Neste Capítulo são descritos testes preliminares do funcionamento do sistema de

monitoramento de vibração no TGD. Estes testes fazem parte dos ensaios para verificação da instrumentação com o TGD completo.

Em trabalhos futuros, recomenda-se fazer testes complementares para ajuste do sistema de monitoramento de vibração, que deverão ser realizados com o TGD executando o processo de desgaste por deslizamento, o que torna este monitoramento mais eficiente, devido a provável variação de nível de vibração com o processo de desgaste em andamento.

Foram fixados os quatro acelerômetros no TGD, sendo os mesmos identificados como: 00, 01, 02 e 03. O acelerômetro 00 foi instalado na parede lateral da estrutura do TGD, parede esta que faz a sustentação do mancal do sistema de compressão das amostras, como mostra a Fig. 5.4. Esta posição foi escolhida a princípio, com o intuito de verificar se as paredes da estrutura têm rigidez suficiente para sustentar o movimento de oscilação do duto flexível, bem como verificar se as paredes percebem níveis perigosos de vibração resultante do movimento das hastes dos cilindros no sistema de compressão.

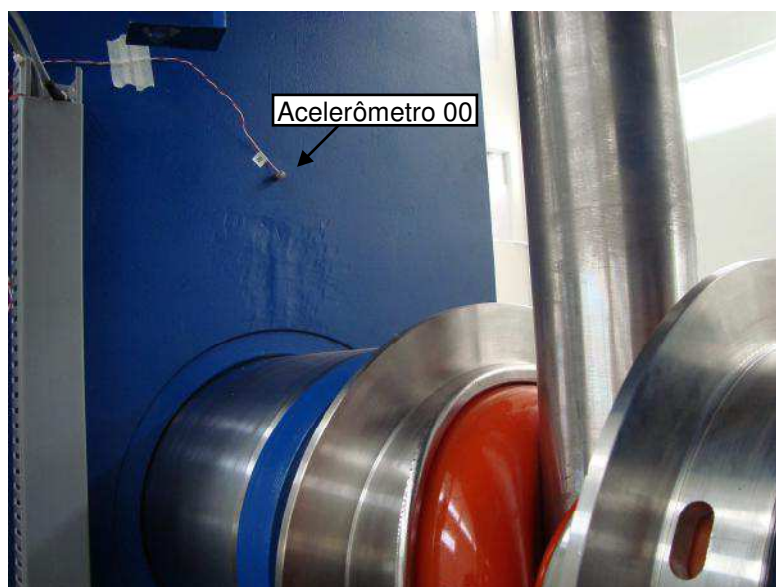


Figura 5.4 – Ponto de instalação do acelerômetro 00.

O acelerômetro 01 foi fixado na horizontal na face da estrutura do TGD que sustenta o sistema de oscilação, como mostra a Fig. 5.5. Esta foi considerada a parte da estrutura que sofreria maior vibração, devido ao movimento oscilatório do duto flexível. Com esta medição é possível verificar se a estrutura está submetida a vibração que possa provocar danos físicos à mesma.

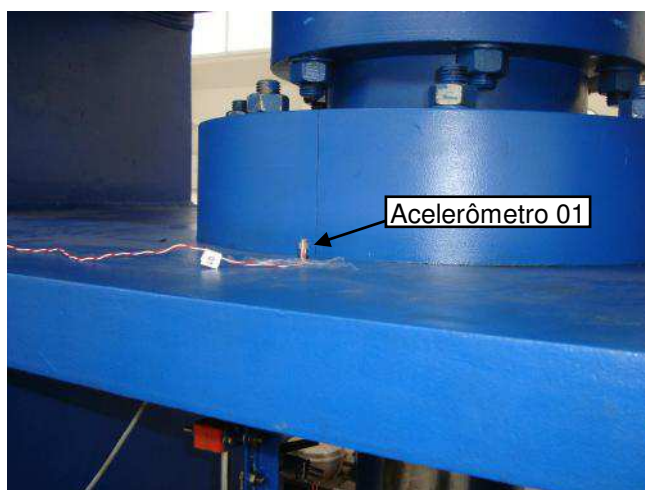


Figura 5.5 – Ponto de instalação do acelerômetro 01.

O acelerômetro 02 foi instalado sobre o mancal do cilindro de compressão esquerdo, como mostra a Fig. 5.6. Este posicionamento foi escolhido com a finalidade de verificar a vibração do sistema de compressão durante o ensaio, bem como a eventual existência de folga entre o mancal e a estrutura, que seria percebida no início de movimentação do sistema de oscilação.

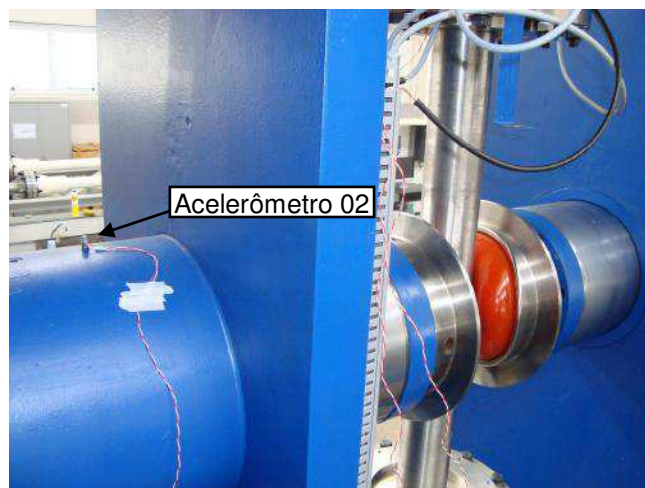


Figura 5.6 – Ponto de instalação do acelerômetro 02.

O acelerômetro 03 foi fixado ao lado da célula de carga superior, sobre a estrutura de fixação do eixo central, como mostra a Fig. 5.7, com a finalidade de monitorar a vibração do sistema de oscilação do duto flexível. Este é o acelerômetro que muito provavelmente perceberá maior vibração, pois ele se movimenta junto com a amostra de duto flexível. Acredita-se que este é o acelerômetro que mais captará deslocamentos bruscos em caso de

problemas com o processo de desgaste e vibrações que possam causar danos ao sistema de oscilação e compressão.

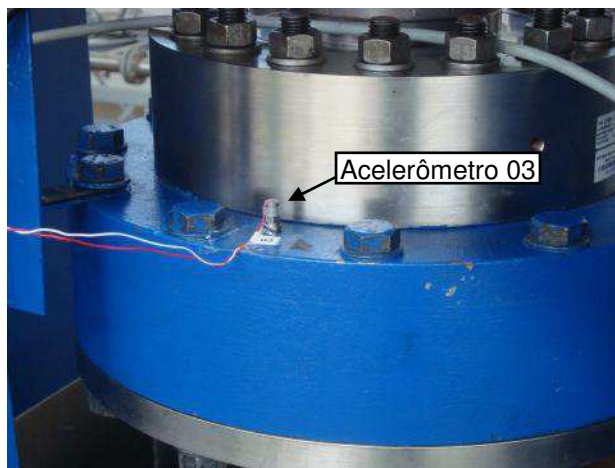


Figura 5.7 – Ponto de instalação do acelerômetro 03.

Antes do ensaio com o sistema completo foram realizados testes para verificar o funcionamento do monitoramento de vibrações.

Como foi descrito no Capítulo 3, a vibração é um movimento oscilatório repetitivo, e a sensibilidade do acelerômetro fornecida pelo Certificado de Calibração está na unidade de medida de $\text{mV}/(\text{m/s}^2)$. Assim os sinais adquiridos foram convertidos para a unidade de medida de aceleração $[\text{m/s}^2]$.

Foram analisados os dados de vibração com os motores elétricos desligados, onde se observou apenas ruídos de baixa amplitude no tempo, e na análise na frequência não se observou nenhuma amplitude diferenciada e nenhuma frequência específica.

Após esta verificação, foram ligados os motores elétricos do sistema hidráulico, a amplitude de vibração apresentou um pico no acionamento dos motores, sendo que após a estabilização dos motores, os níveis de vibração retornaram aos mesmos valores do teste com os motores desligados.

Utilizando-se um martelo foi realizado um teste da percepção dos acelerômetros a um impacto na estrutura. Na Fig. 5.8 se observa o comportamento da amplitude de vibração no teste do impacto. Foi possível observar que todos os acelerômetros captaram a vibração gerada pelo impacto.

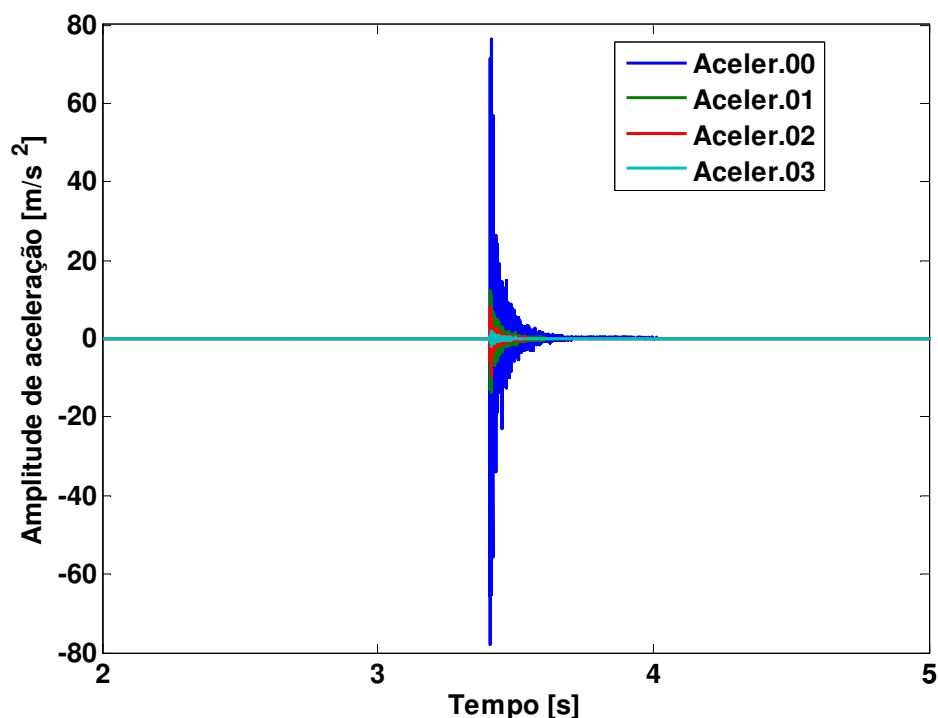


Figura 5.8 – Teste de percepção de um impacto pelos acelerômetros.

Foi realizada a aquisição dos sinais de vibração durante um teste de movimentação dos cilindros hidráulicos do sistema de compressão, foram executados alguns deslocamentos sequenciais com paradas de movimentação, para se observar o comportamento da vibração. Os resultados são apresentados no gráfico da Fig. 5.9, onde se observa amplitudes de vibração maior somente no início de cada movimentação dos cilindros hidráulicos horizontais. O acelerômetro 00 instalado na parede lateral da estrutura apresentou a maior amplitude de vibração, neste teste. O gráfico da Fig. 5.10 apresenta a resposta em frequência deste teste, sendo que neste gráfico foram retiradas as frequências menores que 0,5 Hz. No gráfico se observa que não ocorreram picos diferenciados de amplitude de vibração na faixa de frequências de 0,5 a 500 Hz.

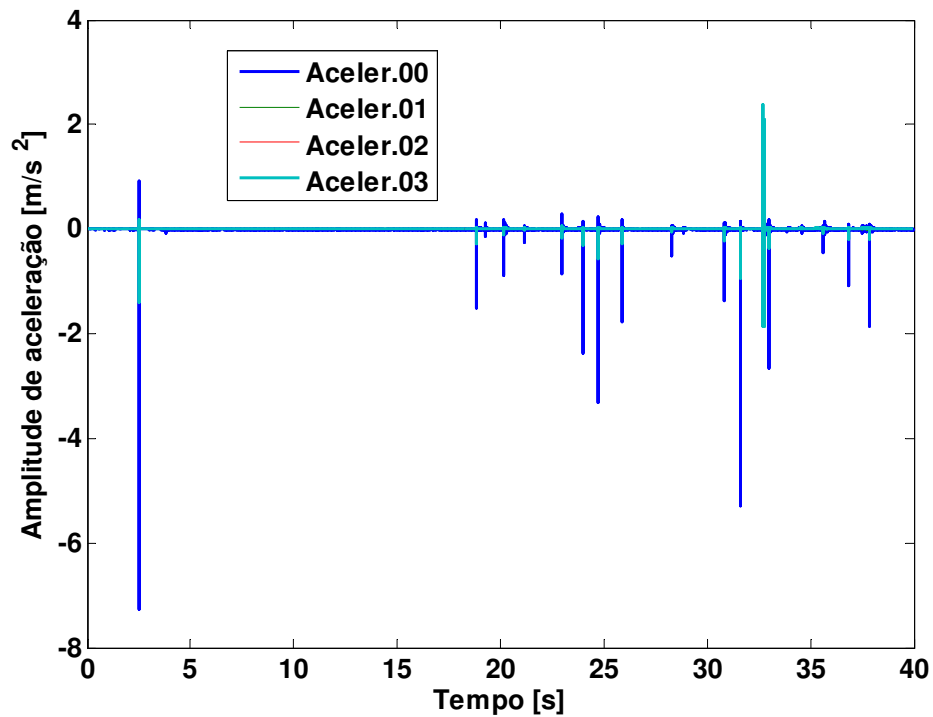


Figura 5.9 – Vibração gerada pelos movimentos dos cilindros hidráulicos de compressão.

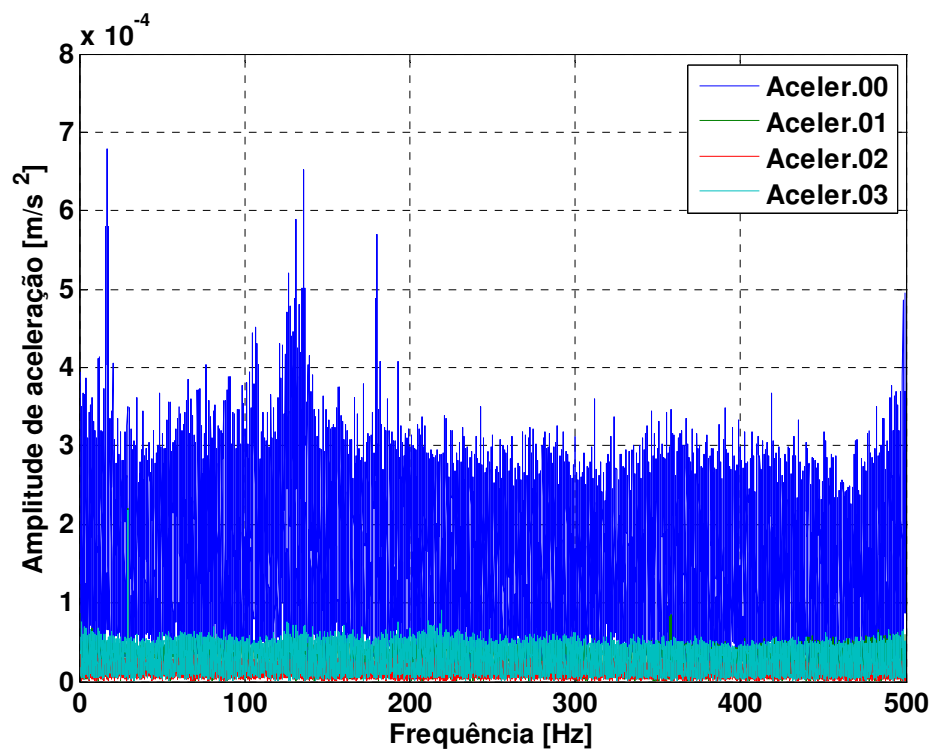


Figura 5.10 – Análise na frequência da vibração devido aos movimentos dos cilindros hidráulicos de compressão.

Após estes testes iniciais, os dados de vibração foram coletados dos ensaios utilizando os sistemas de compressão e oscilação, foi realizada uma análise comparativa dos valores de vibração dos dados de três ensaios. Os ensaios escolhidos para análise são: o de menor força de compressão e menor velocidade de oscilação; o de maior compressão e maior velocidade; e o ensaio intermediário entre os extremos de compressão e velocidade, apresentados na Tab. 5.4.

Tabela 5.4 – Parâmetros de operação do Tribômetro selecionados para análise de vibrações.

	Ensaio 01	Ensaio 08	Ensaio 15
Percentual de abertura da válvula proporcional de controle de pressão do sistema de compressão	10%	15%	20%
Percentual de abertura da válvula proporcional de controle de vazão do sistema de oscilação	12%	16%	20%

Para se verificar a influência dos valores da força de compressão e da velocidade de movimentação do eixo central sobre a vibração do sistema, foram comparados os aspectos da vibração nos ensaios analisados. Foi realizada também uma análise dos dados de vibração nas etapas distintas de movimentação mecânica, incluindo o deslocamento da base onde está fixado o acelerômetro em função da frequência.

A amplitude máxima de aceleração mostra o potencial de deslocamento vibratório máximo do local onde o acelerômetro está posicionado, na sua direção de maior sensibilidade. Para cada ensaio analisado em suas diferentes condições, os valores de amplitude de aceleração máxima são mostrados na Tab. 5.5. Observa-se que a amplitude de vibração aumenta com o aumento da força de compressão e a velocidade de oscilação.

Tabela 5.5 – Amplitude máxima de aceleração, referente à vibração.

Amplitude	Aceler. 00 [m/s ²]	Aceler. 01 [m/s ²]	Aceler. 02 [m/s ²]	Aceler. 03 [m/s ²]
Ensaio 01	0,0817	0,0940	0,0520	0,1249
Ensaio 08	0,0815	0,1258	0,0618	0,2186
Ensaio 15	0,1148	0,2222	0,0900	0,2982

Os pontos que apresentaram maior amplitude de vibração para estes ensaios são: o ponto onde está localizado o acelerômetro 03, ver Fig. 5.7, sobre o suporte do eixo central, e onde está localizado o acelerômetro 01, ver Fig. 5.5, na parte horizontal da estrutura, acima do eixo central.

O gráfico da Fig. 5.11 se refere ao sinal de vibração percebido pelo acelerômetro 00, ver Fig. 5.4, fixado na parede lateral da estrutura. Esse gráfico corresponde a um ciclo

completo do ensaio de desgaste, ou seja, incluindo os movimentos de descida, repouso e subida, onde se verifica que esta parte da estrutura do TGD não sofre influência significativa da movimentação do eixo central. Esse gráfico não apresenta significativa diferenciação de amplitude de vibração comparando as diferentes etapas do ciclo, como se pode observar no gráfico da Fig. 5.12.

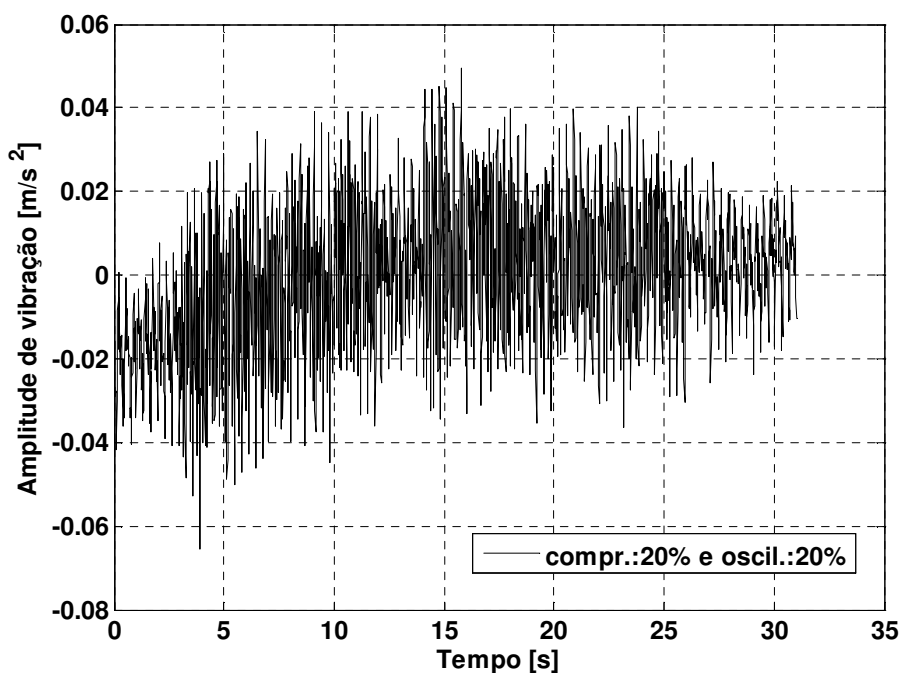


Figura 5.11 – Amplitude de vibração percebida pelo acelerômetro 00 no Ensaio 15, num ciclo completo de movimentação do eixo central, compressão: 20 % e oscilação: 20%.

O acelerômetro 01, ver Fig. 5.6, posicionado sobre o mancal do cilindro horizontal do lado esquerdo, identificou diferentes níveis de vibração no sistema de compressão, em cada uma das etapas do ciclo de movimentação. Como mostra o gráfico da Fig. 5.12, há uma mudança na amplitude de vibração, a medida que o ensaio é executado.

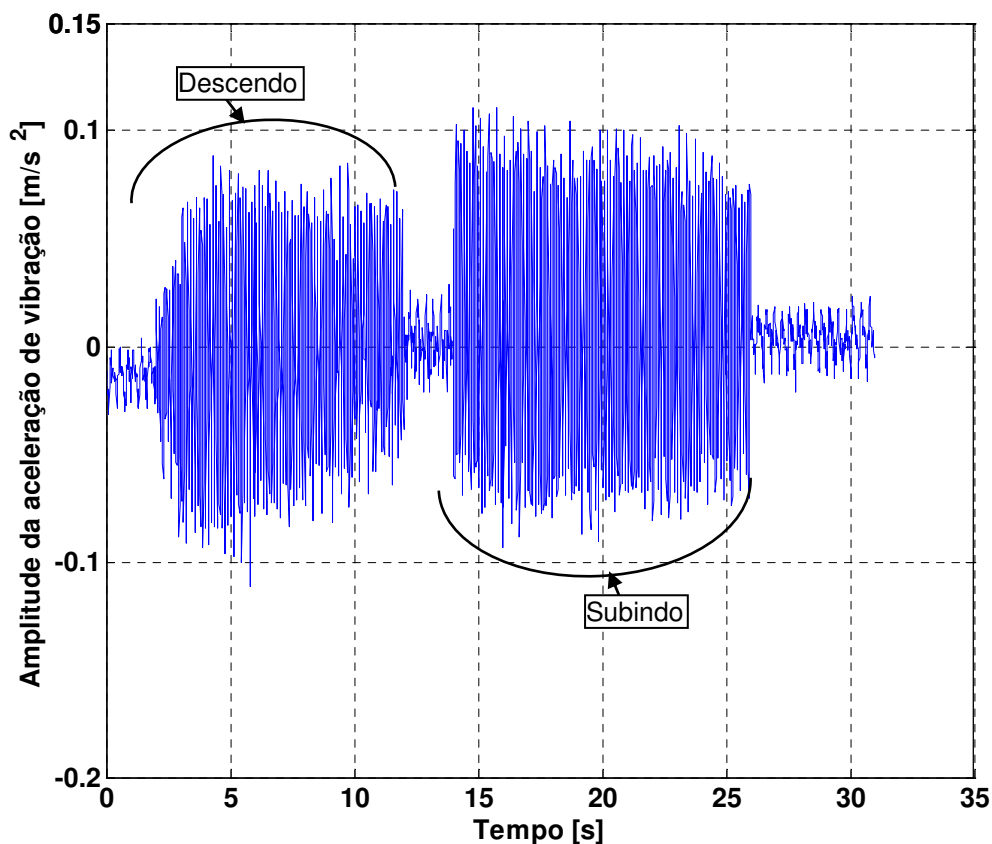


Figura 5.12 – Exemplo de variação do nível de amplitude de vibração, com o sistema de oscilação: parado; descendo e subindo. Sinais captados pelo acelerômetro 01, no Ensaio 15.

Dividiu-se a análise de vibração por etapa dinâmica do sistema de oscilação, para verificar a diferença de vibração em cada etapa, comparando os seguintes estados de operação do TGD: sistema de oscilação parado; eixo central descendo; eixo central subindo. Nesta análise o sistema de compressão está atuando com percentual de ativação constante.

No gráfico da Fig. 5.13, da amplitude de aceleração do sinal de vibração em função de sua frequência, observa-se que a amplitude de vibração é maior na frequência de 90 Hz e nos seus múltiplos e submúltiplos. A amostragem do sinal de vibração foi realizada a 1000 Hz. Foi definida uma resolução de frequência de 10 Hz, com o armazenamento de 100 pontos a cada 1000 amostrados.

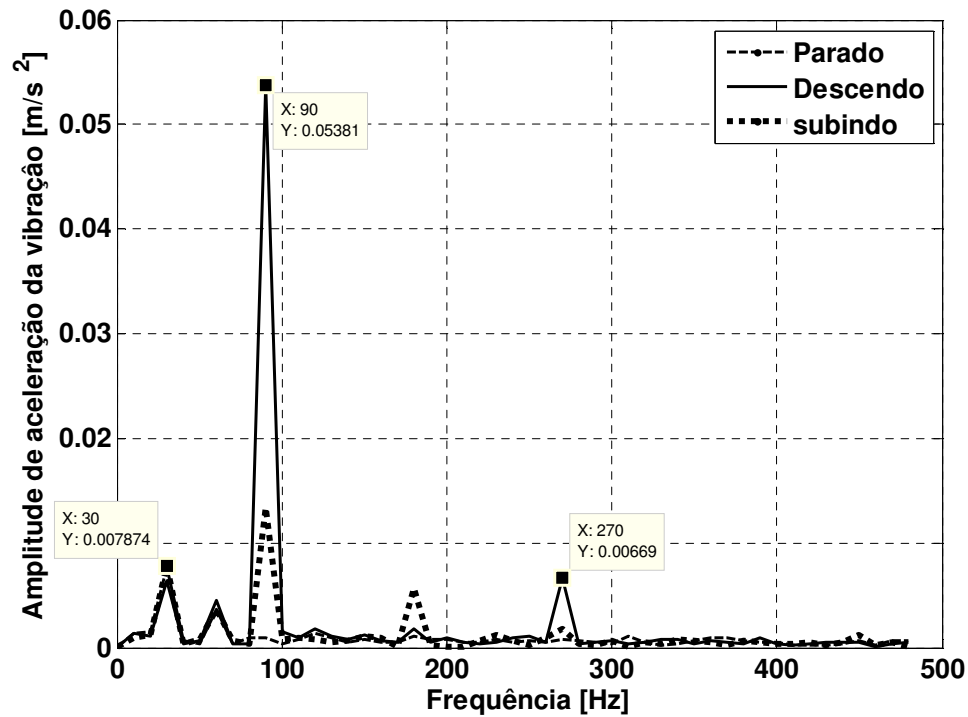


Figura 5.13 – Comparação de amplitude de aceleração medida pelo acelerômetro 03, no Ensaio 1, com eixo central: parado, descendo e subindo.

As Figuras 5.14, 5.15 e 5.16 apresentam os deslocamentos percebidos pelo acelerômetro 03 nas diferentes fases do ciclo de movimentação do TGD. Os valores críticos de deslocamento do ponto onde está fixado o sensor são nas frequências de 10 Hz, 30 Hz e 90 Hz. Os valores de frequência [Hz] e amplitude de deslocamento [nm] estão identificados nos gráficos para os pontos críticos.

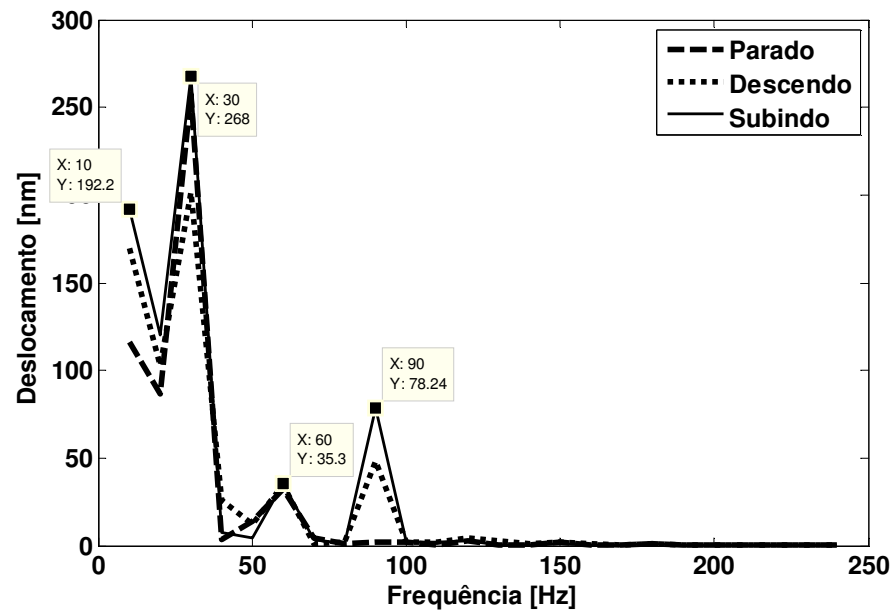


Figura 5.14 – Comparação do deslocamento medido pelo acelerômetro 03, no Ensaio 1, sistema de oscilação: parado, descendo e subindo.

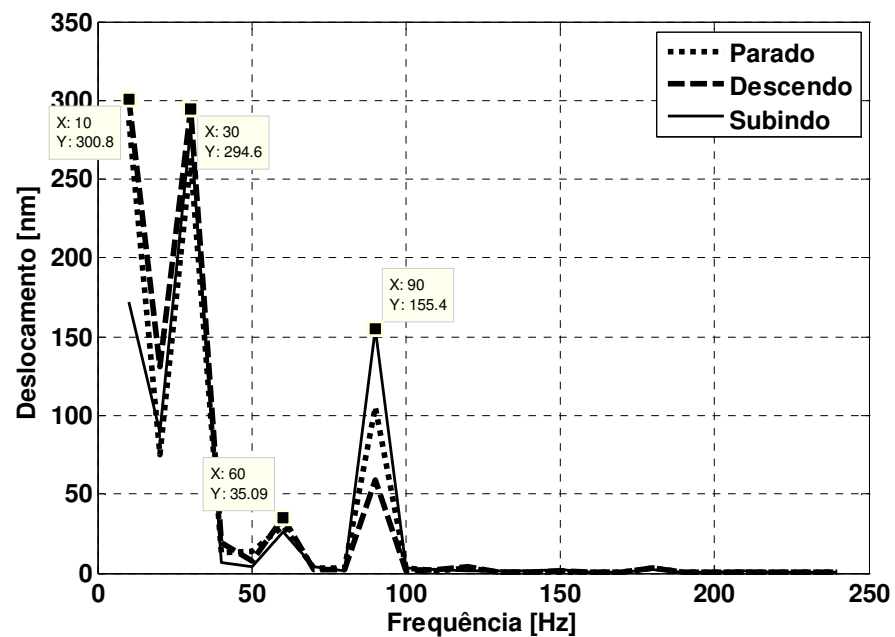


Figura 5.15 – Comparação do deslocamento medido pelo acelerômetro 03, no Ensaio 8, sistema de oscilação: parado, descendo e subindo.

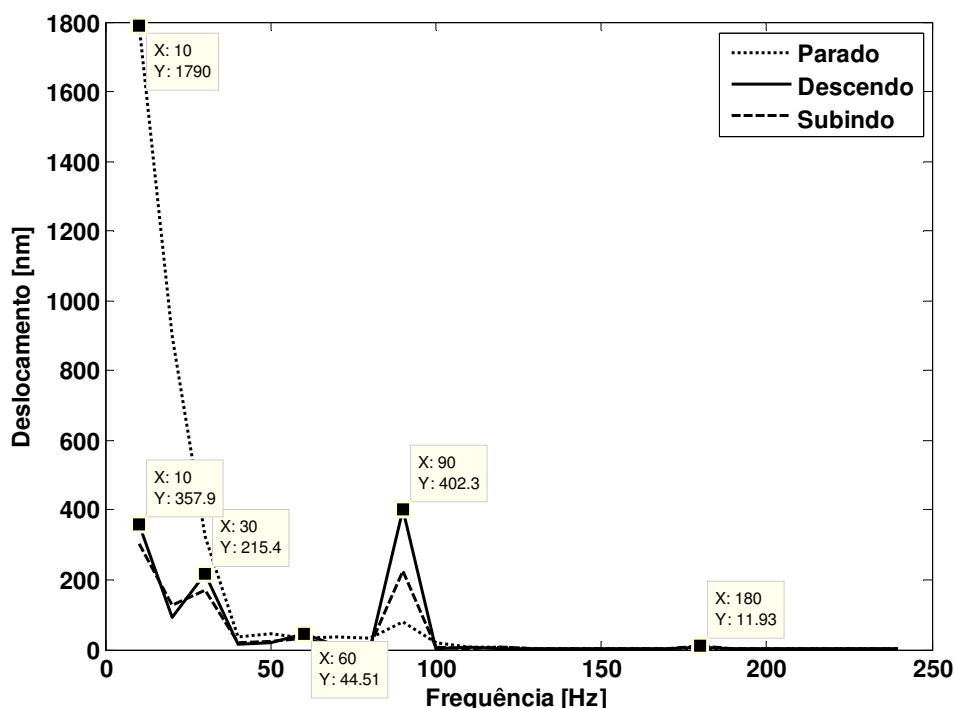


Figura 5.16 – Comparação do deslocamento medido pelo acelerômetro 03, no Ensaio 15, sistema de oscilação: parado, descendo e subindo.

A Tab. 5.6 apresenta os valores de deslocamento percebidos pelo acelerômetro 01, no movimento de descida do eixo central, para cada um dos ensaios analisados, nas frequências que apresentaram maior amplitude de deslocamento. Não se observa um padrão nestes valores, que indique relação com a mudança de velocidade de oscilação.

Tabela 5.6 – Amplitude de deslocamento, em nanômetros, da superfície onde está fixado o acelerômetro 01, no movimento de descida do eixo central, nas frequências de amplitudes críticas.

Acelerômetro 01 Descendo	10 [Hz]	30 [Hz]	60 [Hz]	90 [Hz]
Ensaio 1	169,8	201,5	34,6	48,2
Ensaio 8	300,7	294,6	35,0	58,9
Ensaio 15	237,8	258,2	43,7	168,8

A Tab. 5.7 apresenta o valor de deslocamento percebido pelo acelerômetro 01, no movimento de subida do eixo central, para cada um dos ensaios analisados, nas frequências que apresentaram maior amplitude de deslocamento. Estes valores também não apresentam relação com alteração de velocidade e comparando com a Tab. 5.7 não apresentam relação entre a subida e descida do eixo central.

Tabela 5.7 – Amplitude de deslocamento, em nanômetro, da superfície onde está fixado o acelerômetro 01, no movimento de subida do eixo central, nas frequências de amplitudes críticas.

Acelerômetro 01 Subindo	10 Hz	30 Hz	60 Hz	90 Hz
Ensaio 1	192,1	268,0	35,2	78,2
Ensaio 8	172,2	282,3	26,4	155,3
Ensaio 15	415,4	193,2	52,0	233,3

A instrumentação do monitoramento de vibração apresentou resultados positivos nos pontos escolhidos para análise. O acelerômetro 00, ver Fig. 5.4, fixado a parede vertical do TGD, mostrou que a parte vertical da estrutura do TGD não sofre nenhum abalo significativo com o processo de desgaste por deslizamento, nem demonstrou existir folga entre os mancais dos cilindros horizontais e a parede que os sustenta. O acelerômetro 01, ver Fig. 5.5, por sua vez, fixado sobre a horizontal da estrutura do TGD, mostrou que a estrutura percebe a oscilação da amostra de duto flexível, mas em níveis que não irão gerar danos à mesma. O acelerômetro 02, ver Fig. 5.6, fixado sobre o mancal do cilindro horizontal, demonstrou que não existe folga entre este e a estrutura, e que este não sofre vibração significativa no processo de desgaste por deslizamento. Finalmente, o acelerômetro 03, ver Fig. 5.7, fixado ao lado da célula de carga superior do sistema de oscilação, apresentou as maiores amplitudes de vibração, por estar se movendo com o sistema de oscilação. Ainda assim, esta vibração não é suficiente para causar danos aos componentes do sistema.

Nos testes futuros para ajuste do monitoramento de vibração será necessário verificar se outros pontos apresentam valores mais significativos de vibração durante o ensaio de desgaste. O aumento da resolução em frequência, como citado anteriormente, deve ser também motivo de preocupação dos próximos testes.

5.3 Verificação da instrumentação do sistema de limitação de desgaste das amostras

Como citado no Capítulo 3, dois LVDTs posicionados paralelamente ao movimento dos êmbolos dos cilindros hidráulicos de compressão irão controlar o limite de desgaste das amostras no decorrer dos ensaios. Estes LVDTs tem resolução de 0,0187 mm. No gráfico da Fig. 5.17 são apresentados os dados do LVDT que limita o desgaste, no movimento de subida do eixo central. Este LVDT está localizado em paralelo ao cilindro de compressão da direita. O sistema foi configurado com compressão em 10% de ativação da válvula e com oscilação em cada um dos percentuais de ativação da válvula que estão sendo utilizados nos ensaios. Este gráfico tem a finalidade de verificar a influência da variação da velocidade de oscilação do eixo central no deslocamento indesejado do êmbolo do LVDT. Observa-se

que o LVDT que limita o desgaste da amostra desloca devido ao movimento de oscilação, e que quanto maior a velocidade do movimento de oscilação maior é este deslocamento. O LVDT tem um deslocamento do êmbolo no início do movimento do eixo central, e depois no restante da etapa de subida permanece no mesmo patamar de deslocamento.

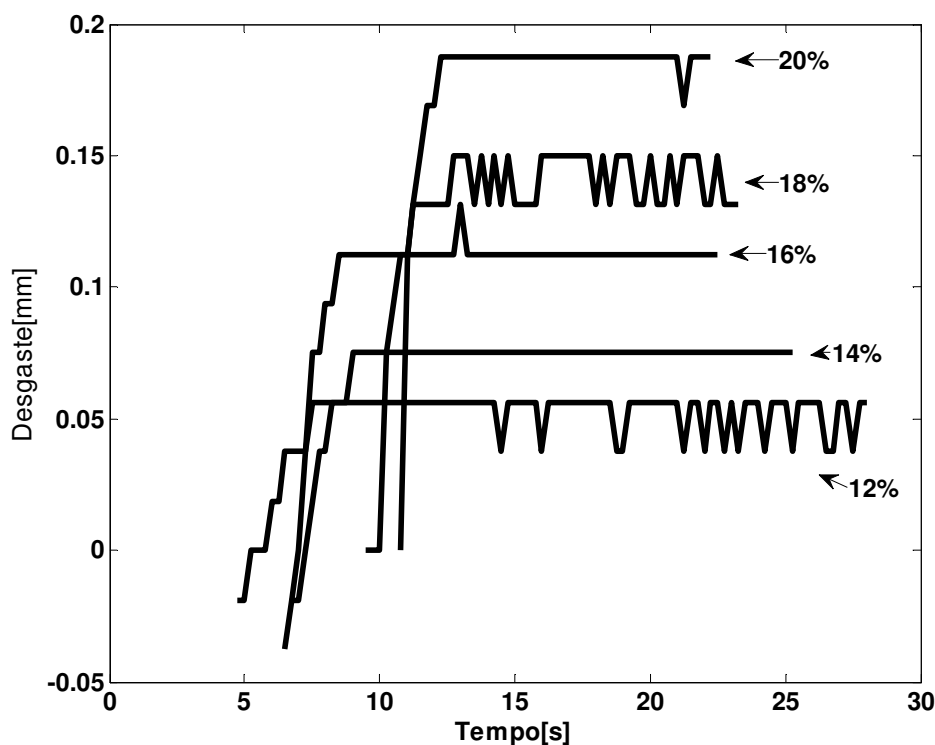


Figura 5.17 – Deslocamento registrado pelo LVDT que limita desgaste em ensaios, do lado direito em diversas velocidades de oscilação; com compressão em 10% e eixo central subindo.

Na Fig. 5.18 observa-se a comparação da atuação dos LVDTs da esquerda e da direita, em um ciclo completo de movimentação, com configuração de percentual de 15% de compressão e 18% de oscilação. O movimento de descida do eixo central é feito no tempo de 7,5 a 21 s, e o movimento de subida no tempo de 22 a 39,5 s.

No movimento de descida do eixo central, os dois LVDTs deslocam os êmbolos positivamente, com se as amostras houvessem sofrido diminuição da espessura. No movimento de subida, os dois LVDTs deslocam seus êmbolos negativamente, como se houvesse aumento da espessura das amostras. Acredita-se que isto se deva à acomodação das amostras de material de enrijecedor dentro do porta-amostra devido a mudança de sentido de deslizamento. Isto pode ainda estar associado à desalinhamentos dos porta-amostras em relação ao eixo central e a amostra de duto flexível.

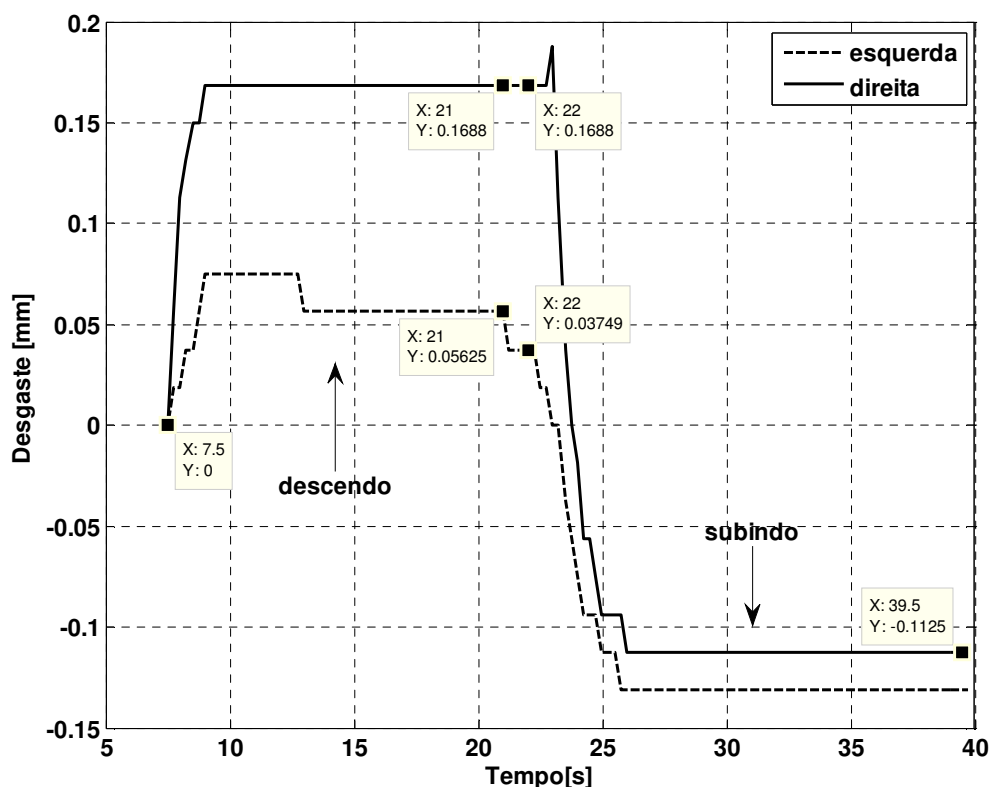


Figura 5.18 – Diferenças de deslocamento medidas pelos LVDTs que limitam o desgaste das amostras da direita e da esquerda; compressão em 15%; oscilação em 18%; nos movimentos de subida e descida do eixo central.

Do gráfico da Fig. 5.19, onde se tem o efeito da velocidade de oscilação do eixo central sobre os deslocamentos medidos pelos LVDTs horizontais, observa-se, que o LVDT da direita se move mais do que o LVDT da esquerda. Isso se deve muito provavelmente ao fato do cilindro hidráulico da direita não ter estabilizado ainda a força de compressão, como pode ser observado na seção 5.4, a seguir. Assim, em trabalhos futuros, sugere-se, executar ensaios com uma quantidade maior de ciclos de oscilação, mantendo os parâmetros de configuração dos sistemas compressão e oscilação. Nessa condição, espera-se que haja uma estabilização do sistema hidráulico de compressão. Conhecendo o comportamento dos LVDTs que limitam o desgaste das amostras, é possível estabelecer uma metodologia eficiente de verificar desgaste das amostras. Como sugestão, poderia ser feita a leitura do deslocamento medido pelos LVDTs após o início do movimento, quando os sinais dos LVDTs se estabilizam.

Destaca-se aqui, que os sinais adquiridos dos LVDTs podem ser corrigidos, levando-se em conta o Certificado de Calibração do fabricante, desde que se observe a faixa de deslocamentos em que o mesmo irá atuar, devido ao erro característico ter valor variável.

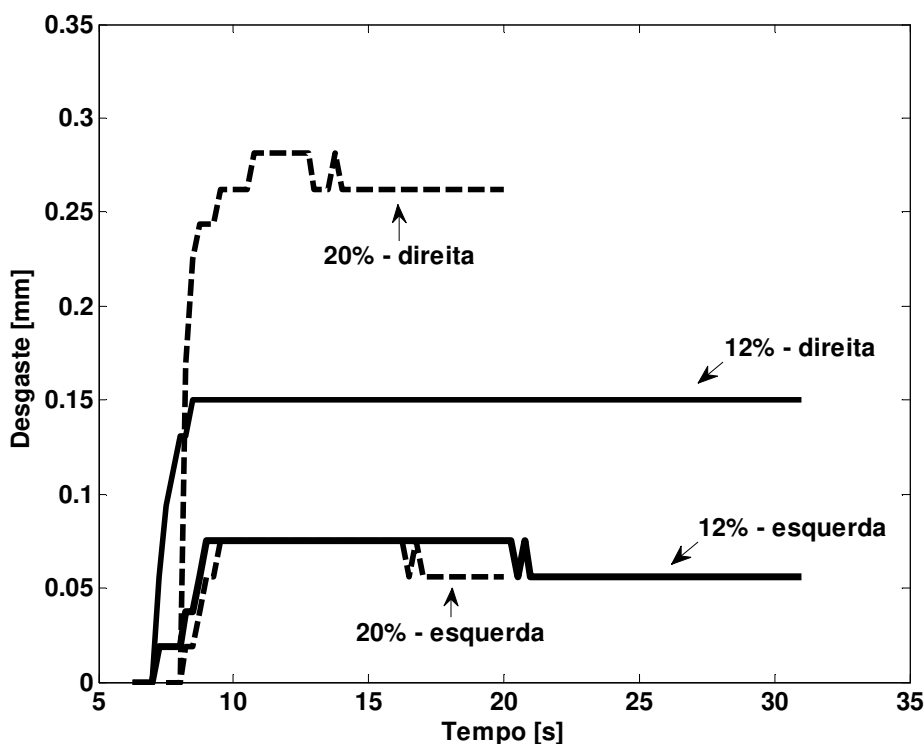


Figura 5.19 – Efeito da velocidade de oscilação no deslocamento medido pelos LVDTs que limitam desgaste a esquerda e a direita, utilizando uma compressão em 20%, oscilação em 12% e 20% para o eixo central descendo.

5.4 Sistema de monitoramento da força de compressão das amostras

Os ensaios com o sistema completo foram realizados com a válvula proporcional de redução de pressão que controla o sistema de compressão em sua faixa não linear, que é abaixo de 25% de corrente de ativação. No ensaio descrito no Capítulo 4, sem uso do sistema de oscilação e com 10% de ativação da válvula de compressão, o valor de força apresentado pelas duas células de carga do sistema de compressão foi de 23,86 kN. O gráfico da Fig. 5.20, mostra que a força medida pela célula de carga da direita não chega a atingir o valor 23,86 kN nas três configurações do sistema de oscilação. Nesse gráfico são marcados os pontos de início e fim dos movimentos de descida e subida do eixo para o percentual de 12% de abertura da válvula do sistema de oscilação. O movimento de descida acontece no intervalo de 4,75 a 28,25 s, e o de subida de 29,5 a 63,75 s. Os vales no valor de força apresentados no gráfico após a mudança do sentido de movimentação do eixo

central devem estar associados a uma acomodação das amostras de material de enrijecedor no porta-amostra e/ou devido à elevada elasticidade do material, considerando também que a força de compressão das amostras é a mais baixa entre as analisadas.

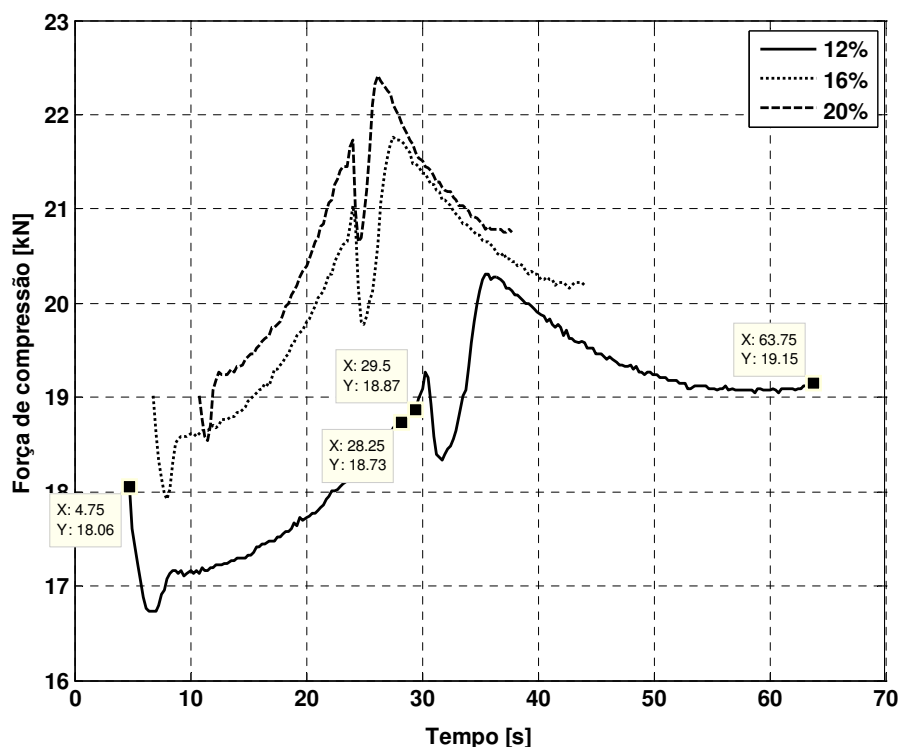


Figura 5.20 – Evolução da força de compressão na célula de carga da direita, em um ciclo completo, em função de diferentes velocidades de oscilação (12%, 16% e 20%), e compressão em 10%.

Aumentando o percentual de abertura da válvula de compressão de 10% para 20%, observa-se no gráfico da Fig. 5.21 a evolução da força em diferentes velocidades de oscilação. Nota-se que a força de compressão variou com a variação da velocidade de oscilação. O movimento de descida do eixo central acontece no entre de 7,5 e 20 s, e o movimento de subida entre 22 e 37,5 s. O valor de força na célula de carga em condição estática, mostrada no Capítulo 4, foi de 66,59 kN. A força medida, neste ensaio, oscilou entre 64,43 e 70,92 kN, o que corresponde a uma variação na pressão de contato de 3,1 para 3,4 MPa.

Diferentemente do observado na Figura 5.20, neste gráfico não são observados vales de acomodação da amostra de material do enrijecedor, após a mudança do sentido de movimentação do eixo central. Acredita-se que isso se deva à maior área de contato entre corpo e contra-corpo, e maior adesão destas superfícies pela maior força para contato, resultando num sistema mais estável.

Assim como discutido na seção anterior (análise dos LVDTs de limitação do desgaste), sugere-se a realização de ensaio com maior quantidade de ciclos de oscilação, verificando o comportamento do sistema de compressão.

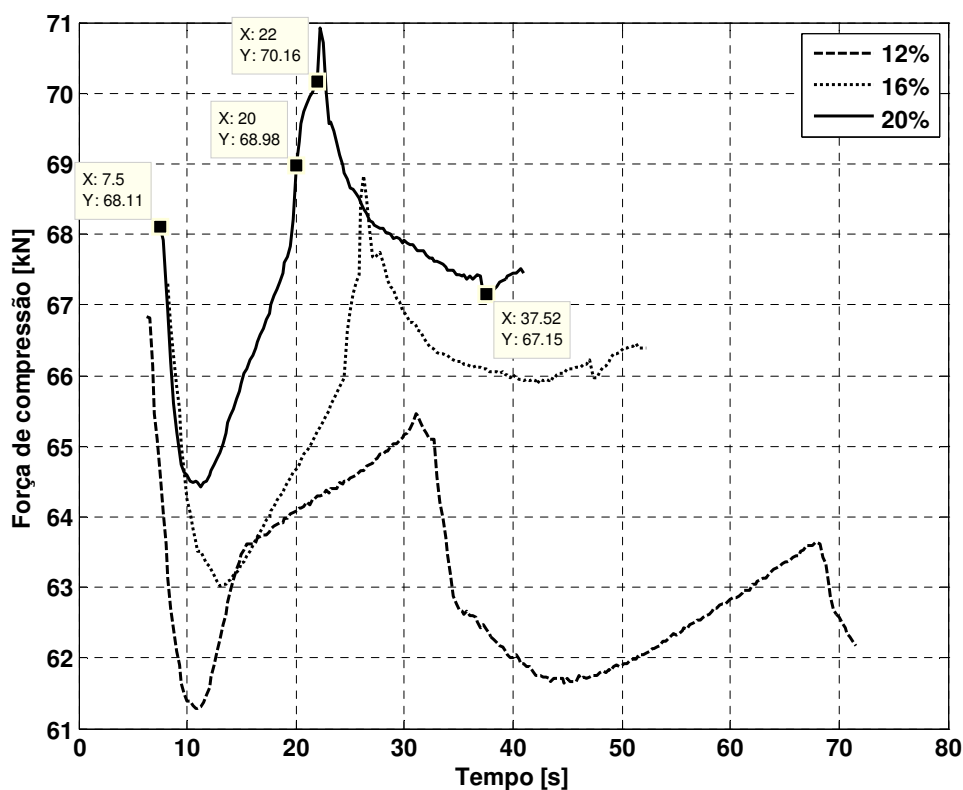


Figura 5.21 – Evolução da força medida pela célula de carga do sistema de compressão, lado direito, em um ciclo completo, para uma compressão em 20% e oscilação em 12%; 16% e 20%.

Verificando o comportamento da célula de carga da esquerda, para um percentual de abertura da válvula de 15% foi medida uma força de 37,77 kN na condição estática. Colocando o sistema em movimento, observa-se no gráfico da Fig. 5.22 que o valor da força na célula de carga da esquerda varia com a velocidade de oscilação do eixo central. Os valores de força de compressão apresentados pela célula de carga da esquerda são mais estáveis que os valores apresentados pela célula de carga da direita, como mostrado nos gráficos das Fig. 5.20 e 5.21.

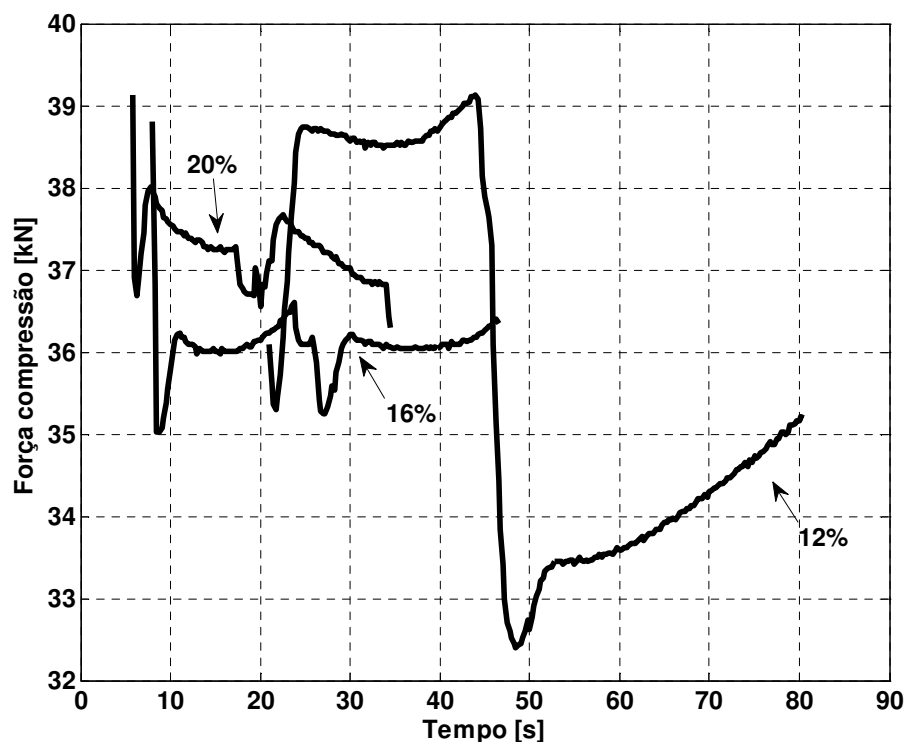


Figura 5.22 – Força de compressão medida pela célula de carga da esquerda, num ciclo completo de oscilação, com compressão em 15% e oscilação em: 12%; 16% e 20%.

O gráfico da Fig. 5.23 mostra uma comparação da força medida pelas duas células de carga em um ensaio com 15% de compressão e 16% de vazão. A célula de carga da direita apresenta maior variação de força que a célula de carga da esquerda. O movimento de descida do eixo central acontece no tempo de 7,75 a 24,25 s e o movimento de subida do eixo central acontece no tempo de 25,5 a 46,75 s. Observa-se no gráfico da Fig. 5.23 que a força de compressão faz um vale após o início da subida e da descida. A força aplicada sobre a amostra varia de 34,6 a 38,73 kN, ocasionando uma variação na pressão exercida sobre a amostra de 1,7 a 1,9 MPa.

Com o ajuste de funcionamento que está sendo realizado na válvula proporcional de redução de pressão utilizada no acionamento do sistema de compressão, espera-se ter uma melhor linearidade de resposta nesta faixa de operação, como mencionado na seção 5.2. Assim, após a reinstalação desta válvula será necessário fazer um novo ensaio tendo em vista a verificação do funcionamento do sistema de compressão das amostras.

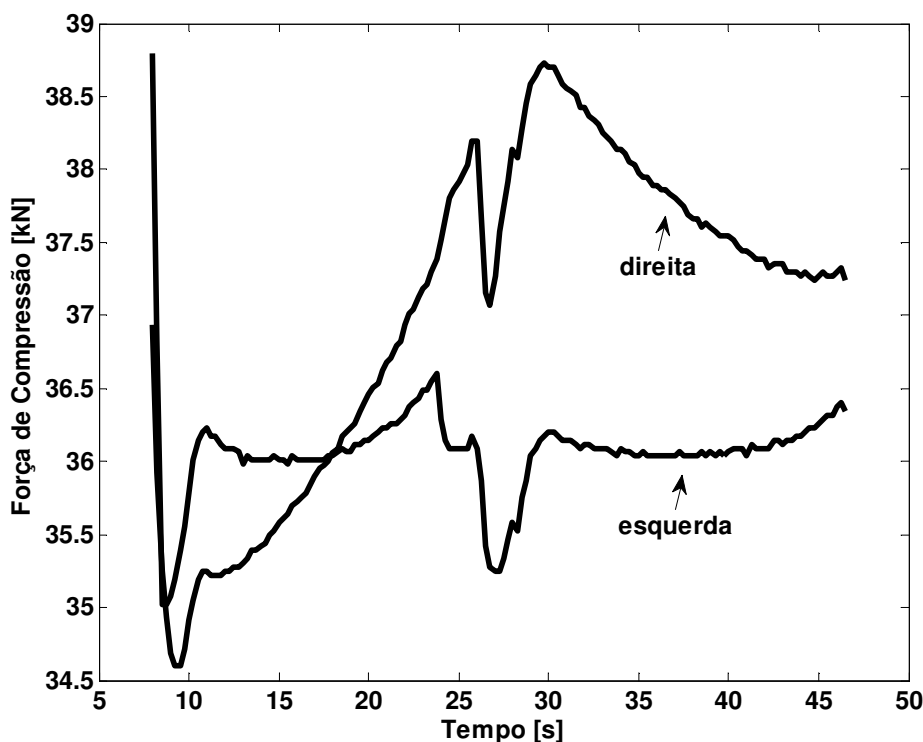


Figura 5.23 – Força de compressão medidas pelas células de carga da esquerda e da direita em um ciclo completo, com compressão em 15%, e oscilação 16%.

5.5 Sistema de monitoramento da força de oscilação do eixo central

O gráfico da Fig. 5.24 mostra a força medida pela célula de carga superior, em um ciclo completo de oscilação, sendo que neste ensaio, o percentual de ativação da válvula do sistema de compressão foi ajustado para 20% e a válvula do sistema de oscilação foi configurada com: 12%; 14%; 16%; 18% e 20%. Observa-se na Fig. 5.24, que o valor da força de oscilação do sistema é praticamente constante com a variação da velocidade do sistema. A velocidade tem uma relação diretamente proporcional com os diferentes percentuais de oscilação utilizados. O gráfico mostra três patamares de força, iniciando por um patamar de cerca de 3,38 kN, com o sistema de oscilação parado, um segundo patamar de aproximadamente -43,50 kN, com o eixo central descendo, e um terceiro patamar de aproximadamente -5,63 kN, com o eixo central subindo. Esta diferença apresentada nos valores das forças quando o eixo central muda o sentido de movimentação se deve a força da gravidade diretamente atuando no sistema.

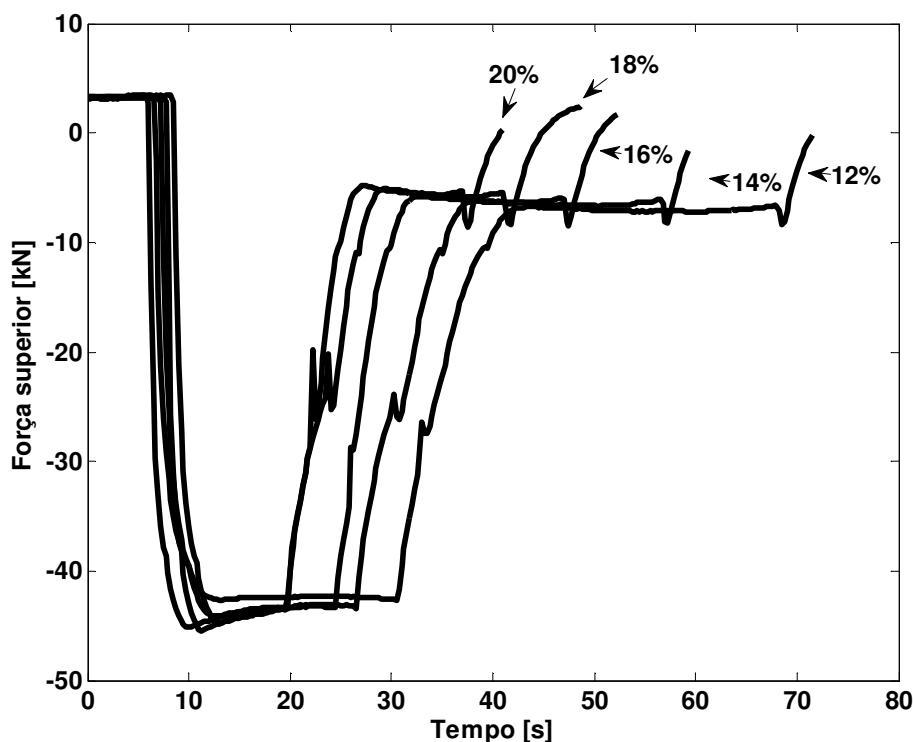


Figura 5.24 – Comparação das forças atuantes no sistema de oscilação, célula de carga superior, compressão em 20%, percentuais de oscilação mostrados no gráfico, movimento completo do eixo: parado, descendo e subindo.

A Tab. 5.8 apresenta os valores médios das forças durante a oscilação do eixo central. Os valores negativos identificam força de compressão e os valores positivos força de tração.

Tabela 5.8 – Força média medida pelas células de carga do sistema de oscilação do eixo central, com diferentes níveis de compressão.

Força média apresentada pela célula de carga	Sistema parado, força inferior [kN]	Sistema parado, força superior [kN]	Sistema descendo, força inferior [kN]	Sistema descendo, força superior [kN]	Sistema subindo, força inferior [kN]	Sistema subindo, força superior [kN]
Compressão 0%	-11,54	1,66	-36,31	-26,32	-35,22	-25,39
Compressão 10%	-16,91	2,76	-25,16	-34,09	-45,11	-15,38
Compressão 15%	-19,24	3,25	-21,54	-38,91	-48,81	-11,33
Compressão 20%	-22,72	3,38	-15,50	-43,50	-53,55	-5,63

Na Tab. 5.8, verifica-se que, na condição estática, a célula de carga inferior está comprimida e a célula de carga superior está tracionada. Isso está associado ao fato de que o cilindro hidráulico inferior suporta o peso do eixo central e seus componentes. O cilindro hidráulico superior, por sua vez, resiste à movimentação gerada pelo peso do eixo central. Ainda com o sistema estático, a soma das forças das duas células de carga é crescente (-9,88 kN, -14,15 kN, -15,99 kN, -19,34 kN) com o aumento da força de compressão das amostras. Acredita-se que isto resulte do aumento de força para gerar a oscilação, devido ao aumento da força de compressão, sendo que o cilindro hidráulico vertical se mantém parcialmente estático, com o desligamento das bombas hidráulicas, assim a força aplicada é proporcionalmente mantida.

Quando o sistema de oscilação está em movimento, a soma das forças das duas células de carga é de aproximadamente -60 kN, em compressão, para todos os percentuais de ativação das válvulas testados, sentidos de movimentação. Acredita-se, pelo desenvolvimento deste ensaio, que se for aumentada a força de compressão, o sistema de oscilação trabalhará com um cilindro fazendo força de compressão e o outro de tração.

5.6 Sistema de monitoramento da velocidade de oscilação do eixo central

A Tab. 5.9 mostra a velocidade de movimentação do eixo central nos parâmetros utilizados para cada ensaio com o TGD completo. O sistema apresenta diferentes valores de velocidade para os movimentos de descida e subida do eixo, com o mesmo percentual de compressão e oscilação. A resolução dos sinais captados do LVDT que monitora o deslocamento do eixo central é de 0,075 mm. A velocidade de descida é aproximadamente 0,8 mm/s maior que a velocidade de subida.

Os valores da força de compressão influenciam minimamente na velocidade do sistema, como se observa nos valores de cada linha da Tab. 5.9.

Tabela 5.9 – Velocidade de movimentação do eixo central, em mm/s.

Velocidade movimentação do eixo central medida através do LVDT			Percentual de ativação da válvula de controle de pressão do sistema de compressão			
			0%	10%	15%	20%
Percentual de ativação da válvula de controle de vazão do sistema de oscilação com pressão máxima de 6 MPa.	12%	descendo	2,5	2,4	2,3	2,3
		subindo	1,7	1,6	1,5	1,5
	14%	descendo	3,1	2,9	2,9	2,8
		subindo	2,2	2,1	2,1	2,1
	16%	descendo	3,8	3,5	3,5	3,4
		subindo	2,9	2,7	2,7	2,6
	18%	descendo	4,5	4,2	4,1	4,0
		subindo	3,5	3,3	3,2	3,2
	20%	descendo	5,2	4,8	4,7	4,6
		subindo	4,2	3,9	3,9	3,7

O gráfico da Fig. 5.25 mostra as características da velocidade de movimentação do eixo central, sem uso do sistema de controle, um pico de velocidade no início do movimento de descida, e valores praticamente constantes no restante da movimentação, este padrão de velocidade foi observado para todos os ensaios com o sistema completo. O sistema hidráulico de oscilação apresenta ótima resposta para que seja feito o controle de malha fechada, devido a sua precisão e linearidade.

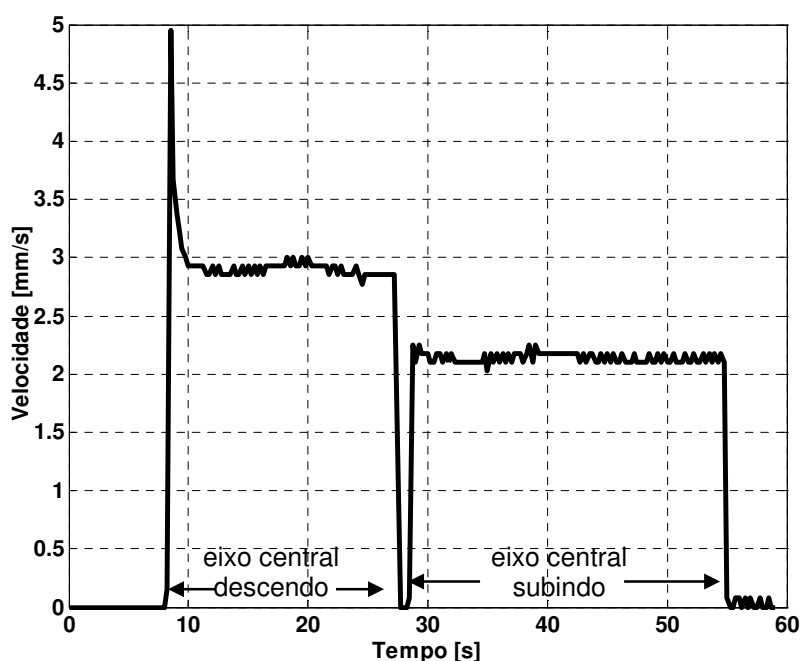


Figura 5.25 – Evolução da velocidade de movimentação do eixo central em um ciclo completo, compressão em 15%, e oscilação em 14%.

CONCLUSÕES

Com este trabalho um Tribômetro de grandes dimensões para ensaios de desgaste por deslizamento foi instrumentado, e realizado o monitoramento dos sinais gerados pelos sensores para a identificação das características de seu funcionamento. Este trabalho gerou informações necessárias ao controle do sistema em malha fechada, permitindo que o equipamento execute os testes para os quais foi projetado, com qualidade, segurança e de forma automática.

O estudo das características dos modelos de sensores escolhidos para a instrumentação e os testes preliminares individualizados com cada sensor, possibilitou conhecer o funcionamento de cada um, e confirmar se o desempenho dos mesmos estava de acordo com as especificações dos fabricantes.

Nos ensaios com o sistema completo verificou-se que:

- As chaves fim-de-curso que limitam o deslocamento das hastes dos cilindros hidráulicos funcionam adequadamente oferecendo a devida segurança ao sistema;
- Nos ensaios para teste da instrumentação, com força de compressão de até 60 kN e velocidade de oscilação de até 5 mm/s, a vibração da estrutura do Tribômetro, medida pelos acelerômetros, apresentou níveis baixos e adequados à execução dos ensaios de desgaste por deslizamento;
- Os LVDTs limitam o desgaste das amostras apresentaram deslocamento diferenciado dos êmbolos no início de cada fase do movimento de oscilação. Acredita-se que este fato se deva a flexibilidade do material que sofrerá desgaste. Foi verificado que a força de compressão no cilindro da direita ainda não estava estabilizada durante o ensaio, o que provavelmente fez com que o LVDT que mede desgaste à direita se movesse mais que o LVDT da esquerda. Estes deslocamentos indesejados dos êmbolos dos LVDTs deverão ser considerados na metodologia a ser utilizada para limitar o desgaste máximo no curso dos ensaios. Será necessário acrescentar ao ensaio métodos de maior resolução para medir o desgaste das amostras, porque a medição com uso do LVDT não apresenta a resolução necessária. Assim, após os ensaios das amostras, o desgaste das amostras será medido com equipamento de maior resolução e precisão;
- As células de carga que medem a força executada no sistema de compressão apresentaram desempenho esperado para o sistema;

- A pressão de contato das amostras deve ser de até 3 MPa. O duto flexível utilizado nos ensaios do Capítulo 5 tem diâmetro que necessita de 65 kN de compressão para criar a pressão de 3 MPa entre as amostras. Esta força é obtida com percentual de cerca de 20% de ativação da válvula. A válvula proporcional de controle de pressão do sistema de compressão atua de modo não linear com percentual de ativação de 0 a 25%. Assim, a válvula está sendo utilizada em sua faixa não linear e não apresentou precisão de desempenho. Esta válvula precisa ser substituída ou ajustada para atuar nesta faixa de pressão de forma linear e precisa, possibilitando a criação sistema de controle de malha fechada, ou talvez, como se esperava a princípio, manter a força de compressão simplesmente com o ajuste do percentual de ativação;
- As células de carga do sistema de oscilação apresentaram desempenho adequado, mas é necessário verificar o desempenho do sistema hidráulico de oscilação para fazer o cálculo do coeficiente de atrito no processo de desgaste por deslizamento;
- O sistema hidráulico de oscilação, no desempenho e variação da velocidade, e o sistema de monitoramento de velocidade de oscilação estão totalmente adequados ao trabalho a ser executado pelo Tribômetro, na faixa de valores que foi testado.

TRABALHOS FUTUROS

Para dar continuidade a este trabalho, sugere-se:

- a) Realizar testes complementares no monitoramento de vibrações analisando os níveis de vibração em outros pontos do Tribômetro que apresentem vibração considerável. Para o controle do nível de vibração, será necessário estabelecer um parâmetro de vibração, e seu valor limite, de tal forma a se garantir a integridade do sistema;
- b) A válvula proporcional de redução de pressão utilizada no sistema de compressão das amostras foi ativada para atuar em sua região não linear, uma vez que as forças requeridas nos ensaios com dutos flexíveis de quatro polegadas são relativamente baixas, a princípio é esta a faixa de atuação mecânica do Tribômetro. Está sendo realizada a modificação da válvula, para que seu trabalho seja linear na faixa de valores de pressão. Após a manutenção será necessário fazer novos testes de identificação do sistema de compressão.
- c) Os LVDTs que limitam desgaste apresentam deslocamento do êmbolo durante o movimento de oscilação do eixo central. Será necessário realizar teste complementares para identificar o comportamento destes LVDTs, após a substituição da válvula do sistema de compressão, fazendo uma quantidade maior de ciclos de oscilação para cada configuração do sistema de compressão e oscilação.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

BARTENEV, G. M.; LAVRENTEV, V. V. **Friction and Wear of Polymers**. In: L.H. Lee and K.C. Ludema, Editors, Tribology Series Vol. 6, Elsevier, Amsterdam , 1981, 320p.

Bosh Rexroth - Proportional pressure reducing valve, 1/10 pilot operated, with on-board electronics (OBE) and position feedback. Disponível em: (<<http://www.boschrexroth.com/>>). Acesso em: Setembro 2010.

BRISCOE, B. J.; TABOR, D. The sliding wear of polymers: a brief review, in: N.P. Suh, N. Saka (Eds.), **Fundamentals of Tribology**, MIT, Cambridge, MA, USA, 1981, 24p.

CHEN, B. **Analytical and finite element modelling of unbounded flexible pipes**. European Conference on Flexible Pipes, Umbilicals and Marine Cables – Structural Mechanics and Testing, 1995, Londres.

DYER, Stephen A. **Survey of Instrumentation and Measurement**. Wiley-Interscience, 2001, p. 516.

DOEBELIN, E.O. **Measurement Systems Application and Design**. 5 ed. McGraw-Hill, 2004.

FERNANDES, J. C. **Segurança nas vibrações sobre o corpo humano**. 2000. Disponível em: (<www.feb.unesp.br/jcandido/vib/Apostila.doc>). Acesso em: Novembro de 2010.

FIALHO, A. B. **Instrumentação Industrial: Conceitos, Aplicações e Análises**, 2.ed., São Paulo: Editora Érica Ltda, 2004, 276p.

FRANCO, S. D.; MORAES, J. O.; ALVES, L. R.; NEGREIROS, L. A. S.; BORGES JR., V.; FRANCO, V. L. D. S. **Otimização de materiais para enrijecedores de linhas flexíveis**, Laboratório de Tribologia e Materiais da Universidade Federal de Uberlândia, 2006, Uberlândia, Relatório Interno.

FRANCO, S. D.; FRANCO, V. L. D. S.; SOARES, A. B.; TEODORO, E. B.; GONÇALVES, R. A.; SILVA, F. J.; SOUZA JR., V. B.; HWANG, H. F.; MORAIS, J. O.; PIRES, R. R. **Ampliação da Infraestrutura do Laboratório de Tecnologia em Atrito e Desgaste da**

Faculdade de Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Uberlândia, 2010, Uberlândia, Relatório Interno.

HBM - Data Sheet Force transducers U10 M. Disponível em: (<<http://www.hbm.com/>>). Acesso em: Março 2010.

HBM – Data Sheet Inductive Standard Displacement Transducers. Disponível em: (<<http://www.hbm.com/>>). Acesso em: Março 2010.

(<<http://www.circuitstoday.com/strain-gauge/>>). Acesso em: Março 2010.

(<<http://www.pcb.com/Accelerometers/Default.asp>>). Acesso em: Novembro 2010.

HWANG, H. F.; FERREIRA, F. M.; PAES, M. T. P.; TEODORO, E. B.; FRANCO, V. L. D. S.; FRANCO, S. D. **Desenvolvimento de um Tribômetro para Ensaios em Escala Real de Revestimentos de Linhas Flexíveis (*Risers*)**, in: 16^o Simpósio em Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, 16, 2008, Uberlândia.

LADEIRA, G. M. V.; FRANCO, S. D.; FRANCO, V. L. D. S. **Monitoramento de Vibrações em um Tribômetro de Grandes Dimensões**, in: 19^o Simpósio em Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, 2009, Uberlândia.

Model 352C67 ICP® - Accelerometer Installation and Operating Manual. Disponível em: (<<http://www.pcb.com/>>). Acesso em: Novembro 2010.

MORAES, P. **Descritivo de Funcionamento, Dispositivo de Teste de Corpo de Prova**. Relatório interno. Rexroth – Bosh Group, 2008, 7p.

PAULO, C. L.; FRANCO, V. L. D. S.; TEODORO, E. B.; PIRES, R. R.; FORMOSO, C. M. **Monitoramento de Vibrações em um Tribômetro de Grandes Dimensões**. Relatório Técnico, Universidade Federal de Uberlândia, 2008, 46p.

Radar Industrial (<<http://www.radarindustrial.com.br/produto>>). Acesso em: Outubro 2010.

RAMOS NETO, F. F., Informações repassadas pessoalmente pela Petrobras, 2010.

RAMOS NETO, F. F., Informações repassadas pessoalmente pela Petrobras, 2011.

ROBERT, D. S.; ERIC, J. S. **Accelerometer Transverse Sensitivity Measurement Using Planar Orbital Motion**. Disponível em: (<<http://www.pcb.com>>). Acesso em: Novembro 2010

ROSA, L. C.; MACHADO, M. A. **Metrologia e Instrumentos de Medição**. Disponível em: (<<http://www.sorocaba.unesp.br/>>). Acesso em: Novembro 2010.

SAMYN, P.; DE BAETS, P. **Friction and wear of acetal: A matter of scale**, Wear vol. 259, 2005a, pp 697-702.

SAMYN, P.; DE BAETS, P. **Ad-Hoc design of sliding elements against wear**, Congresso Ibérico de Tribologia, Guimarães, Portugal, 2005b.

SAMYN, P.; DE BAETS, P.; SHOUKENS, G.; VAN PETEGHEM, A. P. **Large-scale tests on friction and wear of engineering polymers for material selection in highly loaded sliding systems**, Materials and Design, 2005c.

SETO, W. W. **Vibrações Mecânicas**, McGraw-Hill do Brasil, 1971, pp 1-3.

SOUZA, A. P. F. et al., Petrobras, **Colapso de dutos flexíveis sob pressão externa**, Rio de Janeiro, 2000, Boletim técnico.

Spider8 - PC-Measurement Electronics – disponível em: (<<http://www.hbm.com/>>). Acesso em: Janeiro 2011.

SUH, N.P.; SAKA, N. **Fundamentals of Tribology**, MIT, Cambridge, MA, USA, 1981, 1206p.

USB Dynamic Signal Acquisition. Disponível em: (<<http://www.ni.com/>>). Acesso em: Abril 2010.

VERMEULEN, M. **Wear research on large-scale test specimen**, wear, vol. 132, 1989, pp. 287 – 302.

WEG, **Informações gerais sobre Soft-Starters**. Disponível em: (<<http://www.weg.net/br/>>).
Acesso em: Fevereiro 2011.